



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADOS

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN GESTIÓN DE ENERGÍAS

TEMA:

CARACTERIZACIÓN DE PEQUEÑOS SISTEMAS CONVERSORES DE ENERGÍA EÓLICA PERTINENTES PARA PROVISIÓN DE ELECTRICIDAD EN LA PARROQUIA GARCÍA MORENO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA, AÑO 2013. DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA PARA PRODUCCIÓN NACIONAL.

Trabajo de Tesis de grado presentado como requisito para optar por el título de Magister en GESTIÓN DE ENERGÍAS

Autor: MAYORGA Pardo, Alex Santiago.

Tutor: MSc. Oscar Peña Guilarte.

LATACUNGA – ECUADOR

Marzo – 2015



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

UNIDAD DE POSGRADO

Latacunga – Ecuador

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de Miembros del Tribunal de Grado aprueban el presente Informe en consideración de posgrados de la Universidad Técnica de Cotopaxi; por cuanto, el maestrante: Mayorga Pardo Alex Santiago, con el título de tesis: **“Caracterización de Pequeños Sistemas Conversores de Energía Eólica Pertinentes para Provisión de Electricidad en la Parroquia García Moreno, Provincia de Tungurahua, Año 2013. Diseño de un Aerogenerador de Baja Potencia para Producción Nacional.”**, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Defensa de Tesis.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, Marzo – 2015

Para constancia firman:

.....
Ing. MSc. Paulina Freire
PRESIDENTA

.....
Ing. MSc. Fabián Salazar
MIEMBRO

.....
Ing. MSc. Ernesto Abril
MIEMBRO

.....
PhD. Gustavo Rodríguez.
OPONENTE

AVAL DEL DIRECTOR DE TESIS

Latacunga, Diciembre del 2014

En mi calidad de Director de Tesis presentada por el Ing. Mayorga Pardo Alex Santiago, Egresado de la Maestría en Gestión de Energías, previa a la obtención del mencionado grado académico, cuyo título es **“Caracterización de Pequeños Sistemas Conversores de Energía Eólica Pertinentes para Provisión de Electricidad en la Parroquia García Moreno, Provincia de Tungurahua, Año 2013. Diseño de un Aerogenerador de Baja Potencia para Producción Nacional.”**.

Considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del tribunal examinador.

Atentamente

MSc. Oscar Peña Guilarte
DIRECTOR DE TESIS

PhD. Héctor Laurencio
ASESOR DE TESIS

AUTORÍA

Yo, Alex Santiago Mayorga Pardo, portador del número de cédula 1802165785, declaro que la presente Tesis de Grado, es fruto de mi esfuerzo, responsabilidad y disciplina, logrando que los objetivos propuestos se culminen con éxito.

Atentamente

Alex Santiago Mayorga Pardo.

C.I. 1802165785

AGRADECIMIENTO

El autor de este trabajo de investigación expresa un profundo agradecimiento a todo el personal docente y administrativo del Departamento de Posgrado de la Universidad Técnica de Cotopaxi por la inestimable ayuda brindada en la culminación del proceso de maestría.

DEDICATORIA

A quién más sino a Maggie, Diego e Iván.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADOS**

PROGRAMA: “MAESTRÍA EN GESTIÓN DE ENERGÍAS”

“Caracterización de Pequeños Sistemas Conversores de Energía Eólica Pertinentes para Provisión de Electricidad en la Parroquia García Moreno, Provincia de Tungurahua, Año 2013. Diseño de un Aerogenerador de Baja Potencia para Producción Nacional.”

Autor: Alex Santiago Mayorga Pardo

Fecha: Marzo de 2015

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
UNIDAD DE POSGRADOS
MAESTRÍA EN GESTIÓN DE ENERGÍAS

TÍTULO: Caracterización de Pequeños Sistemas Conversores de Energía Eólica Pertinentes para Provisión de Electricidad en la Parroquia García Moreno, Provincia de Tungurahua, Año 2013. Diseño de un Aerogenerador de Baja Potencia para Producción Nacional.

AUTOR: MAYORGA PARDO Alex Santiago.

TUTOR: MSc. PEÑA GUILARTE Oscar

RESUMEN

Este documento describe la caracterización de aerogeneradores de baja potencia, con el objetivo de proveer electricidad a casas aisladas de la red eléctrica en la parroquia García Moreno, cantón Pelileo. Para tal efecto, se determinó el potencial eólico del lugar de estudio y además se investigó sobre las tendencias actuales de construcción de estas máquinas aplicables a sectores rurales. Se evaluó también las necesidades energéticas de una casa típica del lugar. Con esta información se obtuvo los parámetros necesarios para el diseño del aerogenerador utilizando materiales y tecnología ecuatoriana. La investigación también abordó los impactos económico, social y ambiental que podría ocasionar la implementación de este proyecto. Se llegó a la conclusión que es posible realizar aerogeneradores en Ecuador a un costo relativamente bajo y con las prestaciones de cualquier máquina comercial.

Descriptor: potencial eólico, pequeños sistemas conversores de energía eólica, medición de velocidad de viento.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
UNIDAD DE POSGRADOS
MAESTRÍA EN GESTIÓN DE ENERGÍAS

TÍTULO: Caracterización de Pequeños Sistemas Conversores de Energía Eólica Pertinentes para Provisión de Electricidad en la Parroquia García Moreno, Provincia de Tungurahua, Año 2013. Diseño de un Aerogenerador de Baja Potencia para Producción Nacional.

AUTOR: MAYORGA PARDO Alex Santiago.

TUTOR: MSc. Oscar Peña Guilarte

ABSTRACT

This paper describes the characterization of low-power wind turbines, with the aim of providing electricity to isolated houses from the mains in the parish García Moreno, Canton Pelileo. To this end, the wind potential study site was determined and also investigated current trends in building these machines applicable to rural areas. The energy needs of a typical house of the place was also evaluated. With this information the necessary parameters for the design of wind turbine technology using materials and Ecuador was obtained. The research also addressed the economic, social and environmental impacts that could result in the implementation of this project. It is concluded that it is possible to wind turbines in Ecuador at relatively low and the benefits of any commercial machine cost.

Descriptors: wind potential, small wind energy systems converters, wind speed measurement

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	Pág
PORTADA	i
CERTIFICADO DE VALIDACIÓN DE TUTOR.....	ii
INDICE GENERAL.....	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	ii
AVAL DEL DIRECTOR DE TESIS	iii
AUTORÍA.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA	vi
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT	ix
ÍNDICE GENERAL.....	x
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. EL PROBLEMA	4
1.1. Antecedentes del problema.....	4
1.2. Formulación del problema.....	7
1.3. Objeto de estudio	7

1.4.	Justificación y significación.....	7
1.5.	Objetivos.....	10
1.5.1.	Generales	10
1.5.2.	Específicos.....	10
1.5.3.	Campo de acción.....	10
1.6.	Hipótesis	11
1.7.	Conclusiones del capítulo	11
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO		12
2.1.	Antecedentes de la investigación.....	12
2.1.1.	Fabricación local de pequeños aerogeneradores	12
2.1.2.	Experiencias de algunos países en desarrollo	13
2.1.3.	La energía eólica en el Ecuador y electrificación rural.....	15
2.1.4.	Proyectos eólicos en Ecuador a pequeña escala.....	17
2.2.	Fundamentación teórica	18
2.2.1.	Consideraciones para el uso del viento con fines energéticos	19
2.2.2.	Evaluación de las necesidades energéticas	20
2.2.3.	Prospección eólica preliminar.....	20
2.2.4.	Indicadores ecológicos.....	21
2.2.5.	La escala de Beaufort.....	22
2.2.6.	Normativa para la medición del viento.....	23

2.2.7.	Tratamiento estadístico de los datos de viento	25
2.2.8.	Distribución de Weibull.....	26
2.2.9	.Turbulencia	27
2.2.10.	Potencia eólica disponible: potencial eólico	30
2.2.11.	Tecnología de aerogeneradores	30
2.2.12.	Clasificación de las instalaciones eólicas	30
2.2.13.	Elementos de una instalación eólica de pequeña potencia	34
2.2.14.	Principios de aerodinámica de perfiles alares.....	40
2.2.15.	Perfiles alares utilizados en energía eólica	44
2.3.	Marco legal	45
2.4.	Definición de términos.....	47
2.5.	Conclusiones del capítulo	48
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA		50
3.1.	Diseño de la investigación	50
3.2.	Modalidad de investigación.....	50
3.3.	Tipo de investigación.....	51
3.4.	Población y muestra.....	51
3.5.	Operacionalización de las variables.....	54
3.6.	Instrumentos de recolección de datos	56
3.7.	Procedimiento de la investigación	57

3.8.	Procesamiento y análisis	58
3.8.1.	Realización de la prospección eólica preliminar	58
3.8.2.	Medición y tratamiento estadístico de los datos de velocidad de viento a realizarse en esta investigación	59
3.8.3.	Proyección del comportamiento de la velocidad media del viento en el sitio de estudio	60
3.8.4.	Determinación de la intensidad de la turbulencia.....	61
3.8.5.	Determinación del potencial eólico	61
3.9.	Criterios para la elaboración de la propuesta.....	62
3.10.	Conclusiones del capítulo	63
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS		64
4.1.	Caracterización de pequeños sistemas conversores de energía eólica para generación de electricidad aislados de la red	64
4.1.1.	Desarrollo de pequeños sistemas conversores de energía eólica.....	64
4.1.2.	Pequeños aerogeneradores de fabricación local	68
4.2.	Prospección eólica preliminar.....	71
4.2.1.	Evidencia biológica.....	79
4.2.2.	Estimación de velocidad de viento de forma cualitativa	80
4.3.	Medición de la velocidad del viento en el barrio La Libertad	81
4.3.1.	Tratamiento estadístico de la velocidad de viento	81

4.3.2.	Densidad de energía y potencial eólico anual de parroquia García Moreno, Barrio la Libertad	84
4.3.3.	Potencial eólico de viento a distintas alturas	84
4.4.	Evaluación de la necesidad energética del sitio de estudio	85
4.5.	Conclusiones del capítulo	87
CAPÍTULO V. LA PROPUESTA.....		88
5.1.	Título de la propuesta	88
5.2.	Justificación de la propuesta	88
5.3.	Objetivos de la propuesta.....	89
5.4.	Estructura de la propuesta.....	89
5.5.	Desarrollo de la propuesta	89
5.5.1.	Diseño de la turbina	90
5.5.1.1.	Número de álabes o palas (B).....	90
5.5.1.2.	Tamaño de la turbina	92
5.5.1.3.	Diseño de los álabes de la turbina.....	96
5.5.1.4.	Diseño mecánico de los álabes	104
5.5.2.	Selección del generador de imanes permanentes.....	114
5.5.3.	Selección sistema de orientación y control de frenado.....	118
5.6.	Estudio de impactos	122
5.6.1.	Impacto económico.....	122

5.6.2.	Impacto Social	123
5.6.3.	Impacto ambiental.....	124
5.7.	Comprobación de hipótesis.....	127
5.8.	Sugerencias para el mantenimiento del aerogenerador.....	130
5.9.	Conclusiones del capítulo	131
	CONCLUSIONES GENERALES	132
	RECOMENDACIONES	133
	BIBLIOGRAFÍA	134
	BIBLIOGRAFÍA CITADA	134
	BIBLIOGRAFÍA COMENTADA	135
	ANEXOS	139

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo II

Figura 2. 1.	Escala de Griggs-Putnam, para estimar la velocidad el viento a partir de la deformación del follaje de árboles y arbustos. Fuente: (Ponce, 1996).....	22
Figura 2. 2.	Esquema de torre anemométrica, anemómetro, veleta y brazos.....	23
Figura 2. 3.	Función densidad de probabilidad para la velocidad de viento a lo largo de un periodo de tiempo. Fuente: (Villarrubia, Energía Eólica, 2004).....	26
Figura 2. 4.	Influencia de obstáculos en la medida de velocidad de viento. Fuente: (Villarrubia, Energía Eólica, 2004).....	28
Figura 2. 5.	Partes constitutivas de una instalación eólica de pequeña potencia. .	35
Figura 2. 6. a)	Rotores de eje horizontal b) vertical. Fuente: (Serrano, 2011)....	35

Figura 2. 7. Orientación por veleta. Fuente: (Díez, 1993)	37
Figura 2. 8. Geometría de un perfil aerodinámico. Fuente: (Santillán, 2006)	41
Figura 2. 9. Variación de presión en perfiles aerodinámicos. Fuente: (Bazán, 2013)	42
Figura 2. 10. Fuerza que actúan sobre el álabe. Fuente: (Segurado, 2003)	42
Figura 2. 11. Desprendimiento de la capa límite. Fuente: (Segurado, 2003).....	43

Capítulo III

Figura 3. 1. Mapa parroquia García Moreno. Fuente: (Proaño & Toala, 2009) ...	52
---	----

Capítulo IV

Figura 4.1. Tipo de eje utilizado en los pequeños aerogeneradores. Fuente: (Arraña, 2012)	65
Figura 4. 2. Cantidad de palas utilizadas en los pequeños aerogeneradores. Fuente: (Arraña, 2012)	66
Figura 4. 3. Materiales utilizados para la fabricación de las aspas. Fuente: (Arraña, 2012)	66
Figura 4. 4. Tipo de generador eléctrico utilizado. Fuente: (Arraña, 2012)	67
Figura 4. 5. Resultados de la pregunta 1 de la encuesta.....	71
Figura 4. 6. Resultados de la pregunta 2 de la encuesta.....	72
Figura 4. 7. Resultados de la pregunta 3 de la encuesta.....	72
Figura 4. 8. Resultados de la pregunta 4 de la encuesta.....	73
Figura 4. 9. Resultados de la pregunta 5 de la encuesta.....	74
Figura 4. 10. Resultados de la pregunta 6 de la encuesta.....	74
Figura 4. 11. Resultados de la pregunta 7 de la encuesta.....	75
Figura 4. 12. Resultados de la pregunta 8 de la encuesta.....	75
Figura 4. 13. Resultados de la pregunta 9 de la encuesta.....	76
Figura 4. 14. Resultados de la pregunta 10 de la encuesta.....	76
Figura 4. 15. Fotografía Sector La Libertad.....	77
Figura 4. 16. Fotografía Sector Vía a Nitón (Barrio La Libertad).....	78

Figura 4. 17. Fotografías barrio La Libertad. Evidencia biológica de presencia de viento en el mes de mayo de 2013.	79
Figura 4. 18. Resultados de la aplicación de la escala de Beaufort.	81
Figura 4. 19. Histograma de frecuencias relativas (f_i) vs velocidad de viento (V_i).	83
Figura 4. 20. Gráfica de la función de Weibull de los datos registrados.	83

Capítulo V

Figura 5. 1. Área de barrido rotor de eje horizontal. Fuente: (MEGAWIND, 2006)	92
Figura 5. 2. Transformaciones de energía en sistemas conversores de energía eólica. Fuente: (Villarrubia, Energía Eólica, 2004)	93
Figura 5. 3. Ejemplo de variación del coeficiente de potencia vs Velocidad específica. Fuente: (Villarrubia, Energía Eólica, 2004).....	94
Figura 5. 4. Gráfica de un perfil NACA 0015 generado con JAVAFOIL.	97
Figura 5. 5. Gráfica de un perfil NACA 24XX generado con JAVAFOIL.	97
Figura 5. 6. Gráfica de un perfil NACA 44XX generado con JAVAFOIL.	97
Figura 5. 7. Gráfica de un perfil NACA 23-0XX generado con JAVAFOIL.....	98
Figura 5. 8. Gráfica de un perfil NACA 6X-2XX generado con JAVAFOIL.....	98
Figura 5. 9. Perfil NACA 4415 generado con JAVAFOIL.....	99
Figura 5. 10. Diagrama polar NACA 4415 generado con JAVAFOIL.	99
Figura 5. 11. Variación de la cuerda vs posición de la estación.	101
Figura 5. 12. Alabe linealizado.	103
Figura 5. 13. Modelado del álabe programa SolidWork.....	103
Figura 5. 14. Ensamblaje del álabe con los discos de fijación.	106
Figura 5. 15. Mallado del álabe para aplicación de cargas.	110
Figura 5. 16. Análisis de tensiones.....	111
Figura 5. 17. Análisis de deformaciones.....	112
Figura 5. 18. Análisis de deformación.	113
Figura 5. 19. Factor de seguridad dinámico.....	113

Figura 5. 20. Diagrama de un GIP de flujo axial. Fuente: (Sánchez & Chiroque, 2005)	115
Figura 5. 21. Ensamblaje del bobinado del estator.	115
Figura 5. 22. Fotografías donde se muestra el ensamblaje y encastrado de uno de los rotores realizados en la Universidad Técnica de Ambato.	116
Figura 5. 23. Estator en el molde ya encapsulado.....	116
Figura 5. 24. Diagrama que muestra el ensamblaje final de los rotores, el estator utilizando la punta del eje de una rueda de auto. Fuente: (Piggott, 2003)	117
Figura 5. 25. Esquema y fotografía del soporte del generador y la veleta.	117
Figura 5. 26. Posición recomendada de la veleta. Fuente: (Díez, 1993).....	119
Figura 5. 27. Efecto de frenado provocado por la posición de la veleta con respecto al centro de giro. Fuente: (Piggott, 2003)	119
Figura 5. 28. Angulo de eje de cola. Fuente: (Chávez, 2012).....	121
Figura 5. 29. Angulo de pivote de cola. Fuente: (Chávez, 2012)	121

ÍNDICE DE TABLAS.

Capítulo II

Tabla 2. 1. Modelo tabular para procesamiento de datos de viento.	26
Tabla 2. 2. Condiciones de viento tolerables para los aerogeneradores, según la norma IEC 61400-1.....	29
Tabla 2. 3. Precios de kW.h generados con energías renovables no Convencionales. Fuente: (CONELEC, Plan Maestro de electrificación 2009-2020, 2009)	46
Tabla 2. 4. Precios de kW.h generados con energías renovables no Convencionales. Regulación 001/13.....	47

Capítulo III

Tabla 3. 1. Población del Cantón Pelileo Fuente: (INEC, 2011)	51
Tabla 3. 2. Valores para el cálculo del tamaño de una muestra por niveles de confianza. (Canavos, 1988).....	54
Tabla 3. 3. Operacionalización de la variable independiente. Fuente: El Autor... 55	

Tabla 3. 4. Operacionalización de la variable dependiente. Fuente: El Autor.....	56
Tabla 3. 5. Matriz para la recolección de datos. Fuente: El Autor.....	57

Capítulo IV

Tabla 4. 1. Componentes utilizados en los modelos de aerogeneradores de fabricación local.	70
Tabla 4. 2. Criterios de apreciación de la intensidad del viento para escala Beaufort en El Barrio La Libertad, Parroquia García Moreno.....	80
Tabla 4. 3. Valor probable de velocidad según la Escala de Beaufort.....	80
Tabla 4. 4. Análisis estadístico de velocidad de viento.....	82
Tabla 4. 5. Resultados del tratamiento estadístico de velocidad de viento.	84
Tabla 4. 6. Resultados potencial eólico.....	84
Tabla 4. 7. Potencial eólico a distintas alturas de la Parroquia García Moreno, barrio La Libertad.	85
Tabla 4. 8. Análisis energético vivienda tipo.....	86

Capítulo V

Tabla 5. 1. Número de álabes o palas según velocidad específica y tipo de máquina. Fuente: (Díez, 1993).....	91
Tabla 5. 2. Resultados del diagrama polar perfil NACA 4415.	99
Tabla 5. 3. Resultados del cálculo de cuerda y ángulo de torsión para diez estaciones.	100
Tabla 5. 4. Cálculo de los parámetros de construcción del álabe.	102
Tabla 5. 5. Propiedades mecánicas de madera de laurel. Fuente: (Vinuesa, 2012)	105
Tabla 5. 6. Análisis de tensiones nodales.....	110
Tabla 5. 7. Desplazamientos generados.	111
Tabla 5. 8. Deformaciones unitarias.	112
Tabla 5. 9. Costos indirectos del aerogenerador.	122
Tabla 5. 10. Costo de mano de obra.....	123

INTRODUCCIÓN

La energía eólica a pequeña escala (llamada también minieólica) es el aprovechamiento de los recursos eólicos mediante la utilización de aerogeneradores de potencia inferior a los 100 kW. Por tanto es una fuente de energía limpia y sostenible, y puede utilizarse tanto para autoabastecimiento, sobre todo en zonas que no alcanza la red eléctrica, como para suministrar a la misma red.

La generación de electricidad a pequeña escala fue originalmente definida por sus características para producir poca cantidad de energía para cubrir el consumo de los electrodomésticos o cubrir las necesidades energéticas de varios hogares con poca demanda eléctrica. (Gipe, 2000)

Aunque el recurso es el mismo que en la gran eólica, las instalaciones minieólicas tiene sus propias características:

- Generación de energía próxima a los puntos de consumo, reduciendo las pérdidas de transporte.
- Versatilidad de aplicaciones y ubicaciones, ligado al autoconsumo, con posibilidad de integración en sistemas híbridos, y tecnologías existentes para suelo y cubierta.
- Accesibilidad tecnológica al usuario final, por las relativamente bajas inversiones requeridas, con una instalación sencilla, facilidad de transporte de equipamientos y montaje.
- Funcionamiento con vientos moderados, sin requerir complejos estudios de viabilidad.
- Aprovechamiento de pequeños emplazamientos o de terrenos con orografías complejas.
- Suministro de electricidad en lugares aislados y alejados de la red eléctrica.
- Bajo coste de operación y mantenimiento y elevada fiabilidad

- Reducido impacto ambiental, por menor tamaño e impacto visual, y por su integración en entornos humanizados (Cruz, 1999).

Así como la energía eólica a gran escala ya ha demostrado su viabilidad en países en desarrollo y, aunque de manera insipiente, en el Ecuador, la minieólica no se ha desarrollado suficientemente y se está desaprovechando la capacidad de optar energía renovable de manera distribuida en entornos urbanos, semi-urbanos, industriales y agrícolas.

Una familia estadounidense promedio utiliza 11496 kW.h de electricidad al año. Bajo esas mismas premisas, se necesitaría una turbina de unos 10 kW para cubrir el consumo total. En comparación, un hogar promedio europeo tiene un consumo energético más ajustado, y con una turbina de 4 kW podría autoabastecerse. Una familia promedio china tendría suficiente con un aerogenerador de 1 kW.

Son pocos los países en vías de desarrollo que han creado políticas para la implementación de la minieólica, a pesar de sufrir graves problemas de demanda de electricidad, especialmente en el sector rural. Afortunadamente en Ecuador se está promoviendo el uso, no solamente de energía eólica, sino también de otras formas de generar electricidad a partir de energías alternativas.

Es por esto que el presente trabajo de investigación está encaminado a determinar el potencial eólico de la parroquia García Moreno del Cantón Pelileo provincia de Tungurahua, con el fin de proponer un sistema conversor de energía eólica de baja potencia para generar electricidad a viviendas unifamiliares. El trabajo de investigación está estructurado en cinco capítulos que se describen a continuación:

En el Capítulo I, se plantea y analiza el problema con su respectiva contextualización, análisis crítico, pronosis, delimitación temporal y espacial, formulación del problema, para con esto formular los objetivos generales y específicos y el enfoque de la investigación.

En el Capítulo II, se establece el marco teórico, que contempla la revisión de documentos precedentes sobre el tema de investigación, la fundamentación legal y la fundamentación teórica del objeto de estudio.

En el Capítulo III, se establece la metodología utilizada para llevar a cabo la investigación: el diseño, la modalidad, forma, tipo y nivel de investigación, la población y muestra, los métodos y técnicas a ser empleadas, la hipótesis, la operacionalización de las variables y el procedimiento de la investigación.

En el Capítulo IV, se aplican los aspectos teóricos estudiados con anterioridad y que sirvieron para determinar el potencial eólico de la parroquia García Moreno y con este resultado, realizar la caracterización de pequeños sistemas conversores de energía eólica para generación de electricidad de acuerdo a la demanda de energía de una vivienda del lugar estudiado.

En base a la interpretación de los resultados de este capítulo, se establecieron los principales parámetros de diseño del aerogenerador.

Finalmente en el Capítulo V, se plantea como propuesta, el diseño de un micro aerogenerador para que pueda ser fabricado con tecnología nacional, recabándose las conclusiones y recomendaciones a las que se ha llegado en esta investigación.

CAPÍTULO I. EL PROBLEMA

1.1. Antecedentes del problema

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

El desarrollo económico de una región requiere una gran demanda de energía, ya que es necesario construir infraestructuras de todo tipo, lo que exige industria pesada, la cual requiere, a su vez, grandes cantidades de materia prima y, claro está, de energía. Es por eso que países en vías de desarrollo y países subdesarrollados con dificultades de obtención de energía, que requieren de una gran intensidad energética para desarrollarse y poder obtener a la vez más energía, al no poder disponer de ésta, no tienen la posibilidad de crear todas las infraestructuras que permitirían abastecerse de más energía.

Por lo descrito anteriormente, se crea un “círculo vicioso” que dificulta el desarrollo de ciertos países más desfavorecidos. Como dato relevante se podría citar que (ONU, 2005) actualmente, casi 1 600 millones de personas de los países en desarrollo no tienen acceso a la electricidad, cifra que representa un poco más de un tercio de la población mundial.

En Ecuador, un número significativo de personas del área rural no están conectadas a la red eléctrica nacional de acuerdo al informe Plan Maestro de electrificación 2009-2020 (CONELEC, Plan Maestro de electrificación 2009-2020, 2009), la cobertura eléctrica a nivel nacional es del 91 % y en el sector rural del 85 %, faltando por servir a 235 mil potenciales usuarios.

Desde el punto de vista financiero, la realidad demuestra que las empresas distribuidoras tienen poco interés en atender a estas áreas rurales, ya que la

dotación del servicio eléctrico es excesivamente costosa si se utilizan esquemas tradicionales, como la extensión de líneas eléctricas y, agresivas contra el ambiente, si se incluyen grupos termoeléctricos. La carencia de energía eléctrica conlleva también a la falta de telecomunicaciones (servicio de Internet, telefonía), servicios de salud, problemas en centros educativos y falta de agua potable.

En caso de disponer de energía eléctrica convencional, algunas poblaciones rurales no pueden pagar el coste de esta energía (costos de conexión y tarifas eléctricas) ya que generalmente son personas subempleadas sin sueldo fijo, o hacen una mala utilización de las subvenciones otorgadas por el gobierno (Bono Solidario).

Otro aspecto preocupante de esta realidad es en cuanto al uso de luz artificial de pésima calidad en las noches ya que este sector de la población utiliza para alumbrarse lámparas de pilas, gasolina, o gas y especialmente el consumo de velas, lo que ha sido causa de incendios y quemaduras en los niños. Aparte de esto, puede ser patente el deterioro ambiental por los desechos que estos consumibles producen, especialmente las baterías.

Otra dificultad que afecta el nivel de vida de estas poblaciones, es el desconocimiento de fuentes alternativas de energía que pueden ser utilizadas en estas zonas y su potencial disponible, por falta de promoción de organismos encargados, lo que conlleva a que se intensifique el uso de combustible fósil para satisfacer necesidades energéticas básicas, de forma especial en la alimentación, creando ambientes nocivos para la salud de sus habitantes.

La aplicación de sistemas conversores de energía alternativa en zonas rurales marginales resulta poco atractivo debido a los altos costos que estos tienen, ya que necesariamente deben ser importados y, en muchas circunstancias no existe la disponibilidad de repuestos, ni tampoco se adaptan a la realidad geográfica del Ecuador. Sumado a esto, el desarrollo de estos equipos con tecnología ecuatoriana es incipiente por falta de personal calificado para su diseño, selección e instalación.

Ante la problemática descrita en párrafos anteriores, se conjugan varias posibilidades de solución para elevar la calidad de vida de las comunidades rurales marginales afectadas por la carencia de electricidad. Una muy atractiva, constituye la utilización de recursos energéticos alternativos presentes en estas zonas (energía eólica, solar, hidráulica). No aprovechar estos recursos energéticos limita el desarrollo productivo y por ende el bienestar de las personas involucradas en los problemas descritos.

Es conocido que Ecuador tiene altos potenciales de energía alternativa en todas sus regiones. Es de importancia especialmente en la región sierra, la presencia de energía eólica que puede ser utilizada para suplir necesidades energéticas básicas de las poblaciones afectadas (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2013).

La implementación de sistemas conversores de energía eólica a pequeña escala es posible siempre y cuando se aplique una adecuada prospección preliminar que nos permita identificar su presencia en algún lugar determinado a través de normativa especializada. Otro aspecto de interés que es necesario conocer es la cantidad de energía que requieren las comunidades rurales con el fin de dimensionar el sistema conversor de energía eólica adecuado y preferentemente, construirlo con tecnología disponible en nuestro entorno, con lo que se podría abaratar significativamente los costos de construcción e implementación. (Santillán, 2006)

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación, se ha escogido la Parroquia García Moreno del Cantón Pelileo, provincia de Tungurahua. La actividad económica de esta parroquia se caracteriza en la producción agropecuaria, aunque también se desarrolla actividades importantes como la artesanal y comercio.

En este lugar existe el problema de que algunas familias de la zona rural carecen de tendido eléctrico debido a la falta de recursos económicos, reflejándose en las personas que aquí viven los problemas descritos anteriormente. Además se ha observado a través de algunos trabajos de investigación, que esta zona presenta un

potencial eólico importante que puede ser aprovechado para suministrar energía eléctrica de forma aislada para satisfacer necesidades energéticas básicas, por ejemplo en iluminación (Guananga, 2012).

1.2. Formulación del problema

El desconocimiento del potencial eólico de la parroquia García Moreno dificulta la correcta caracterización y diseño de pequeños sistemas conversores de energía eólica para generación de electricidad, año 2013.

1.3. Objeto de estudio

Sistemas conversores de energía eólica de baja potencia para generación de electricidad.

1.4. Justificación y significación

El origen del presente proyecto radica en la falta de energía eléctrica en poblaciones rurales pobres del país, que no tengan la ventaja de acceder a la red eléctrica. Se pretende desarrollar infraestructuras con alternativas energéticas para poder abastecer de la energía necesaria para usos mínimos como luz, radio y televisión, a familias en estas poblaciones.

En estas zonas, muchas casas utilizan baterías eléctricas para tener energía eléctrica, y a menudo se cargan en la ciudad más cercana, lo que a la postre resulta costoso en dinero, tiempo y conveniencia. Los pequeños aerogeneradores son una opción mejor para cargar las baterías. El proyecto se desarrollará con el objetivo de crear conocimientos acerca de la caracterización constructiva, mecánica y eléctrica de este tipo de aerogenerador, para que en un futuro, se pueda continuar el estudio llegando a fabricar un prototipo, que a su vez permita establecer más información y mejoras sobre su comportamiento *in situ*.

La electricidad así generada permitirá alargar las horas de luz (mejora de la productividad en talleres de artesanía, niños y adultos pueden estudiar tras la

puesta de sol.), conservar medicamentos en neveras en puestos de asistencia médica, utilizar maquinaria e incrementar la productividad de terrenos, mejorando la alimentación de comunidades rurales, favoreciendo la venta de excedentes así como la manufactura de productos elaborados y con valor añadido a partir de los excedentes; se convierte pues, en una forma de salir de la pobreza, reducir la mortalidad infantil y a disminuir las diferencias de género, entre otros beneficios.

El aerogenerador convierte la energía del viento en energía eléctrica, que puede ser usada para la carga de baterías, electrificación de casas y granjas, reducción del consumo de generadores diésel, accionamiento de bombas para la extracción de agua, entre otros.

Al ser el viento hasta cierto punto un recurso variable en el tiempo, es usual utilizar en este tipo de proyectos, acumuladores dotados de alta autonomía.

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

Ventajas (ONU, 2013).

La cantidad de energía disponible de las baterías puede aumentar, y no se tendrán que comprar nuevas baterías tan frecuentemente: En una buena localización, y cuidando el manejo de la energía y la batería, la cantidad de energía disponible para usarse por un hogar será mayor cuando la batería se cargue gradualmente que cuando se cargue periódicamente.

La energía eólica no causa daños al ambiente: aunque se utiliza energía en la construcción de un aerogenerador, una vez que está funcionando, no consume combustibles fósiles y por tanto no emite gases de efecto invernadero. El ruido producido a las bajas velocidades de giro es muy pequeño, y menor que el producido por generadores diésel. El impacto sonoro y visual del sistema descrito no ha causado preocupación en ninguna de las instalaciones probadas.

La energía eólica es más barata que sus alternativas: Donde el recurso eólico es bueno, la energía producida mediante aerogeneradores es más barata que utilizando generadores diésel o fotovoltaicos, particularmente si el suministro de combustible está lejos del usuario.

En áreas remotas, el coste de la conexión a la red es tan elevado, que excede mucho de los sistemas que utilizan baterías (solares o eólicas).

Desventajas (ONU, 2013).

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

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

Las demandas de potencia no proveerán exactamente el suministro en un momento dado.

El uso de baterías efectivamente soluciona este problema, y permite al usuario captar energía cuando el viento es ligero o no hay, y guardar energía cuando el viento es fuerte. Así mientras la potencia media que entra en la batería sea la misma que la potencia media que sale durante un periodo de unas pocas horas (o tanto tiempo como permita la capacidad de las baterías) en el hogar no debería acabarse la electricidad, incluso si ellos usan más potencia que la media por un rato.

Esto significa que el generador solo necesita, como media, producir el requerimiento de potencia media más que una potencia de pico. En realidad necesitará producir algo más de potencia que la media demandada ya que se producen pérdidas de energía en el sistema.

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

1.5. Objetivos

1.5.1. Generales

- Evaluar el potencial energético eólico para la caracterización sistemas conversores de energía eólica en la Parroquia García Moreno, Provincia de Tungurahua.
- Diseñar un aerogenerador de baja capacidad para generación de electricidad, factible de ser construido con tecnología ecuatoriana de acuerdo al potencial eólico de la Parroquia García Moreno, Provincia de Tungurahua.

1.5.2. Específicos

- Determinar la densidad de potencial eólico disponible en la Parroquia García Moreno, Provincia de Tungurahua.
- Determinar los parámetros de diseño del aerogenerador seleccionado.
- Diseñar un aerogenerador que sea factible de construirlo con tecnología nacional que satisfaga las condiciones de la Parroquia García Moreno.
- Probar la factibilidad de fabricación de pequeños sistemas conversores de energía eólica con tecnología nacional.

1.5.3. Campo de acción

Caracterización y diseño de pequeños sistemas conversores de energía eólica con tecnología nacional para generación de electricidad en la Parroquia García Moreno.

1.6. Hipótesis

El establecimiento del potencial eólico de la Parroquia García Moreno, la caracterización de un sistema conversor de energía eólica y sus parámetros de diseño, hará posible diseñar un aerogenerador factible de construirlo con tecnología nacional para satisfacer las necesidades energéticas en hogares aislados de la comunidad.

1.7. Conclusiones del capítulo

Mediante el análisis de los antecedentes de esta de investigación, se ha logrado definir los objetivos a cumplir, lo que ha permitido delimitar el objeto de estudio y el campo de acción de la misma.

Se ha evidenciado que la implementación de un pequeño sistema conversor de energía eólica en la Parroquia García Moreno, podría resolver algunos problemas como de iluminación, ambientes más sanos para los posibles beneficiados, siempre y cuando el potencial eólico lo permita. Esto es lo que motiva el desarrollo de la presente investigación, evaluar la posibilidad de este diseño desde el punto de vista de la disponibilidad del recurso y tecnología nacional.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se establece la información relevante de la fundamentación teórica que orientará la investigación. Se recogerán los antecedentes sobre los sistemas minieólicos de electrificación rural usados en la actualidad en países en desarrollo, tecnología que utilizan dichos sistemas y posibilidades concretas de utilización en Ecuador.

Como parte de este proceso de investigación, se tomará en cuenta las distintas normas y regulaciones en cuanto a electrificación autónoma a nivel mundial y en Ecuador, de forma que se dé un soporte legal y normativo al proyecto.

Se termina este capítulo poniendo de relieve la fundamentación teórica en cuanto al desarrollo de pequeños aerogeneradores, medición y tratamiento estadístico del viento que posibilite la determinación de potencial eólico de la Parroquia García Moreno.

2.1. Antecedentes de la investigación

Al estar este proyecto enmarcado en una región rural de Ecuador, se analiza a continuación algunas experiencias relevantes en cuanto a electrificación por energía minieólica en zonas de algunos países, concretamente China, Perú y Nicaragua, donde este tipo de proyectos han mostrado resultados importantes.

2.1.1. Fabricación local de pequeños aerogeneradores

Hasta la fecha, el uso de la energía eólica para la electrificación rural ha sido limitado. Sin embargo, el hecho de que las micro-turbinas de viento se puedan fabricar utilizando herramientas básicas de taller con técnicas y materiales que se puedan hallar en el lugar a menudo se pasa por alto. La fabricación local tiene el potencial de impulsar la economía del sector involucrado, la construcción de capacidades locales, reducir los costos y producir sistemas de energía resistentes y flexibles.

Sin embargo, la tecnología de fabricación local debe considerarse integrada socialmente debido a la variedad de conocimiento local, las habilidades, el equipo y los materiales necesarios para construir y mantener los sistemas, así como las estructuras organizativas necesarias para garantizar su sostenibilidad a largo plazo.

La evidencia de iniciativas exitosas sugiere que el apoyo de gobiernos locales y nacionales o las organizaciones no gubernamentales son necesarias para fomentar el desarrollo de una industria de la energía eólica en base de fabricación local. Las funciones de estos intermediarios son identificar y seleccionar las zonas con mucho viento y condiciones ambientales favorables, la realización de la investigación y el desarrollo, de la retroalimentación de los usuarios finales, la creación de cadenas de suministro de las nuevas piezas y materiales y el desarrollo de los conocimientos pertinentes y habilidades.

La fabricación de micro-turbinas eólicas a nivel local no sólo tiene el potencial de impulsar la economía y fortalecer el cambio de la Matriz Energética, también puede ayudar a introducir un sistema de energía elástica a través de la creación en serie de piezas de repuesto (acompañados por los comerciantes locales capacitados para llevar a cabo las reparaciones). Además, con la participación de miembros de la comunidad en la construcción y las fases de instalación, la fabricación local puede aumentar la probabilidad de éxito de la transferencia de conocimientos a los usuarios finales de forma que se fomente un uso productivo de la energía y para garantizar un funcionamiento fiable a través de la realización de un adecuado procedimiento de operación y mantenimiento.

2.1.2. Experiencias de algunos países en desarrollo

Según *Evaluating the Impact of Wind Generators in Inner Mongolia* (Batchelor & Scott, 2011) en la región autónoma de Mongolia Interior del norte de China las universidades locales e instituciones de investigación recibieron apoyo para el desarrollo de más de 20 modelos de generadores eólicos domésticos (HWGs por sus siglas en Inglés). Las llanuras de Mongolia Interior, no sólo contienen el 40 %

de viento explotable de China, sino también cientos de miles de hogares demasiado remotos para que puedan ser conectados a la red.

La fuerte industria manufacturera de China permitió la producción de toda la instalación eólica en el país. Los aerogeneradores se produjeron en Mongolia Interior, mientras que los componentes del sistema eléctrico (baterías, regulador de carga, inversor) son chinos, a una fracción del costo en el que por lo general se exportan a otros países. El énfasis en la fabricación local dio flexibilidad para adaptar la tecnología en el contexto local y fue un éxito para la economía, la capacidad y la cadena de suministro de la región (Leary, While, & Howell, 2012).

La electrificación rural en base a la energía eólica en el Perú, donde más del 67 % de la población rural del país no tiene acceso a la electricidad (IEA, 2010), ha sido muy diferente a la experiencia de Mongolia Interior. Aquí, las ONG han estado utilizando la tecnología del doctor Hugg Piggott (considerado el mayor experto a nivel mundial en la fabricación local de micro aerogeneradores) para electrificar una serie de comunidades rurales. La intención es que estas comunidades sirvan como proyectos de demostración para las autoridades locales y regionales para replicar y difundir estos proyectos a mayor escala. En concreto, la electrificación de El Alumbre en la región montañosa de Cajamarca (ejecutado por la ONG Soluciones Prácticas) se instalaron 33 micro aerogeneradores (Modelo: IT- PE - 100: Diámetro de 1,7 metros, entrega de energía estimada de 548 kW.h/año Potencia máxima de 300 W) en casas individuales y 2 aerogeneradores grandes (Modelo SP- 500: de diámetro 4 metros, entrega de energía estimada de 1807 kW.h/año y Potencia máxima de 1000 W) para la escuela local y su centro de salud.

La iniciativa ha tenido éxito en el logro de cambios sociales: el 57 % de los hogares ahora utilizan la luz eléctrica para tejer en las noches y los miembros de las comunidades vecinas vienen a cargar sus teléfonos móviles por un módico precio. Al igual que en Mongolia Interior, se han empleado micro turbinas de viento para el hogar, sin embargo, la tecnología desarrollada por Soluciones

Prácticas es mucho más cara y el recurso eólico en la mayoría de El Alumbre es considerablemente más bajo (velocidad media anual de 4,3 m/s).

La organización no gubernamental *BlueEnergy*, con sede en Nicaragua, que realiza un papel similar al de Soluciones Prácticas en Perú. Se ha instalado aerogeneradores en cinco comunidades en la costa caribeña del país, donde el 80% de la población no tiene acceso a la electricidad. Debido a las grandes distancias entre los hogares y los bajos regímenes de viento del Caribe (entre 3 a 4 m/s de velocidad promedio anual), *BlueEnergy* eligió para instalar una turbina eólica más grande al lado de un edificio de la comunidad. Por ejemplo, en la localidad de Monkey Point en Nicaragua, se utilizó un sistema híbrido fotovoltaico - eólico donde los usuarios llevan sus baterías hacia y desde la estación central de carga, mientras que una serie de edificios de la comunidad, tales como una sala de radio y una escuela están conectados directamente. Si bien esto puede proporcionar un suministro más asequible de electricidad que Soluciones Prácticas, una vez más el problema fundamental de la falta de recursos eólicos significa que el costo de la energía es aún más alta que los HWGs de Mongolia Interior, a pesar de ofrecer un servicio de carga de baterías en lugar de un suministro directo de corriente alterna (Craig, 2007)

2.1.3. La energía eólica en el Ecuador y electrificación rural

El gobierno de Ecuador se ha preocupado por el uso de energías renovables como parte de la reforma de las matrices energética y productiva. A nivel de pequeña eólica el país ya cuenta con una normativa propuesta por el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC) para poder gestionar proyectos en energías renovables a pequeña escala que deben cumplir con lo siguiente: (CONELEC, Plan Maestro de electrificación 2009-2020, 2009)

- Que dispongan de estudios de factibilidad, sostenibilidad y estudios ambientales que cumplan con las disposiciones del Reglamento Ambiental para Actividades Eléctricas.

- Que el monto solicitado de fondos del FERUM, sea máximo hasta los siguientes valores por vivienda o local de servicio comunitario beneficiado: (CONELEC, Plan Maestro de electrificación 2009-2020, 2009)
 - Generación eólica: 1 350 USD /vivienda
- Generación Fotovoltaica:
 - Usuario Tipo I: 3 200 USD /vivienda
 - Usuario Tipo II: 3 500 USD /vivienda
 - Centros Comunales, Salud y Educación: 3 800 USD /vivienda
 - Bombeo de Agua: 4 000 USD /vivienda
- Generación con Biomasa: 600 USD /vivienda
- Generación con minicentrales hidroeléctricas: USD 2.400/vivienda.

Un estudio importante que ha enfocado su trabajo en el conocimiento de la situación de electrificación rural con energía alternativa es el proyecto TECH4CDM que empezó en el año 2008, financiado por la Unión Europea, éste ha prestado especial atención a la superación de barreras de carácter tecnológico y analizado cómo los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) del Protocolo de Kyoto pueden favorecer los proyectos basados en las tecnologías eólica, cogeneración, solar térmica y electrificación rural con energías renovables en el Ecuador, poniendo en conocimiento, los marcos regulatorios vigentes y ciertas recomendaciones como (TECH4CDM, 2010):

“La tecnología renovable basada en sistemas aislados o mini redes es variada en términos de escala y de los servicios prestados, pero se pueden destacar una serie de importantes características comunes:

- Generación de energía “*in situ*”.
- Flexibilidad para adaptarse a diversas zonas geográficas.
- Optimización de la utilización de los recursos naturales.
- Fácil instalación y mantenimiento.
- Costes mínimos de instalación y mantenimiento: combustible gratuito.

- Respetuosa con el ambiente (reducción efecto invernadero). ”

Durante el desarrollo del presente trabajo de investigación, en lo referente a energía eólica, el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER), ha publicado el mapa eólico del Ecuador (Ministerio de Energía Renovable, 2013), instrumento muy valioso que permitirá determinar los sitios de interés para la generación de proyectos viables de electrificación. Sin embargo, antes de la aparición de este mapa eólico, ya se ha desarrollado, con estudios independientes, planes eólicos de electrificación como la construcción del parque eólico Villonaco, en la provincia de Loja, con una capacidad de generación de 16,5 MW; la instalación de tres aerogeneradores en la isla San Cristóbal, con una capacidad de 2,4 MW.

2.1.4. Proyectos eólicos en Ecuador a pequeña escala

En cuanto a la construcción de pequeños aerogeneradores en Ecuador, se ha encontrado un trabajo relevante (Torres, 1992) donde el autor de este documento plantea el diseño de un aerogenerador en las minas de Huascacha en la parroquia San Sebastián de Yúluc, en el Cantón Saraguro perteneciente a la provincia de Loja, partiendo de un dato de velocidad promedio de viento de 6.1 m/s para vivienda rural aislada. Acota que este dato de velocidad no fue evaluado por el autor, sino que se tomó de la Estación Meteorológica de la ESPOL con apenas 4 observaciones diarias, sin especificar la altura a la que se hizo dichas mediciones.

El modelo fabricado es de tres álabes de 4,4 m de diámetro que utiliza un alternador de automóvil por lo que es necesaria una caja multiplicadora para alcanzar una velocidad de sincronización de 1500 r.p.m.

Una de las conclusiones más importantes a la que llega el autor es que la fabricación de pequeños aerogeneradores no requiere de sofisticadas técnicas y está al alcance de países poco industrializados. Sólo se necesita que se generalice su utilización para que la producción en masa convierta esta opción en una realidad práctica y rentable.

Otros dos trabajos que merecen ser resaltados son los que fueron realizados en la Universidad Técnica de Cotopaxi que consisten en la fabricación de pequeños aerogeneradores con álabes de fibra de vidrio. En la primera investigación de esta universidad los autores fabricaron un pequeño aerogenerador para una vivienda de una zona rural: "... consiste en la construcción de un Generador Eólico de Bajas Revoluciones utilizando imanes permanentes para la captación de la energía del viento y convertirla en electricidad con la finalidad de abastecer de energía eléctrica a habitantes de zonas rurales aisladas de la provincia. La investigación inicio con el estudio del recurso viento en la zona de Pansachí el Morro, posteriormente se realizó el estudio de demanda eléctrica de una vivienda rural de la zona, la misma que sirvió como base para la realización de los cálculos del aerogenerador y la construcción del mismo." (Endara & Toctaguano, 2011)

El segundo trabajo se instaló en una escuela rural del cual se cita a continuación los aspectos más relevantes: "..., el generador comprende como parte principal el estator con 9 bobinas en conexión trifásica, el rotor está conformado por 12 imanes de neodimio N42, siendo la parte móvil conectada directamente por el eje con el soporte de las hélices, este aerogenerador no necesita de un arranque o un punto de excitación, es decir empieza a generar desde el primer movimiento que realice cada hélice con una medida de radio de 130 cm,... La energía producida se almacena en una batería pasando por un rectificador de corriente, la misma energía posteriormente es convertida de DC / AC mediante un inversor, luego pasa al punto de entrega, es decir las instalaciones de la Escuela Fiscal Mixta Portoviejo" (Molina & Pacheco, 2014)

2.2. Fundamentación teórica

En los apartados que se muestran a continuación, se sustenta la teoría relevante en cuanto a sistemas conversores de energía eólica de baja potencia para generación de electricidad, así como información relacionada al cumplimiento de los objetivos propuestos.

2.2.1. Consideraciones para el uso del viento con fines energéticos

El viento, que es aire en movimiento, tiene una masa aunque pequeña con relación al volumen que ocupa, es por esto que este fluido de tipo compresible está provisto de una densidad de masa específica baja, sin embargo, este factor no impide su utilización como fuente de energía.

El viento se genera por la diversa incidencia de la radiación solar tanto en la atmósfera superior como en la corteza de la tierra, es así como a diferente intensidad solar se producen diversas densidades de potencial de viento, ya que la densidad es una función directa de la variación de las temperaturas del cuerpo, que caracterizan a determinadas longitudes de onda que llegan a la tierra; luego un desigual calentamiento de la masa de aire circundante origina un efecto termosifón o de convección libre en el mismo, originándose de esta forma un mayor o menor movimiento del aire (viento) que conlleva a tener una diferente energía cinética que temporalmente se convierte en potencia (Villarrubia, Ingeniería de la energía Eólica, 2012).

Es conocida la aleatoriedad que presenta el comportamiento del viento ya que su potencial depende de factores que inciden directamente en la mayor intensidad que puede tener un lugar de acuerdo al recurso sol, esto es.

- La posición geográfica del lugar.
- El periodo u hora del día
- La estación o época del año.

En Ecuador, dado su posición astronómica-geográfica, se tiene diversidad de zonas con potenciales eólicos aunque sus distancias sean pequeñas.

Los sitios que presentan buenos potenciales de viento están ubicados en las estribaciones de las cordilleras andinas donde por su orografía típica, se tienen estrangulamientos naturales (Venturi) los que permiten fácilmente movimientos de aire acompañados de importantes velocidades (vientos de montaña). Gracias a

las cordilleras, es muy poco frecuente la aparición de tornados o huracanes, que impedirían la implementación de equipos eólicos.

Otros sitios de interés energético de viento son aquellos que circundan a masa importantes de agua (mares, lagos, ríos) que son acumuladores naturales de energía térmica proveniente del sol y continuamente están generando calor hacia el ambiente con los efectos conocidos de proporcionar movimiento de aire.

Estas dos propiedades geográficas marcadas con que cuenta el país, posibilitaría proyectar sistemas eólicos sobre tierra firme (costa y sierra) o en mar abierto (Villarrubia, Energía Eólica, 2004).

2.2.2. Evaluación de las necesidades energéticas

Para determinar la potencia necesaria para satisfacer los requerimientos específicos del usuario se debe determinar la potencia en watts de cada equipo, instrumento o luces que se deseen conectar.

Esto es fácilmente realizable observando la placa que cada equipo posee, donde se indica la potencia, tensión y otras características. Luego, debe estimarse cuantas horas por mes está encendido cada equipo, haciendo un promedio entre los meses de mayor y menor consumo. Multiplicando la potencia por tiempo, se tendrá aproximadamente la energía requerida.

2.2.3. Prospección eólica preliminar

Con la finalidad de conocer si un lugar es apropiado para un posible desarrollo de la energía eólica es necesario caracterizar el sitio en función de determinar la factibilidad de presencia del recurso viento con fines energéticos, es decir, saber si el lugar presenta condiciones para poder implantar sistemas conversores de energía eólica, desde los puntos de vista de desarrollo agrícola, social, de la conveniencia de instalación de sistemas alternos de energía que no pueden ser atendidos con el tendido eléctrico convencional.

La caracterización de zonas eólicas potenciales deben obedecer al estudio sistemático de (Santillán, 2006):

- Información general sobre el lugar.
- Patrón estacional del recurso viento.
- Predominio del recurso.
- Patrón diario del viento.
- Identificación preliminar del viento según escala de Beaufort.
- Evidencia ecológica

Con los datos anteriores recogidos mediante encuestas o entrevistas con los moradores del sitio en cuestión, se puede “*a priori*” cuantificar el potencial energético del lugar y se tendría una base aceptable de datos para una posterior instalación de estaciones de medición de velocidad y dirección predominante de viento, condiciones de la localidad, ya que sería improcedente instalar equipos de medición eólica sin el conocimiento de las condiciones energéticas del lugar, pues esto conllevaría a una mala utilización de recursos humanos, físicos, materiales y económicos.

2.2.4. Indicadores ecológicos

Existen indicadores ecológicos del viento, de los cuales los más notables son los que brinda la vegetación. Árboles y arbustos deformados por la acción del viento son registros extraordinariamente valiosos de la velocidad y de la dirección desde donde sopla el viento (Ponce, 1996).

Para evaluar la correspondencia del efecto del viento de acuerdo a su magnitud y la asimetría o grado de deformación que adopta el follaje de ciertas especies de arbustos y árboles por la acción mecánica del viento se aplica internacionalmente la escala de Griggs-Putnam, mostrada en la Figura 2.1.

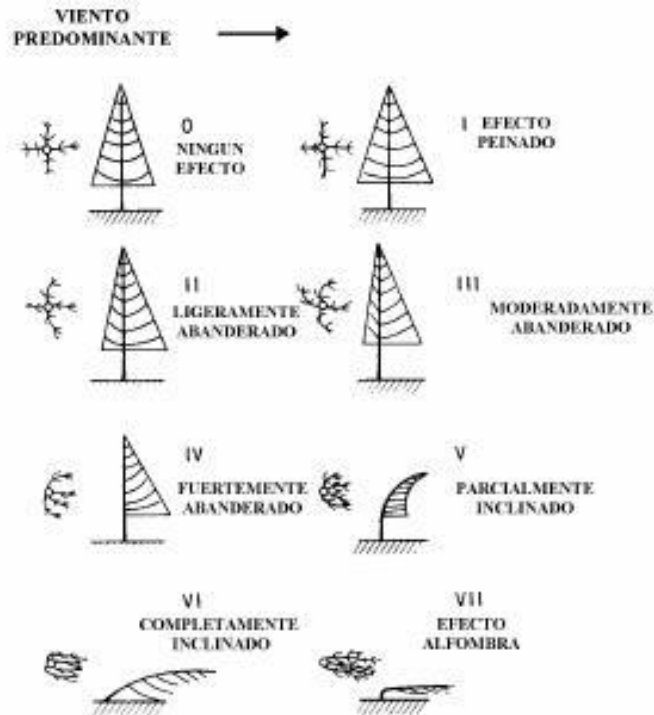


Figura 2. 1. Escala de Griggs-Putnam, para estimar la velocidad el viento a partir de la deformación del follaje de árboles y arbustos. Fuente: (Ponce, 1996)

2.2.5. La escala de Beaufort

En meteorología, se usa la escala de Beaufort, que va del 0 al 12, para la estimación subjetiva de la fuerza de los vientos a partir de sus efectos observables a simple vista, en tierra, en el mar abierto o en la costa. Los efectos observables del viento en tierra, establecidos por la escala Beaufort, se explican en el Anexo 2-A En este anexo se muestran los valores correspondientes de velocidad media $\langle v \rangle$ del viento a una altura de 10 metros.

En su forma actual, la escala Beaufort es reconocida por la Organización Meteorológica Mundial (WMO), y se extiende hasta el grado 17, estando dada la velocidad media del viento a una altura de 10 metros del suelo en función de la fuerza Beaufort del viento.

2.2.6. Normativa para la medición del viento

Para que un anemómetro, bien calibrado en túnel de viento, dé ciertas garantías de exactitud en las mediciones en campo, se deben tener en cuenta una serie de consideraciones que se describirán a continuación. Los instrumentos de medición (anemómetros, veletas, medidores de temperatura y presión atmosférica) se ubican en una torre anemométrica. Los instrumentos se montan sobre un brazo, o en la cima de la torre. La torre de medición deberá estar convenientemente señalizada para evitar accidentes. La figura 2.2, muestra un esquema de la torre anemométrica, con un anemómetro, veleta y los respectivos brazos que los sostienen.

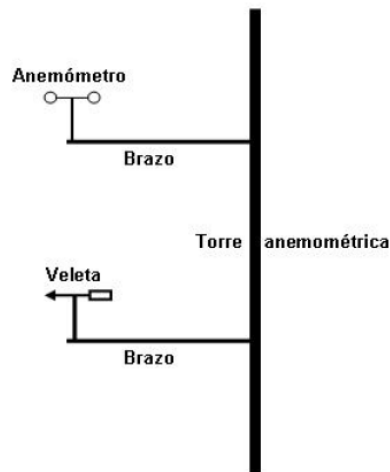


Figura 2. 2. Esquema de torre anemométrica, anemómetro, veleta y brazos.
Fuente: (Ammonit, 2000)

El equipo de medición debe entregar por lo menos los siguientes datos:

- Velocidad del viento, en m/s, un dato promedio cada 10 minutos. En terrenos de topografía no compleja, se recomienda medir en por lo menos dos alturas: un sensor entre 10 y 30 m, y otro entre 50 y 80 m. En terrenos complejos, se recomienda medir por lo menos en tres alturas: un sensor entre 10 y 25 m, otro entre 30 y 50 m, otro entre 60 y 80 m. Se podrá medir a otras alturas, justificando adecuadamente en cada caso.

- Puesto que es usual que los servicios meteorológico nacionales (INOCAR) mida velocidad de viento a 10 m sobre el suelo, se recomienda que el anemómetro más bajo se coloque a esta altura. Si se van a utilizar aquellos datos para extensión de series de datos mediante el método MCP. Si no es éste el caso, se podrá colocar a otras alturas, justificando adecuadamente.
- Desviación estándar de velocidad de viento, en m/s, un dato cada 10 minutos.
- Dirección del viento, un dato promedio cada 10 minutos, por lo menos en dos alturas: entre 1,5 y 5 m por debajo del anemómetro. Se realizará con una veleta, montada mediante un brazo a la torre meteorológica, respetando la distancia veleta – torre similar a la del anemómetro - torre. No es aconsejable instalar la veleta al mismo nivel que el anemómetro.
- Velocidad máxima y mínima del viento, del período medido.
- Máxima velocidad de ráfaga de 3 segundos de duración, en cada período de 10 minutos.
- Velocidad máxima y mínima del viento, en cada intervalo de diez minutos.
- Temperatura ambiente, en °C, un dato promedio cada 10 minutos, por lo menos en dos alturas, entre 1,5 y 8 m por debajo del anemómetro. Las mediciones deben ser confiables hasta la décima de °C, de tal forma que se puedan detectar diferencias de temperaturas en la altura.
- Presión atmosférica, en Pa; un dato promedio cada 10 minutos.
- La frecuencia de medición de velocidad y dirección del viento, se recomienda que sea de 1 muestra/segundo. La disponibilidad de los datos en el período de medición, debe ser mayor al 95 %.

El período mínimo de mediciones será de un año. Cuando se vaya a realizar extensión de la serie de datos en el tiempo mediante el método MCP (Medición, Correlación, Predicción), y siempre que se cuente con datos de otra estación de por lo menos un par de años para realizar la extensión, el período mínimo de medición será de 4 meses; es recomendable que la altura de anemómetro sea la misma que la de la estación de referencia.

La velocidad de viento que se mide, es el promedio de la componente horizontal, no la vertical. El anemómetro debe haber sido calibrado antes (entre el inicio de la medición y seis meses antes), y es deseable recalibrar después, de la campaña de medición.

2.2.7. Tratamiento estadístico de los datos de viento

La velocidad del viento es un fenómeno aleatorio, su intensidad es muy variable, de modo que es adecuada tratarla en forma estadística.

Una cantidad estadística de importancia es el promedio o media aritmética de la velocidad que si es evaluada sobre un lapso de tiempo considerable, sirve en primera instancia para definir el potencial eólico de un lugar.

Además de la media, interesa la variabilidad del conjunto de datos. Queremos encontrar la discrepancia o desviación de cada número respecto de las medias y obtener una especie de promedio de estas desviaciones.

Para analizar las propiedades de la serie temporal de viento es conveniente realizar una distribución estadística de la serie de la siguiente manera:

- Agrupar los datos en clases o categorías, determinando la frecuencia de clase, es decir el número de datos que pertenecen a cada clase. El número de clases N_c depende del número de datos N .
- Elaborar un histograma de frecuencias que permita calcular la ley de distribución de probabilidades.

Asimismo, en muchas ocasiones se representa la curva de frecuencias acumuladas (*menor o igual que*) o bien su complementaria F' (*mayor que*), la cual se obtiene por diferencia, $F' = 1 - F$.

Los métodos para tabulación o presentación de resultados que arroja un tratamiento estadístico de viento, se han generalizado en la actualidad y,

prácticamente en cualquier investigación de este tipo utiliza un formato como se muestra en la tabla 2.1. (Villarrubia, Energía Eólica, 2004).

Tabla 2. 1. Modelo tabular para procesamiento de datos de viento.

Intervalo de la clase	Centro de clase v_i (m/s)	Frec. Clase n_i (h/día)	Frec. Relativa $f_i=(n_i/N)$	f_i*v_i	$f_i*(v_i - v_{>})^2$
$\Sigma=$					

2.2.8. Distribución de Weibull

Además de esto, es importante disponer de una función que permita determinar la distribución de velocidades del viento a lo largo de un cierto periodo de tiempo (generalmente un año). Está comprobado que la velocidad de viento sigue de forma aproximada una densidad de probabilidad como la que se muestra en la figura 2.3 y que se ajusta de manera significativa a una función matemática llamada densidad de probabilidad de Weibull.

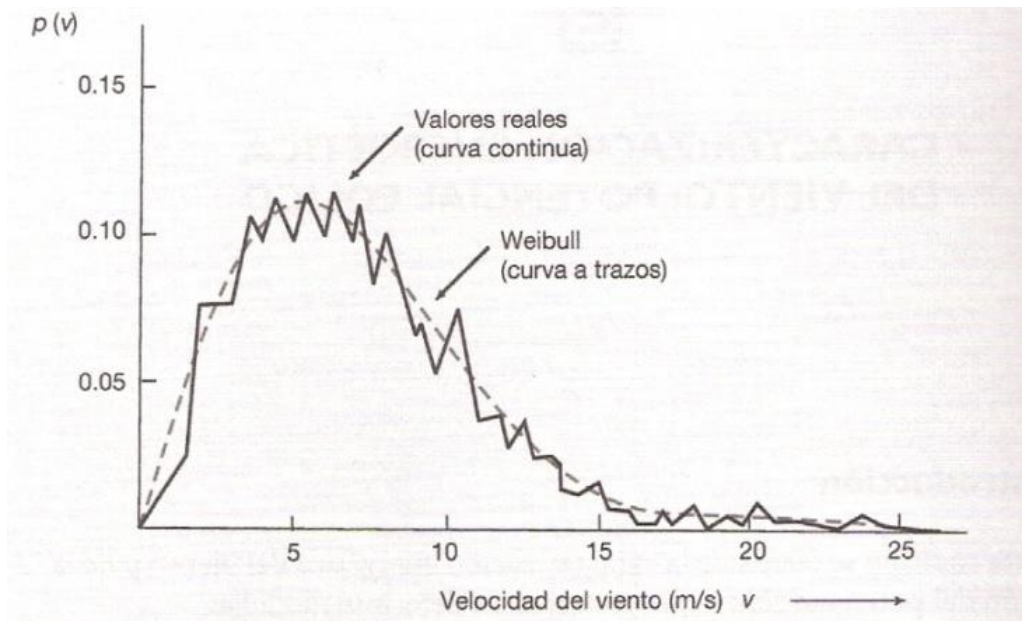


Figura 2. 3. Función densidad de probabilidad para la velocidad de viento a lo largo de un periodo de tiempo. Fuente: (Villarrubia, Energía Eólica, 2004)

2.2.9 .Turbulencia

La turbulencia se relaciona con los cambios bruscos, caóticos y desordenados de la velocidad y la dirección del viento asociados con el flujo de aire alrededor de obstáculos. Por tanto, en la selección del sitio de emplazamiento de aerogeneradores, un elemento a tener en cuenta es el nivel de turbulencia. El objetivo más importante en la selección del emplazamiento de un aerogenerador es maximizar la captación de energía, para reducir el costo de la electricidad producida y garantizar las mejores condiciones de explotación. Un emplazamiento óptimo debe presentar (Grupo de Trabajo para el Impulso de la Energía Eólica, 2006):

- Elevada velocidad media del viento.
- Buena exposición, sin obstáculos, al flujo de aire.
- Variaciones diurnas y estacionales moderadas de la velocidad del viento.
- Niveles aceptables de turbulencia y de vientos extremos.

Para mantener la turbulencia en niveles aceptables, se toman las medidas siguientes:

- Los aerogeneradores deben estar alejados de edificios, árboles, y otras obstrucciones como se muestra en la figura 2.4, que producen amplias zonas de turbulencia
- La torre del aerogenerador debe ser más alta que los obstáculos a su alrededor, o aprovechar alguna elevación del terreno para lograrlo.
- El rotor del aerogenerador debe quedar expuesto al viento en todas direcciones, sobre todo a los vientos predominantes.

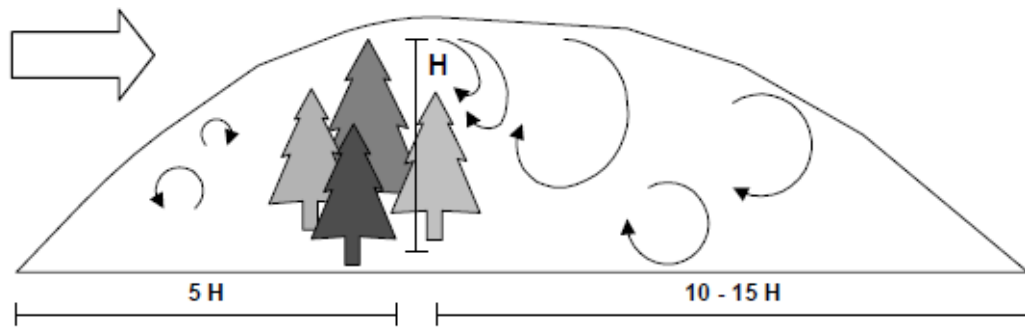


Figura 2. 4. Influencia de obstáculos en la medida de velocidad de viento. Fuente: (Villarrubia, Energía Eólica, 2004)

La intensidad de la turbulencia. La forma más común de expresar la turbulencia es mediante la magnitud denominada intensidad de la turbulencia, I , que es la relación entre la desviación estándar calculada y la velocidad promedio de viento.

La intensidad de la turbulencia del viento se encuentra normalmente entre 0.1 y 0.4. En general, la más alta intensidad de turbulencia ocurre cerca de la superficie terrestre, donde el viento está en contacto directo con las rugosidades del terreno.

Turbulencia y clases de aerogeneradores según la IEC. La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) define, en su norma IEC 61400-1 (International Electrotechnical Commission, 2008), cuatro clases de aerogeneradores, según su aptitud para resistir sin deterioro excesivo la acción mecánica de viento. Los aerogeneradores de la Clase I, son los más resistentes a la acción mecánica del viento, en tanto que los aerogeneradores de la Clase IV, son los menos resistentes.

Se supone que estas clases abarquen la mayoría de las condiciones de viento a que se someterán en la práctica los aerogeneradores, y por tanto sirven como referencia para diseñar aerogeneradores capaces de enfrentarlas sin sufrir fallos durante una vida útil de no menos de 20 años. Las condiciones de viento tolerables para los aerogeneradores según la norma IEC 61400-1 se presentan en la segunda y tercera filas de la Tabla 2.2.

Tabla 2. 2. Condiciones de viento tolerables para los aerogeneradores, según la norma IEC 61400-1.

Clase de aerogenerador		I	II	III	IV	S
v_{ref} (m/s)		50	42.5	37.5	30	A DEFINIR POR EL DISEÑADOR
v_{media} (m/s)		10	8.5	7.5	6	
Categoría A	I_{15}	0.18				
	a	2				
Categoría B	I_{15}	0.16				
	a	3				

Cada clase se caracteriza en primer término por dos parámetros:

- La velocidad de referencia, definida como la velocidad extrema del viento sostenida durante un período de 10 minutos que puede ocurrir estadísticamente cada 50 años.
- La velocidad media anual del viento.

Además, la norma IEC 61400-1 (International Electrotechnical Commission, 2008), establece que cada clase se presenta en dos categorías: A y B, según la intensidad de la turbulencia que puede soportar el aerogenerador. Los aerogeneradores de la categoría A pueden soportar una turbulencia mayor, en tanto que los de la categoría B pueden soportar una turbulencia menor.

La turbulencia tolerable para cada categoría de aerogeneradores se expresa por la intensidad de la turbulencia media anual I_{15} , definida a una velocidad media anual del viento igual a 15 m/s, a la altura del buje del aerogenerador.

La norma IEC 61400-1 establece que un aerogenerador de la categoría A tolera una intensidad de turbulencia I_{15} de hasta 0,18, mientras que un aerogenerador de la categoría B tolera una intensidad de turbulencia I_{15} de hasta 0,16.

2.2.10. Potencia eólica disponible: potencial eólico

La potencia eólica disponible es la máxima potencia que podríamos extraer al viento si pudiésemos convertir toda su energía cinética en energía útil. Así pues, la potencia disponible asociada al caudal de aire que atraviesa una sección es directamente proporcional al área expuesta al caudal, a la densidad del aire, y al cubo de la velocidad del viento. En la práctica, limitaciones de carácter técnico sólo permiten aprovechar, en el mejor de los casos, un 40% de la potencia eólica disponible (Bastanion, 1992).

Se define el potencial eólico disponible de un lugar como la potencia media eólica por unidad de superficie para un tiempo suficientemente largo (un año al menos), supuesta una densidad del aire constante.

2.2.11. Tecnología de aerogeneradores

Los aerogeneradores son dispositivos que convierten la energía del viento en energía eléctrica. Las instalaciones eólicas pueden ser clasificadas de diversas formas. En las siguientes secciones se mostrarán algunas de estas clasificaciones para describir los principales parámetros de las instalaciones eólicas.

2.2.12. Clasificación de las instalaciones eólicas

Aerogeneradores conectados a red a la red eléctrica.

En este tipo de configuración, la energía generada por el aerogenerador es volcada a la red eléctrica, por lo que éstos deben generar una corriente alterna a la frecuencia y tensión de red. En función de la potencia de estos, se tienen dos grandes divisiones (Universidad de Las Palmas, 2012):

- **De media y alta potencia:** son aerogeneradores que van desde potencias de varios kilovatios (kW) hasta los megavatios (MW), y la conexión a la red eléctrica implica que estos deben cumplir una serie de requisitos para poder conectarse a la red. Estos deben de ser capaces de responder

adecuadamente ante perturbaciones tales como huecos de tensión, cortocircuitos, etc. Para ello, los estados y las compañías eléctricas han realizado una reglamentación de conexión a la red eléctrica, en la que se detalla el comportamiento que deben tener los aerogeneradores que se van a conectar a su red ante las distintas perturbaciones.

Dada su considerable potencia pueden afectar a la estabilidad de la red eléctrica.

- **De pequeña potencia:** Son aerogeneradores que no suelen influir en la estabilidad de la red eléctrica.

Aerogeneradores aislados.

Son máquinas que no están conectados a la red eléctrica. Suelen alimentar a alguna vivienda aislada o a pequeños grupos de éstas, y suelen estar en lugares donde la infraestructura para llevar la energía eléctrica es muy costosa, o por decisiones de sostenibilidad. Generalmente se suelen combinar con otros tipos de energías renovables tales como la energía solar. Necesitan de algún medio de almacenamiento de energía como las baterías y de grupos electrógenos para casos de emergencia (Universidad de Las Palmas, 2012).

A pesar del rápido desarrollo que está teniendo lugar de los medianos y grandes aerogeneradores conectados a la red, los sistemas eólicos para generación de electricidad en áreas sin red eléctrica, descentralizados o aislados, no han experimentado un desarrollo tan acelerado. Es decir, la madurez tecnológica de los medianos y grandes aerogeneradores es más avanzada que la de los pequeños.

Existen varias razones que justifican tal situación, muchas de ellas polémicas: mercados menos atractivos, usuarios finales menos calificados para equipos de alta tecnología, los fabricantes son pequeñas empresas sin acceso a herramientas de diseño de última generación, e insuficientes programas de investigación-desarrollo.

En los últimos años se ha trabajado para disminuir los costos y aumentar la fiabilidad de estos pequeños aerogeneradores, lo que los ha convertido en máquinas insustituibles en aquellos sitios donde la red no alcanza y donde los vientos son evidentemente buenos.

En el pasado, el punto débil de los pequeños aerogeneradores era la fiabilidad. En los años setenta, estas máquinas se ganaron la fama de ser poco fiables, por presentar fallas frecuentes. Pero se ha avanzado técnicamente de forma tal que los modelos actuales son mucho más confiables desde el punto de aprovechamiento de energía.

La práctica ha demostrado que la mayoría de los pequeños aerogeneradores comerciales actuales pueden operar durante tres años o más, en sitios de ambiente agresivo, sin necesidad de mantenimiento ni inspección. La fiabilidad y los costos de operación y mantenimiento de estas máquinas son hoy día del mismo orden que los de las instalaciones fotovoltaicas.

En los sistemas aislados no es necesario controlar la frecuencia de la corriente cuando se le utiliza para rectificarla y cargar baterías de corriente directa. Cuando finalmente se necesita corriente alterna, ésta se obtiene por inversores, a partir de la corriente directa de las baterías.

Para instalar aerogeneradores pequeños en sistemas aislados no se necesitan estudios de viento, que sí resultan imprescindibles en el caso de los aerogeneradores conectados a la red. Exploraciones *in situ*, análisis de evidencias ecológicas y extrapolaciones desde estaciones de referencia cercanas son suficientes para la instalación de un pequeño sistema. Los estudios previos necesarios para determinar la ubicación de un parque eólico son mucho más altos que los costos totales de un pequeño sistema.

Clasificación según el número de álabes o palas

- **Turbinas de una pala.** La razón de una turbina eólica monopala es aumentar la velocidad de rotación del rotor y consiguientemente reducir las masas y costes de los demás elementos, como ser el multiplicador y el generador eléctrico. Por otro lado este tipo de hélices resultan muy atractivas económicamente por el costo mismo de poseer una sola pala. Sin embargo, estas hélices requieren un contrapeso que compense a la pala y el balanceo de la misma debe realizarse con mucha precisión. Además un rotor de este tipo tiene un desequilibrio aerodinámico muy acentuado, lo que causa complejos esfuerzos de fatiga y complicadas construcciones en el centro para controlar adecuadamente la turbina que las hacen poco prácticas. La desventaja principal para su uso comercial es el elevado nivel de ruido aerodinámico que producen, causado por una altísima velocidad en punta de pala
- **Turbinas de dos palas.** Comparándola con un rotor de tres palas, se logra disminuir en un cierto porcentaje el costo de la hélice; sin embargo debido los fluctuantes esfuerzos dinámicos que se originan con esta configuración se requieren dispositivos especiales para paliar este estado de carga, lo que eleva finalmente el costo global de la máquina no teniendo ventaja económica respecto a la primera, sumado a esto, ésta posee una componente no inercial oscilante durante el movimiento a lo largo del eje longitudinal de la torre (orientación) originada por la fuerza de Coriolis, lo que incrementa los esfuerzos sobre la estructura.

Por otro lado y compartiendo esta propiedad con las hélices monopala en alguna medida, poseen la posibilidad de fijarse al cubo del rotor mediante un dispositivo de oscilación, efecto denominado teetering, una especie de bisagra que permite compensar los esfuerzos que provoca la variación del perfil de velocidad del viento con la altura, lográndose un patrón de esfuerzos externos un poco más plano a lo largo del área barrida por la pala.

Asimismo se cuenta con la ventaja técnica para la fabricación de las palas, si la turbina es de poca potencia y su sistema de control es stall (palas de paso fijo), de poder hacerlas en un único bloque. Además los dispositivos encargados del control de la potencia captada, si se trata de un sistema pitch (palas de paso variable), se torna mucho más sencillo que en el caso de una hélice tripala.

En cuanto a las vibraciones, son mucho más sensibles a este fenómeno que las tripala y debido a las mayores velocidades en punta de pala con las que operan se eleva el nivel de ruido respecto a estas.

- **Turbinas de tres palas.** La característica fundamental de esta configuración es su mayor suavidad de funcionamiento respecto a las anteriores. Por otro lado, en las hélices de tres palas al ser sus velocidades de rotación relativamente bajas, los son también las de punta de pala, lo que constituye una gran ventaja respecto a las monopalas y bipalas debido a la reducción de nivel de ruido que esto conlleva. Esta propiedad se ve potenciada en el caso de que la turbina se utilice para abastecimiento eléctrico de puntos aislados, donde generalmente la máquina se debe emplazar en las cercanías de la población y donde se debe minimizar la perturbación introducida en el hábitat natural (Díez, 1993).

2.2.13. Elementos de una instalación eólica de pequeña potencia

Las partes constitutivas de un micro aerogenerador se muestra en la figura 2.5 y se describe a continuación:

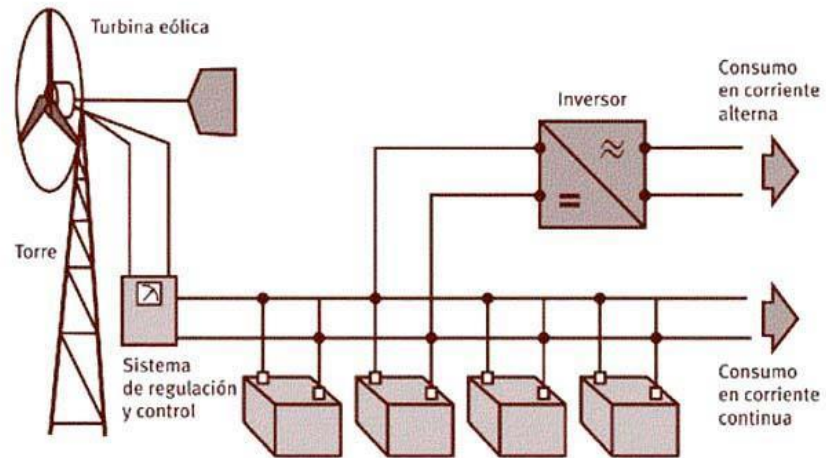


Figura 2. 5. Partes constitutivas de una instalación eólica de pequeña potencia.
Fuente: (Serrano, 2011)

La turbina eólica o Rotor.

También llamado rotor, es el elemento encargado de captar la energía cinética del aire y transformarla en energía eléctrica mediante el generador que se encuentra en el cuerpo de aerogenerador. El aerogenerador puede ser de eje vertical o de eje horizontal.

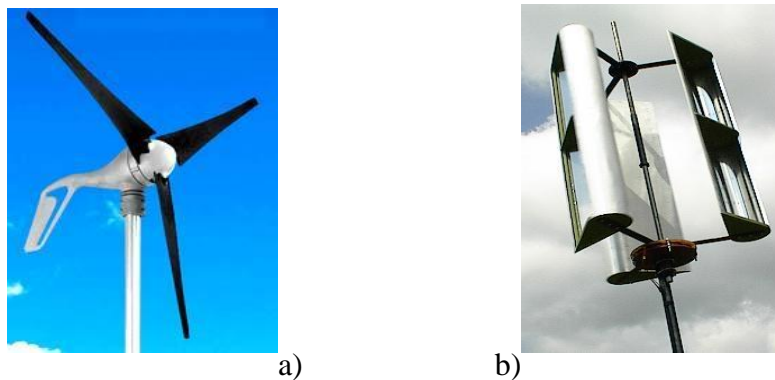


Figura 2. 6. a) Rotores de eje horizontal b) vertical. Fuente: (Serrano, 2011)

Los **aerogeneradores de eje horizontal** (figura 2.6 a) también llamados HAWTs, (horizontal axis wind turbines), son aquellos en los que el eje de rotación del equipo se encuentra paralelo al piso. Ésta es la tecnología que se ha impuesto, por su eficiencia y confiabilidad y la capacidad de adaptarse a diferentes potencias. A diferencia de los de eje vertical, hacen un mayor aprovechamiento de la potencia del viento, pero necesitan un mecanismo de orientación para hacer frente a los cambios bruscos en la dirección del viento.

Los **aerogeneradores de eje vertical** VAWT (figura 2.6. b) (vertical axis wind turbine) son aquellos en los que el eje de rotación del equipo se encuentra perpendicular al suelo. Tienen la ventaja de adaptarse a cualquier dirección de viento y por ello se les llama penémonos (todos los vientos). No precisan dispositivos de orientación; trabajan por la diferencia de coeficiente de arrastre entre las dos mitades de la sección expuesta al viento. Dentro de esta gama de aerogeneradores podemos encontrar los modelos Savonius, Darrieus, Darrieus tipo H o Giromill.

En general, a excepción del rotor Darrieus, los aerogeneradores de eje vertical operan con vientos de baja velocidad donde difícilmente superan las 200 rpm.

Dado que la potencia eléctrica que genera los aerogeneradores varía con la intensidad y la velocidad del aire, las instalaciones aisladas no conectadas a red deben contar con un sistema de baterías acumuladoras de energía.

Sistema de orientación y control de frenado

Sistema de orientación.- Uno de los principales problemas en pequeños sistemas conversores de energía eólica es la necesidad de estar orientado de forma que el viento incida perpendicularmente al rotor para lograr la máxima potencia a base de hacer incidir la mayor cantidad posible de masa de aire en movimiento y así obtener la mayor cantidad posible de energía cinética; con este fin existen diversos sistemas que permiten la orientación de la máquina, como:

- Una cola o veleta que es un método muy eficaz sobre todo en máquinas pequeñas, como se muestra en la figura 2.7.
- Un sistema de orientación accionado por rotores auxiliares Un servomotor controlado electrónicamente
- Un sistema de orientación por efecto de la conicidad que se da a las palas en su disposición y montaje sobre el cubo del rotor.

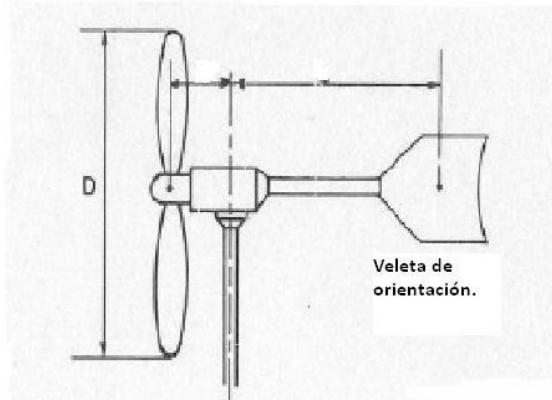


Figura 2. 7. Orientación por veleta. Fuente: (Díez, 1993)

Las **veletas o timones** son dispositivos de orientación situados en la prolongación del eje del rotor y tienen por misión orientar la aeroturbina en la dirección del viento. Están constituidas por una superficie plana metálica o de madera, sobre la que el viento ejerce una presión en el momento en que no están orientadas paralelamente en la dirección del mismo, provocando un par de giro que orienta la máquina.

Sistemas de regulación.- Los dispositivos de regulación y control de potencia utilizados en aerogeneradores se pueden clasificar en dos tipos: activos y pasivos. Los activos actúan directamente en la variación del paso de las palas y requieren de mecanismos auxiliares de mayor costo, por lo que se ajustan mejor a grandes aerogeneradores. Los pasivos actúan de manera indirecta sacando a la turbina fuera del frente de viento en sobrevelocidades, utilizando mecanismos diversos que se distinguen entre ellos en su rendimiento, costos, calidad de regulación y

estabilidad; su utilización se adopta mejor a pequeños aerogeneradores. (Díez, 1993)

Cuando una máquina está sometida a una determinada velocidad del viento, comienza a girar; dicha velocidad es la velocidad de conexión, pero su giro es lento y la máquina está lejos de generar su máxima potencia.

A medida que la velocidad del viento aumenta el rotor gira más deprisa y la potencia que produce también aumenta; a una determinada velocidad (nominal), el rotor gira a las revoluciones precisas para que la máquina proporcione su potencia nominal y a partir de este momento, aunque aumente la velocidad del viento, no interesa que la velocidad de giro aumente, por lo que hay que actuar sobre ella regulando su velocidad.

Si la velocidad del viento sigue aumentando, el rotor puede peligrar desde el punto de vista estructural siendo muy importante disminuir las vibraciones; por eso, cuando esta velocidad aumenta mucho, el rotor se tiene que frenar.

Generadores

Según (Abarzúa, 2012): “Los generadores sincrónicos, son máquinas de corriente alterna que se caracterizan por tener una velocidad del eje, dependiente directamente con la frecuencia de las variables eléctricas pueden ser monofásicas o polifásicas (preferentemente trifásicas en aplicaciones de potencia). Son los más ocupados en generación eólica, seguidos de los generadores asíncronos. Ocupan normalmente un multiplicador para ajustar la velocidad de la hélice a un valor adecuado para el generador.

El autor también acota que: “A partir del giro del rotor, se hace girar un enrollado alimentado con corriente continua, o bien a un conjunto de imanes permanentes. Al girar éstos frente a las bobinas de estator, por el interior de éstas pasa un flujo magnético variable en el tiempo. Esto genera un voltaje inducido alterno en las bobinas de estator.” (Abarzúa, 2012)

Las baterías o acumuladores.

Todo sistema de energía autónomo requiere de baterías para almacenar la energía producida por la turbina eólica, siendo su función la de almacenar la energía producida por el aerogenerador así como suministrar la energía acumulada a la carga (consumidor) si éste trabaja con corriente directa.

Los tipos de baterías más comunes son los de plomo ácido (similares a las baterías de coche) las cuales están compuestas por placas de plomo sumergidas en una solución de ácido sulfúrico con agua. Caracterizándose por presentar una alta tolerancia a la carga continua y a las bajas pérdidas por descarga. Son además relativamente baratas. Se caracterizan por:

- Capacidad en amperios-horas, Ah
- Eficiencia de carga.
- Auto descarga.
- Profundidad de descarga.

Se suele elegir la capacidad nominal de la batería, de tal forma, que proporcione entre tres y ocho veces la energía consumida por la carga durante un día o ciclo de utilización.

El regulador de carga.

Son elementos electrónicos que controlan el proceso de carga de los acumuladores desde el generador eólico. También pueden controlar la descarga si existen consumidores eléctricos en corriente continua. Su función básica es la de controlar que no se sobrecarguen las baterías ni se descarguen profundamente, avisando de ello mediante una alarma ya sea de forma acústica o visual.

El Inversor.

En las instalaciones eólicas aisladas la electricidad que proporciona la batería es en corriente continua, la cual no siempre coincide con la carga de los

consumidores. Así pues es necesario conectar un inversor de corriente que transforma la energía continua de los acumuladores en energía alterna de 120v a 60 Hz.

Principales tipos de inversores:

Inversores de onda senoidal pura: este tipo de inversor se utiliza principalmente para alimentar equipos electrónicos sensibles, ya que dispone de una salida de onda senoidal pura.

Inversores de onda senoidal modificada: en este tipo de inversor la calidad de la onda senoidal no es tan elevada, la onda dibuja una forma escalonada, a medio camino entre la onda cuadrada y la senoidal, por lo que presenta elevados contenidos de armónicos, lo que puede generar ruidos en equipos de radios, porteros electrónicos, equipos de música, etc. Las principales características vienen determinadas por la tensión de entrada del inversor, que se debe adaptar a la del sistema, y por la potencia máxima que puede proporcionar la forma de onda en la salida (sinusoidal pura o modificada), etc. La eficiencia de un inversor no es constante y depende del régimen de carga al que esté sometido. Para regímenes de carga próximos a la potencia nominal, la eficiencia es mayor que para regímenes de carga bajos.

2.2.14. Principios de aerodinámica de perfiles alares

Un perfil aerodinámico es la forma de un ala o pala (de una hélice, un rotor o turbina) o vela como se observa en sección transversal. Un cuerpo con forma de perfil aerodinámico movido a través de un fluido produce una fuerza aerodinámica. La componente de esta fuerza perpendicular a la dirección del movimiento se llama elevación. El componente paralelo a la dirección de movimiento se denomina arrastre (Bazán, 2013).

La forma típica de un perfil aerodinámico es la que se muestra en la figura 2.8. Si bien existe una gran variedad de diseños, la geometría básica es generalmente la

misma: un borde anterior, respecto a la corriente de aire que enfrenta, redondeado llamado «borde de ataque» y un borde posterior agudo llamado «borde de fuga». El término «cuerda del perfil» se utiliza para el lugar geométrico de la recta que pasa por los puntos mencionados anteriormente.

Ubicando el perfil horizontalmente respecto a su cuerda, se denomina «extradós» o «cara de succión» a la envolvente superior convexa del mismo e «intradós» o «cara de presión» a la inferior, que en general es cóncava (Figura 2.9).

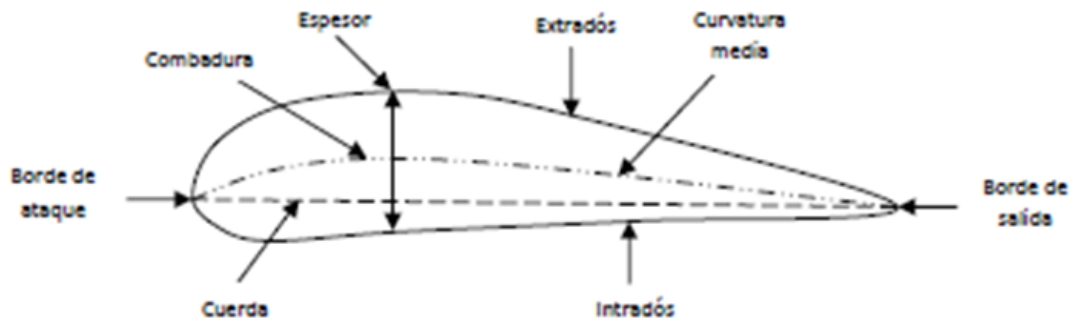


Figura 2. 8. Geometría de un perfil aerodinámico. Fuente: (Santillán, 2006)

Cuando un perfil de estas características, con una asimetría respecto a su cuerda, se enfrenta a una corriente de aire y circula a través de ella, ésta última experimenta una aceleración mayor sobre el extradós que en el intradós generándose, de acuerdo a la ecuación general de la energía de un fluido o en su forma reducida a la ecuación de Bernoulli, una baja presión sobre el primero y una alta respecto a la corriente libre de aire sobre el segundo como se muestra en la figura 2.8.

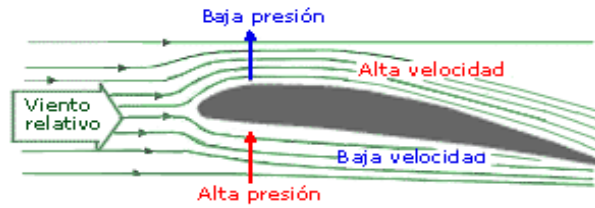


Figura 2. 9. Variación de presión en perfiles aerodinámicos. Fuente: (Bazán, 2013)

Integrando las presiones ejercidas sobre el perfil tenemos como resultado una fuerza de presión. Esta se sumará vectorialmente a la fuerza surgida del efecto de la viscosidad del aire sobre el material de la aeroforma, es decir, la fuerza originada por el rozamiento de sus partículas sobre la superficie del perfil, para obtener finalmente una fuerza resultante o acción aerodinámica total.

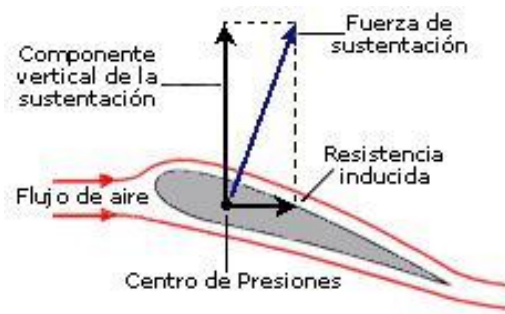


Figura 2. 10. Fuerza que actúan sobre el álabe. Fuente: (Segurado, 2003)

La resultante de ambas fuerzas puede separarse en sus componentes normal y paralela como indica la figura 2.9 a la dirección de la velocidad V de la corriente libre. La componente normal se denomina sustentación y la paralela, se denomina resistencia.

Estas componentes de fuerza están afectadas por coeficientes que dependen de la forma del perfil y que se los determina sometiendo a éste a la acción de un cierto valor de velocidad en túneles de viento y mediante un mecanismo no complicado se puede determinar los valores adimensionales de los coeficientes para diversos

ángulos de ataque o incidencia del viento. Estos coeficientes se denominan de sustentación y de arrastre o resistencia.

El coeficiente C_L aumenta con el incremento del ángulo de ataque pero solo hasta un cierto valor, que cuando es superado, la fuerza de sustentación cae bruscamente a valores cercanos a cero. Este fenómeno se debe esencialmente a la progresiva atenuación de la vena del fluido como estrato o capa límite.

Cuando la capa límite del perfil pierde contacto con éste no se tiene más un régimen laminar en el flujo del aire, apareciendo turbulencias en el borde de salida, este fenómeno se denomina desprendimiento de la capa límite y se muestra en la figura 2.11.

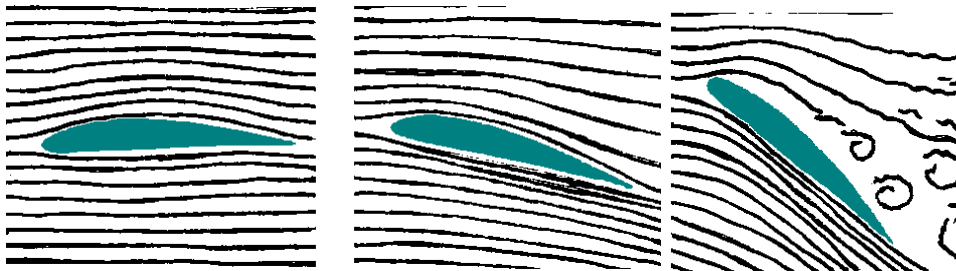


Figura 2. 11. Desprendimiento de la capa límite. Fuente: (Segurado, 2003)

En las palas de un rotor eólico, la entrada en pérdida no supone ningún problema, e incluso puede ser positivo para evitar una aceleración excesiva cuando la velocidad del viento es muy elevada.

Para cada perfil aerodinámico probado en el túnel de viento, se determina la variación que existe entre los coeficientes C_D , C_L , y ángulo de ataque α en gráficas denominadas diagramas polares, que permiten encontrar los valores adimensionales de diversos perfiles. La manera óptima de encontrar los valores óptimos de C_D , C_L , del diagrama polar se realiza de la siguiente manera:

En el esquema $C_D - C_L$ (derecha) partiendo del origen (punto 0), se traza una tangente a la curva, cuyo punto indica que la relación C_D/C_L es mínima.

Si se proyecta en forma paralela a las abscisas y cortamos la curva de α , se encuentra el ángulo de ataque óptimo para el diseño.

La relación C_D/C_L proporciona el máximo coeficiente de potencia del perfil.

La velocidad periférica del perfil (u) es función directa de la variación del radio del mismo, por lo que la relación u/v es variable a lo largo del álabe. Esta variación produce también un cambio en el valor del ángulo de ataque α , razón por la cual la sustentación no se mantiene. Para poder solucionar este inconveniente, los álabes necesitan de un ángulo de curvatura variable (ángulo de calaje o curvatura β).

Si queremos que cada segmento trabaje con un ángulo de ataque óptimo que haga máxima la fuerza motriz, tendremos que diseñar la pala con diferente ángulo en cada segmento, para compensar la variación en el ángulo de incidencia de la corriente. Esto es la causa de que frecuentemente las palas se construya con torsión.

La fuerza de sustentación F_L tiene por definición una dirección perpendicular a la dirección de la velocidad relativa del viento, mientras la fuerza de arrastre permanece en dirección paralela a la velocidad relativa del viento. Esto se muestra en la figura 2.10.

2.2.15. Perfiles alares utilizados en energía eólica

Las máquinas eólicas están por su naturaleza, expuestas a un sinnúmero de condiciones atmosféricas o periodos de tiempo, como lluvia, nieve, arena, insolación, etc.

Los perfiles extremadamente sofisticados ofrecen coeficientes de sustentación elevados pero se necesita gran precisión en la construcción y las tolerancias deben ser observadas estrictamente. Razones de carácter estructural obligan a utilizar perfiles con espesores suficientemente elevados, mientras aquellos sofisticados presentan por lo regular pequeños espesores.

Es conveniente entonces seleccionar perfiles que garanticen un buen rendimiento, fácil geometría que no aumenten en demasía errores de construcción.

En general, los tipos de perfiles utilizados en las máquinas eólicas rápidas son de la serie NACA (National Advisory Committee of Aeronautics), y vienen determinados por un conjunto de cifras que definen su geometría. (Santillán, 2006)

Un perfil NACA viene definido por 4 o 5 dígitos (NACA XXXX, NACA XXXXX). En la serie de 4 dígitos estos tienen el siguiente significado:

- **Primer dígito** describe curvatura máxima como porcentaje de la cuerda (% c).
- **Segundo dígito** se refiere a la distancia de máxima curvatura desde el borde de ataque en 1/10 del porcentaje de la cuerda.
- **Dos últimos dígitos** indican el máximo espesor como % de la cuerda.

La serie NACA de 5 dígitos describe perfiles mucho más complejos:

La primera cifra indica el valor del coeficiente de sustentación ideal de la curvatura del perfil multiplicado por 20 y dividido por 3. Las dos siguientes indican el doble de la posición de la máxima flecha de la línea media (curvatura) en % de la cuerda. Las dos últimas cifras corresponden al máximo espesor como porcentaje de cuerda. (Igual que el perfil NACA-Cuatro cifras.) La curvatura se obtiene mediante una parábola cubica empalmada a una línea recta que llega hasta el borde de salida.

2.3. Marco legal

El desarrollo de este proyecto estará basado en las siguientes normativas legales:

Regulación No. CONELEC – 004/11

El Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC) es el encargado de la regulación del sector eléctrico ecuatoriano, de forma que se cumpla las

disposiciones reglamentarias, legales y técnicas de electrificación del país, siguiendo la política energética nacional.

En el Ecuador se aplica la política pública a precios preferentes en utilización de fuentes renovables no convencionales para producción de electricidad, dicha promoción se establece mediante la Regulación No. CONELEC – 004/11 (aprobada desde el 14 de abril de 2011 y codificada el 12 de enero de 2012), que tiene como objetivo el establecimiento de precios, periodo de vigencia y forma de despacho de energía, por los generadores que utilicen fuentes renovables no convencionales y comprenden las siguientes: eólica, biomasa, fotovoltaica, geotermia, corrientes marinas y centrales hidroeléctricas de hasta 50 MW de capacidad instalada (CONELEC, Plan Maestro de electrificación 2009-2020, 2009).

Los precios a reconocerse por la energía medida en el punto de entrega son los indicados en la tabla 2.3.

Tabla 2. 3. Precios de kW.h generados con energías renovables no Convencionales.
Fuente: (CONELEC, Plan Maestro de electrificación 2009-2020, 2009)

CENTRALES	TERRITORIO CONTINENTAL	TERRITORIO INSULAR DE GALÁPAGOS
EÓLICAS	9.13	10.04
FOTOVOLTAICAS	40.03	44.03
SOLAR TERMOELÉCTRICA	31.02	34.12
CORRIENTES MARINAS	44.77	49.25
BIOMASA Y BIOGÁS < 5 MW	11.05	12.16
BIOMASA y BIOGÁS > 5 MW	9.60	10.56
GEOTÉRMICAS	13.21	14.53

Regulación No. 001/13

Durante la vigencia de la Regulación No. 004/11, se dio una gran participación de generadores fotovoltaicos, por lo que la nueva regulación No. 001/13 busca priorizar la participación de las otras tecnologías renovables, y ha puesto en

marcha la política “La participación de los generadores de energía eléctrica producida con Recursos Energéticos Renovables no Convencionales”.

La nueva regulación tiene un periodo de vigencia de 15 años. Se contabilizará a partir de la suscripción del título habilitante o registro, cuyo límite es hasta el 31 de diciembre de 2016 y cuenta con precios a reconocerse, que son detallados en la tabla 2.4.

Tabla 2. 4. Precios de kW.h generados con energías renovables no Convencionales.
Regulación 001/13

Fuente: (CONELEC, REGULACIÓN No. CONELEC – 001/13, 2014)

CENTRALES	TERRITORIO CONTINENTAL	TERRITORIO INSULAR DE GALÁPAGOS
<i>EÓLICAS</i>	<i>11.74</i>	<i>12.91</i>
<i>SOLAR TERMOELÉCTRICA</i>	<i>25.77</i>	<i>28.34</i>
<i>CORRIENTES MARINAS</i>	<i>32.43</i>	<i>35.67</i>
<i>BIOMASA Y BIOGÁS</i>	<i>11.08</i>	<i>12.19</i>
<i>GEOTÉRMICAS</i>	<i>13.81</i>	<i>15.19</i>

Normativa para medición de viento y evaluación de potencial eólico

IEC - 61400

La normativa IEC - 61400 es la que se ha venido usando en el país en pequeños proyectos de energía eólica y que establece algunas pautas para medición de velocidad de viento, potencial eólico y diseño de pequeños aerogeneradores.

2.4. Definición de términos

Aerogenerador: Un aerogenerador es un generador eléctrico movido por una turbina (rotor) accionada por el viento (turbina eólica) (Wind Power, 2005).

Anemómetro: Aparato para medir la fuerza del viento. Los más modernos también indican la dirección del mismo, con referencia al rumbo. Cuando el aparato es registrador se denomina “anemógrafo” (Wind Power, 2005).

Distribución de densidad de probabilidad de Weibull: Función matemática utilizada en energía eólica para caracterizar estadísticamente el comportamiento de la velocidad del viento en un cierto lugar (Villarrubia, Energía Eólica, 2004).

Energía eólica: Energía eólica es la energía obtenida del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es transformada en otras formas útiles de energía (Wind Power, 2005).

Escala de Beaufort: Medida empírica para la intensidad del viento, basada principalmente en el estado del mar, de sus olas y la fuerza del viento. Su nombre completo es Escala de Beaufort de la Fuerza de los Vientos (Grupo de Trabajo para el Impulso de la Energía Eólica, 2006).

Límite de Betz: Máxima potencia, proveniente del viento, que puede captar el rotor de un aerogenerador ideal. Este valor es del 59,25 % (Villarrubia, Energía Eólica, 2004).

Potencial Eólico: Cantidad disponible de potencia por unidad de superficie que presenta un cierto lugar. (Segurado, 2003)

Prospección eólica preliminar: Metodología cualitativa utilizada con el fin de determinar las prestaciones de potencial eólico de un cierto lugar (Santillán, 2006)

Rosa de vientos: Representación gráfica polar que sirve para definir las direcciones predominantes de los vientos (Díez, 1993).

Sistemas Conversores de energía eólica: Máquinas diseñadas con el propósito de captar la energía cinética del viento y transformarla en energía útil, por ejemplo para obtener electricidad (Díez, 1993).

2.5. Conclusiones del capítulo

Se ha visto que la situación de la energía eólica en Ecuador ha avanzado gracias a las políticas que están siendo promovidas por el estado. Si bien es cierto que el desarrollo en electrificación rural con pequeños sistemas conversores de energía

eólica aún está en sus primeras etapas, no cabe duda que ya se tiene sólidas bases para dar prioridad a dichos proyectos.

Se ha abordado también los aspectos regulatorios que norman el uso de la energía eólica en el país siendo un dato de bastante relevancia el hecho de que se pueda aplicar proyectos de mini eólica para electrificación rural sobre una base presupuestaria establecida en la ley (1 350 USD/vivienda), que puede incentivar la culminación de proyectos de este tipo que han estado por años olvidados en las bodegas de nuestras universidades, así como también estimular la inversión de capital privado y sobre todo con tecnología nacional.

Se ha investigado también la fundamentación teórica necesaria para la elaboración del presente documento en lo que respecta a la evaluación de potencial eólico y criterios para la caracterización de pequeños sistemas conversores de energía eólica.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

En el capítulo presente se aborda la metodología, el diseño, la modalidad, tipo y nivel de investigación, la población y muestra, los métodos y técnicas que se utilizaron, la operacionalización de las variables y el procedimiento de la investigación.

3.1. Diseño de la investigación

El desarrollo de la presente investigación está basado en una metodología no experimental, a través de un estudio descriptivo - correlacional, ya que no modificamos el objeto de estudio, no intervenimos directamente sobre las variables, simplemente registramos sus medidas en la aplicación de aspectos tecnológicos a situaciones puntuales de demanda de energía en zonas rurales marginales de serranía ecuatoriana.

3.2. Modalidad de investigación

La presente investigación se realizará según las siguientes modalidades:

- De campo.- debido a que se requiere información *in situ* de las características estacionales y evidencia biológica para determinar la presencia de energía eólica.
- Bibliográfica.- La investigación estará sustentada básicamente en la recolección de información acerca de aspectos tecnológicos sobre equipos, dispositivos, sensores, etc. a utilizarse en sistemas conversores de energía eólica, así como metodología o protocolos para el levantamiento de potencial de energía.
- De Gabinete. Debido a que la información recolectada requiere un procesamiento, análisis y discusión de los resultados.

3.3. Tipo de investigación

En lo que se refiere al tipo de investigación, ésta tendrá el siguiente carácter:

- Exploratoria.- Se explorará el problema a fin de desarrollar una base de investigación acerca de la tecnología apropiada para mejorar la calidad de vida de la población involucrada mediante el uso de energía eólica.
- Bibliográfica.- Mediante la consulta bibliográfica se pretende identificar la problemática energética y de calidad de vida de la población rural marginal que habita en la parroquia García Moreno, para identificar el número de habitantes que viven en estas condiciones.
- Explicativa.- Luego de confrontar las variables y analizando la hipótesis se dará una explicación clara y precisa de todos los resultados, para lograr el máximo entendimiento del lector.

3.4. Población y muestra

La Parroquia García Moreno forma parte del Cantón Pelileo de la Provincia de Tungurahua con una población de 6 380 habitantes, todos ellos ubicados en el sector rural como se muestra en la tabla 3.1. Los límites de la parroquia se indican en la figura 3.1.

Tabla 3. 1. Población del Cantón Pelileo Fuente: (INEC, 2011)

CANTON	PARROQUIA	URBANO	RURAL	Total
SAN PEDRO DE PELILEO	BENITEZ (PACHANLICA)	-	2,183	2,183
SAN PEDRO DE PELILEO	BOLIVAR	-	2,713	2,713
SAN PEDRO DE PELILEO	CHIQUICHA	-	2,445	2,445
SAN PEDRO DE PELILEO	COTALO	-	1,852	1,852
SAN PEDRO DE PELILEO	EL ROSARIO (RUMICHACA)	-	2,638	2,638
SAN PEDRO DE PELILEO	GARCIA MORENO (CHUMAQUI)	-	6,380	6,380
SAN PEDRO DE PELILEO	GUAMBALO (HUAMBALO)	-	7,862	7,862
SAN PEDRO DE PELILEO	PELILEO	10,103	14,511	24,614
SAN PEDRO DE PELILEO	SALASACA	-	5,886	5,886
SAN PEDRO DE PELILEO	Total	10,103	46,470	56,573

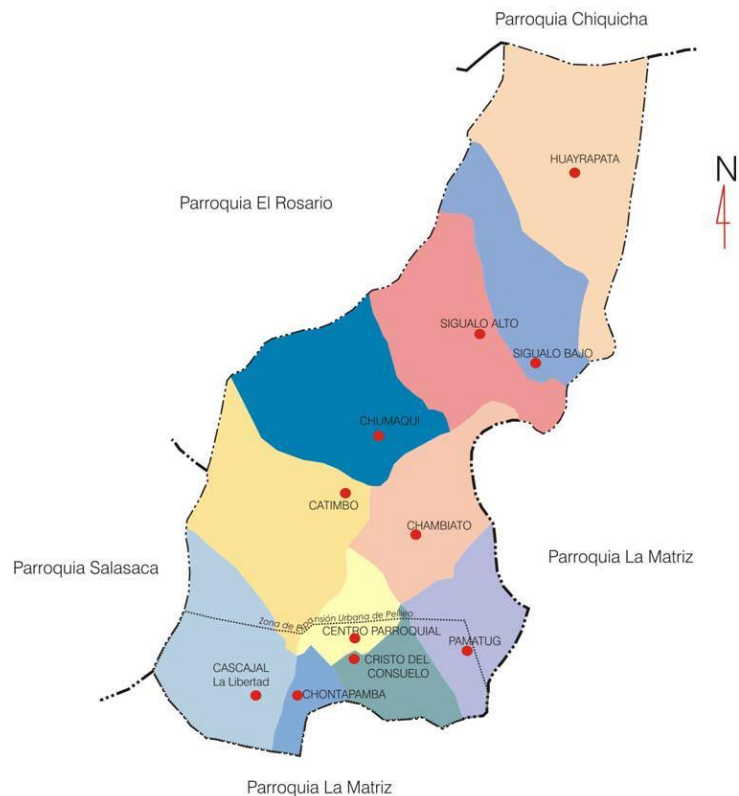


Figura 3. 1. Mapa parroquia García Moreno. Fuente: (Proaño & Toala, 2009)

La ubicación geográfica de García Moreno es:

- Altitud geográfica: 2580 m.s.n.m.
- Posición geográfica:
 - Latitud: - 1°19'0" N
 - Longitud: 78°31'60" E
- Temperatura promedio 14-18 °C.
- Presión barométrica: 5558.9 mmHg

La parroquia García Moreno se localiza al norte del cantón, tiene una extensión de 15,4 km².

Limita:

- Al norte: la parroquia Chiquicha,
- Al sur: la parroquia La Matriz (Pelileo)
- Al este: la parroquia La Matriz (Pelileo)
- Al oeste: las parroquias El Rosario y Salasaca.

Para la evaluación del potencial eólico, se ha realizado primero una prospección eólica preliminar con el fin de obtener parámetros cualitativos que nos permitan estimar a grosso modo la pertinencia o no de ubicar sistemas conversores de energía eólica en el sector. Estos parámetros se refieren especialmente al comportamiento diario y estacional del viento, así como evidencia biológica imperante.

Esto se lo ha hecho mediante la aplicación de una encuesta (Anexo 3-A) a un segmento representativo de la población de García Moreno, concretamente en el barrio La Libertad por ser el sector que presenta a primera vista mejores perspectivas para la implementación de sistemas conversores de energía eólica, siendo las preguntas 5, 6 y 7, las que aportarán información relevante en cuanto al comportamiento diario y estacional del viento.

De la población total de García Moreno se ha tomado una muestra representativa para la aplicación de la encuesta.

Para calcular el tamaño de la muestra suele utilizarse la siguiente fórmula (Canavos, 1988):

$$n = \frac{N\sigma^2 Z^2}{(N-1)e^2 + \sigma^2 Z^2} \quad (3.1)$$

Dónde:

n = Tamaño de la muestra.

N = Tamaño de la población.

σ =Desviación estándar de la población que, generalmente cuando no se tiene su valor, suele utilizarse un valor constante de 0,5.

Z = Valor obtenido mediante niveles de confianza. Es un valor constante que, si no se tiene su valor, se lo toma en relación al 95 % de confianza equivale a 1,96 (como más usual) o en relación al 99 % de confianza equivale 2,58, valor que queda a criterio del investigador.

e = Límite aceptable de error muestral que, generalmente cuando no se tiene su valor, suele utilizarse un valor que varía entre el 1% (0,01) y 9% (0,09), valor que queda a criterio del encuestador.

Para nuestro caso se ha tomado el 91% de confianza y nos da un valor de nivel de confianza de 1,69

Tabla 3. 2. Valores para el cálculo del tamaño de una muestra por niveles de confianza. (Canavos, 1988)

Certeza	95%	94%	93%	92%	91%	90%	80%	62.27%	50%
Z	1.96	1.88	1.81	1.75	1.69	1.65	1.28	1	0.6745
Z ²	3.84	3.53	3.28	3.06	2.86	2.72	1.64	1.00	0.45
e	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.20	0.37	0.50
e ²	0.0025	0.0036	0.0049	0.0064	0.0081	0.01	0.04	0.1369	0.25

El límite de error muestral para este caso es del 9% es decir 0,09 con lo que el tamaño de la muestra resulta de 87 personas a las que se aplicará la encuesta.

3.5.Operacionalización de las variables

Se muestra a continuación la forma en que se lleva a cabo la investigación mediante la operacionalización de las variables que se muestra en las tablas 3.3 y 3.4

VARIABLE INDEPENDIENTE: Pequeños sistemas conversores de energía eólica.

Tabla 3. 3. Operacionalización de la variable independiente. Fuente: El Autor.

Concepto	Categoría	Indicadores	Item	Técnicas	Instrumentos
Máquinas de pequeña potencia destinadas a captar el potencial eólico disponible del viento y transformarlo en electricidad por medio de un generador.	Pequeños aerogeneradores aislados.	Tipo de rotor a utilizar.	Clasificación .	Revisión de documentos.	Fichas de recolección de datos
	Componentes de pequeños aerogeneradores.	Generadores.	Tipología.	Revisión de documentos.	Fichas de recolección de datos
		Acumuladores.	Tipología.	Revisión de documentos	Fichas de recolección de datos
		Sistemas de orientación carga y de frenado.	Tipología.	Revisión de documentos.	Fichas de recolección de datos
		Perfiles aerodinámicos.	Tipología.	Revisión de documentos	Fichas de recolección de datos

VARIABLE DEPENDIENTE: Provisión de electricidad.

Tabla 3. 4. Operacionalización de la variable dependiente. Fuente: El Autor

Concepto	Categoría	Indicadores	Item	Técnicas	Instrumentos
Se entiende en esta investigación como la posibilidad de brindar energía eléctrica por medio de sistemas conversores de energía eólica a viviendas aisladas del tendido eléctrico.	Evaluación necesidades energéticas.	Cantidad de energía a entregar por parte del generador.	KW-h/año	Evaluación de demanda anual de energía.	Cuaderno de nota, Hojas electrónicas
	Prospección preliminar de fuentes de energía eólica.	Búsqueda de evidencia biológica. Comportamiento estacional y diario del clima	Escala de Beaufort.	Investigación de campo.	Cuaderno de nota, cámara fotográfica. Cuaderno de notas
	Determinación de potencial eólico disponible.	Medición de velocidad de viento.	(m/s)	Medición del viento.	Anemómetros, estación meteorológica, Torre de sustentación.
		Índice de turbulencia.	(%)	Tratamiento Estadístico de la velocidad de viento.	Software especializado
	Densidad de potencial eólico	(W/m ²)	Tratamiento Estadístico de la velocidad de viento.	Software especializado	

3.6. Instrumentos de recolección de datos

Los instrumentos que se utilizarán para el desarrollo de esta investigación se recogen en la siguiente matriz que nace de la operacionalización de las variables (Tabla 3.5).

Tabla 3. 5. Matriz para la recolección de datos. Fuente: El Autor.

	Indicadores	Técnicas	Instrumentos
VARIABLE INDEPENDIENTE:	Tipo de rotor a utilizar.	Revisión de documentos.	Fichas de recolección de datos
	Perfiles aerodinámicos.	Revisión de documentos	Fichas de recolección de datos
	Mecanismos de direccionamiento.	Revisión de documentos.	Fichas de recolección de datos
	Generadores.	Revisión de documentos.	Fichas de recolección de datos
	Acumuladores.	Revisión de documentos	Fichas de recolección de datos
	Sistemas control de carga y freno.	Revisión de documentos.	Fichas de recolección de datos

	Indicadores	Técnicas	Instrumentos
VARIABLE DEPENDIENTE.	Cantidad de energía a entregar por parte del generador.	Evaluación de demanda anual de energía.	Hojas electrónicas.
	Búsqueda de evidencia biológica. Comportamiento estacional y diario del clima	Investigación de campo.	Cuaderno de nota, cámara fotográfica.
	Medición de velocidad de viento.	Medición del viento.	Anemómetros, estación meteorológica, Torre de sustentación.
	Índice de turbulencia.	Tratamiento Estadístico de la velocidad de viento.	Software especializado.
	Densidad de potencial eólico	Tratamiento Estadístico velocidad de viento.	Software especializado.

3.7. Procedimiento de la investigación

En este apartado se analiza las fases que se va a seguir en este trabajo de investigación y el orden que éstas han de tener, de forma que se pueda lograr una

metodología lógica que permitirá contrastar las variables que se están manejando.

En este contexto, el método de investigación que se utilizará es el **Método empírico**, que permiten relevar las relaciones esenciales del objeto de investigación, no observables directamente.

Técnica a aplicar.

En la presente investigación se aplicarán técnicas estadísticas y de muestreo, que permitirán estimar el potencial eólico de García Moreno

3.8. Procesamiento y análisis

La parte fundamental de este tema de investigación se refiere al procesamiento estadístico de los datos de velocidad de viento en la parroquia García Moreno con el fin de determinar el potencial eólico de la zona. Con esta información ha de decidirse sobre el tipo de aerogenerador que mejor se adapte a estas condiciones y, por último proponer el diseño del mismo utilizando tecnología disponible en el Ecuador.

La forma de cómo se va llevar a cabo se explica a continuación el procesamiento y análisis de los resultados se explica en los siguientes apartados.

3.8.1. Realización de la prospección eólica preliminar

Consiste en evaluar de manera cualitativa la velocidad media, a través de encuesta a la muestra de población calculada lo que permitirá conocer los siguientes parámetros de evaluación:

- Intensidad diaria y estacional del viento.
- Indicadores biológicos.

3.8.2. Medición y tratamiento estadístico de los datos de velocidad de viento a realizarse en esta investigación

Si las conclusiones del apartado anterior son las esperadas, es decir, existe evidencia de potencial eólico, se procede a evaluar cuantitativamente la velocidad promedio de viento, utilizando el siguiente procedimiento:

Para la medición del viento se utilizó una estación meteorológica de marca VOLTCRAFT, cuyas características técnicas se muestran en el anexo 3-B.

El anemómetro es colocado a 10 metros de altura en una torre acondicionada para el efecto. El anemómetro es capaz de entregar datos de velocidad de viento con una frecuencia de un Hertz, que serán promediados cada 5 minutos y estos a su vez promediados para una hora.

Los datos de velocidad media horaria se procesan estadísticamente agrupando los valores en rangos calculados de acuerdo a la siguiente ecuación (Villarrubia, Ingeniería de la energía Eólica, 2012):

$$N_c = 1 + 3,3 \log_{10}(N) \quad (3.1)$$

Dónde:

N_c = Número de rangos o clases en que se ha dividido los datos

Para luego calcular la velocidad media utilizando la siguiente ecuación

$$\langle v \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n v_i \quad (3.2)$$

Donde:

N = Tamaño de la muestra o números de valores medidos.

v_i = Centro del intervalo correspondiente.

A partir de estos datos se evalúa la desviación estándar de la velocidad media de los datos tabulados. Para tal fin definimos la desviación estándar como:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (v_i - \langle v \rangle)^2} \quad (3.3)$$

El cuadrado de la desviación estándar σ está definido como la varianza.

3.8.3. Proyección del comportamiento de la velocidad media del viento en el sitio de estudio

Con los datos recopilados anteriormente, es posible predecir el comportamiento de la velocidad del viento en un cierto periodo de tiempo, esto es posible hacerlo utilizando la función de densidad de probabilidad de Weibull (Villarrubia, Energía Eólica, 2004).

Esta es una distribución de dos parámetros, que matemáticamente tiene la siguiente forma:

$$\rho(v) = \frac{k}{c} \left[\frac{v}{c} \right]^{k-1} e^{-\left[\left(\frac{v}{c} \right)^k \right]} \quad (3.4)$$

Donde \mathbf{c} y \mathbf{k} son los parámetros de escala y de forma respectivamente.

Muchos autores sugieren que lo más conveniente para determinar estos parámetros es utilizar la siguiente relación propuesta por Justus que utiliza el valor medio y la varianza para calcular el parámetro \mathbf{K} , y esta relación es:

$$k = \left[\frac{\sigma}{\langle v \rangle} \right]^{-1.086} \quad (3.5)$$

Por consiguiente puede determinarse el valor del parámetro \mathbf{c} , de la siguiente manera:

$$c = \frac{\langle v \rangle}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (3.6)$$

Siendo Γ , (función gamma) otra función matemática que se puede encontrar tabulada para un cierto valor.

3.8.4. Determinación de la intensidad de la turbulencia

Este parámetro es de suma importancia para el diseño de aerogeneradores y se la calcula con la siguiente ecuación:

$$I = \frac{\sigma}{\langle v \rangle} \quad (3.7)$$

Donde σ se expresa en m/s, y $\langle v \rangle$, en m/s, en el mismo periodo de tiempo y a la misma altura.

3.8.5. Determinación del potencial eólico

La densidad de energía por unidad de área, se calcula con la siguiente expresión (Villarrubia, Ingeniería de la energía Eólica, 2012):

$$\left\langle \frac{E}{A} \right\rangle = \left[\frac{1}{2} \delta \int_0^{\infty} v_i^3 \rho_{(v)} dv \right] 8760 = \frac{1}{2} \delta \langle v_i^3 \rangle 8760 \quad (3.8)$$

Donde:

$\left\langle \frac{E}{A} \right\rangle$ = Densidad de energía anual (W/m²)

δ = Densidad del lugar (kg/m³)

$\langle v_i^3 \rangle$ = media del cubo de las velocidades (m³/s³)

$$\langle v_i^3 \rangle = c^3 \Gamma_{\left(1+\frac{3}{k}\right)} \quad (3.9)$$

Para el cálculo de la densidad se utiliza la siguiente ecuación:

$$\delta = 1.225 \left[\frac{288}{t+273} \right] e^{-\frac{h}{8435}} \quad (3.10)$$

Siendo (t) la temperatura ambiente promedio del lugar, y (h) la altura del lugar.

La potencia que entrega el viento se determina con la siguiente ecuación:

$$Pd = \frac{1}{2} \delta A \langle v^3 \rangle \quad (3.11)$$

Donde:

A= superficie de área perpendicular a la dirección del flujo

Por lo que la densidad de potencial eólico por unidad de superficie es:

$$\left\langle \frac{Pd}{A} \right\rangle = \frac{1}{2} \delta \langle v^3 \rangle \quad (3.12)$$

Para evaluar la velocidad media de viento para otras alturas de buje de aerogenerador, empleamos la siguiente ecuación:

$$\frac{\langle v' \rangle}{\langle v \rangle} = \left(\frac{z'}{z} \right)^\alpha \quad (3.13)$$

Donde:

$\langle v \rangle$ y $\langle v' \rangle$ son respectivamente las velocidades medias a las alturas z y z'

α = coeficiente de rugosidad.

Por otro lado, se puede evaluar el potencial eólico de una zona a diferentes alturas, mediante la siguiente expresión:

$$\frac{(\text{Potenciaeólico})'}{(\text{Potenciaeólico})} = \left(\frac{z'}{z} \right)^{3\alpha} \quad (3.14)$$

3.9. Criterios para la elaboración de la propuesta

Una vez determinado el potencial eólico de la zona en cuestión, para el diseño del sistema conversor de energía eólica, que es la propuesta de la presente investigación, se seguirán los siguientes pasos:

- Determinación del área de barrido del rotor.
- Selección de la relación de velocidades específicas.
- Número y material de los álabes del rotor.

- Dimensionamiento del álabe.
- Diseño mecánico de la máquina.

3.10. Conclusiones del capítulo

Ha quedado estructurado el procedimiento de investigación que se utilizó para determinar el potencial eólico en la parroquia García Moreno mediante la ejecución de una prospectiva que permita determinar la evidencia de presencia de viento utilizable, su medición y tratamiento estadístico.

Se menciona la metodología a utilizar para la caracterización de pequeños sistemas eólicos para la conversión de energía cinética de viento en electricidad.

Ha quedado establecida una metodología para estimar los parámetros de diseño de pequeño aerogeneradores que permitirán llevar a cabo la determinación del potencial eólico de García Moreno, barrio La Libertad, y con ello plantear el diseño de un pequeño aerogenerador de fabricación local.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo se ha realizado un análisis de los resultados obtenidos en cuanto a las características tecnológicas de sistemas conversores de energía eólica para generación de electricidad, siendo posible con esta información, determinar cuál es la mejor alternativa en lo que tiene que ver con la tipología de máquina a diseñarse.

Además, por medio de la metodología explicada en el capítulo III se interpreta y analiza los resultados de la prospección eólica realizada en García Moreno, Barrio La Libertad, que servirán para la determinación de los parámetros fundamentales de diseño de la máquina eólica previamente caracterizada.

4.1. Caracterización de pequeños sistemas conversores de energía eólica para generación de electricidad aislados de la red

La elección adecuada de los componentes de un pequeño sistema conversor de energía eólica es una tarea algo difícil dada la gran cantidad de propuestas que existen en el mercado. Para poder abordar este estudio, se ha considerado dos puntos de vista, a saber: El primer punto consiste en identificar cuál es la tendencia en cuanto a la construcción de pequeños sistemas conversores de energía eólica a nivel comercial y segundo, analizar algunas experiencias en cuanto a la aplicación de esta tecnología utilizando medios disponibles en nuestro país.

4.1.1. Desarrollo de pequeños sistemas conversores de energía eólica

En base a un estudio realizado (Arraña, 2012), se muestran algunos resultados sobre la tendencia actual en la fabricación de micro aerogeneradores comerciales, en cuanto a sus partes constitutivas, (eje, tipo de rotor, sistema eléctrico).

Tipo de eje.- En los momentos actuales se está utilizando preferentemente sistemas conversores de energía eólica de eje horizontal por sus mejores características tecnológicas y económicas frente a los de eje vertical, lo que hasta

cierto punto ha dejado en segundo plano el desarrollo de estos últimos. Según este estudio, de 71 equipos relevados en la web el resultado determinó que el 86 % de los mismos se fabrican con eje horizontal mientras que el 14 % restante lo hace con eje vertical, lo anterior se indica en la figura 4.1.



Figura 4.1. Tipo de eje utilizado en los pequeños aerogeneradores. Fuente: (Arraña, 2012)

Tipo de rotor y número de palas.- En la mayoría de los casos el rotor se encuentra situado a barlovento con el objeto de reducir las cargas cíclicas sobre las aspas, encontrándose solo 4 equipos orientados a sotavento, uno de marca Bornay modelo Bee 800, un equipo SkyStream 3.7 de la firma Southwest Windpower y dos equipos Windy West, el WW 24 y el WW 36.

El rotor común es de tipo hélice. En la tecnología actual el más frecuente es el tripala (más del 75 % de los casos consultados), aunque se encontró hasta de seis palas con soluciones intermedias de dos, cuatro y cinco. En la figura 4.2 se observan los resultados obtenidos:

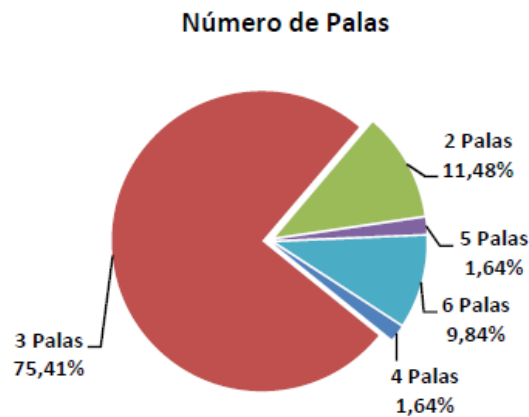


Figura 4. 2. Cantidad de palas utilizadas en lo pequeños aerogeneradores. Fuente: (Arraña, 2012)

El estudio muestra que para la mayoría de los pequeños aerogeneradores se emplean materiales compuestos para la fabricación de las aspas. El material más utilizado resultó ser la fibra de vidrio reforzada (PRFV), con un porcentaje del 68,5 %. Existe una última tendencia en el uso de la fibra de carbono, de hecho el segundo material más utilizado resulta de la combinación de ésta con la fibra de vidrio. Debido a su alto costo no se observaron modelos diseñados exclusivamente de fibra de carbono. Con respecto al uso de maderas sólo se observó su uso en modelos anteriores del equipo marca Montaraz. El aluminio, actualmente, se está dejando de utilizar ya que es un metal propenso a la fatiga. En la figura 4.3 se muestra cuantitativamente los materiales que más se utilizan en pequeños aerogeneradores comerciales.

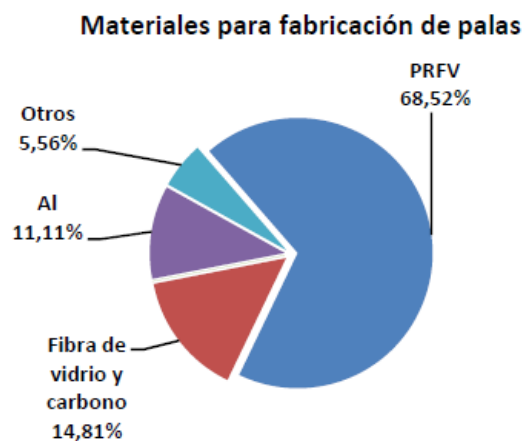


Figura 4. 3. Materiales utilizados para la fabricación de las aspas. Fuente: (Arraña, 2012)

Características de generador eléctrico.- En la mayoría de los casos se usa una conexión directa entre rotor y generador encontrándose solamente dos modelos que trabajan con caja multiplicadora.

La figura 4.4 muestra que la tendencia más generalizada en los pequeños aerogeneradores es la utilización de generadores síncronos de imanes permanentes (PMG). Existe un notable incremento en el uso de imanes de neodimio hierro boro (NdFeB), que técnicamente duplican la potencia de sus antecesores de ferrita.

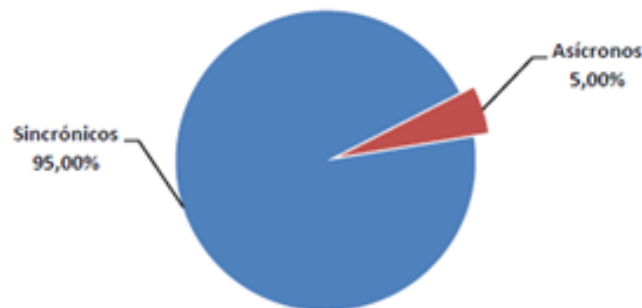


Figura 4. 4. Tipo de generador eléctrico utilizado. Fuente: (Arraña, 2012)

El generador síncrono es el más simple, eficiente y más robusto, suelen tener 4, 6, 8 o 10 polos, incluso de hasta 20 pares, como el caso del Windspot de 3,5 kW y 22 pares de polos, en el equipo WW 36, de la empresa Windy West. Todos son capaces de producir corriente alterna trifásica para hacer un mejor uso del espacio dentro de la carcasa del generador.

Sistema de orientación.- Salvo los aerogeneradores de eje vertical y excluyendo los orientados a sotavento de eje horizontal, todos los modelos se orientan por medio de una veleta de cola.

Sistema de frenado y regulación de velocidad de giro.- Con respecto al sistema de frenado los resultados mostrados en el estudio antes mencionado fueron variados, desde equipos sin sistemas de protección o con frenado manual hasta

aerogeneradores con frenado por cortocircuito del generador, freno eléctrico, sistemas de control electrónico con microprocesadores y dispositivos de frenado mecánico y dinámico. El sistema de regulación de velocidad más común relevado, es por cabeceo de la turbina eólica.

Tipo de torre.- Las torres más frecuentemente utilizadas son las auto portantes y las atirantadas o con tensores. Para el caso de las torres es muy importante asesorarse sobre las normativas locales a la hora de seleccionar una alternativa de torre para el aerogenerador ya que pueden existir restricciones de altura o tipología estructural.

Se puede decir que los pequeños sistemas conversores de energía eólica se caracterizan por su gran variedad, con diferentes formas y tamaños. Sin embargo, en los últimos tiempos han ido cambiando hacia una configuración común que se muestra a continuación (Leary, While, & Howell, 2012):

Aerogenerador para instalaciones off-grid (sin conexión a la red)

- Rotor de tipo hélice de eje horizontal con tres palas de frente al viento (a barlovento).
- Unido directamente (sin caja multiplicadora) a un generador trifásico síncrono de imanes permanentes de neodimio.
- Se orienta con respecto a la dirección del viento por una veleta de cola.
- Regulación de la velocidad de giro por cabeceo o cambio de paso pasivo.
- Dos sistemas de frenado, uno de ellos de tipo mecánico.
- Podría tener cualquier tipo de torre soportante, con diferentes alturas.

4.1.2. Pequeños aerogeneradores de fabricación local

La fabricación local de pequeños sistemas conversores de energía eólica en el Ecuador ha dado un paso importante con la realización de proyectos que están siendo utilizados a nivel rural como los citados en el apartado 2.1.4. La importancia de estas investigaciones radica en el hecho de que a través de las

instituciones de nivel superior, se están formando profesionales que entiendan la aplicabilidad de estos proyectos en comunidades aisladas y que pueden servir de nexo para llevar dicha información a las personas del lugar.

En base a estas investigaciones y a otras tres experiencias de este tipo que se ha desarrollado en el interior de Mongolia, en Costa Rica y en Perú, (Leary, While, & Howell, 2012), que fueron ya mencionadas en el apartado 2.1.2., se realiza a continuación la caracterización de pequeños aerogeneradores de fabricación local aplicables a la Parroquia García Moreno.

Un aspecto importante en este estudio es la necesidad de considerar la energía eólica de fabricación local como una tecnología socialmente integrada. Esto implica que cualquier decisión tecnológica que se tome, debe hacerse en el contexto de la disponibilidad de habilidades, conocimientos y materiales, así como la capacidad de pago y las necesidades energéticas de la comunidad. El papel de los intermediarios, como las ONG, los gobiernos y las instituciones de investigación y las empresas privadas para ayudar a apoyar el desarrollo de una industria local de sistemas conversores de energía eólica es particularmente importante.

En cuanto al tipo de tecnología utilizada en estas regiones para el diseño de sus prototipos, tienen la misma configuración típica mostrada en párrafos anteriores de esta investigación, siendo lo relevante los materiales utilizados para la construcción de los álabes o palas que preferentemente son de madera obtenida de árboles del lugar, siendo bajo el uso de palas de fibra de vidrio y/o carbono, que encarecen significativamente el costo del proyecto.

En la tabla 4.1 se detalla los componentes utilizados para sistemas conversores de energía eólica así como los componentes de la parte eléctrica que se utilizaron en los casos analizados (caso I Ecuador, Caso II Mongolia, Caso III Costa Rica, Caso IV Peru):

Tabla 4. 1. Componentes utilizados en los modelos de aerogeneradores de fabricación local.

COMPONENTES DEL SISTEMA		CASO DE ESTUDIO				COMENTARIOS	
		I	II	III	IV		
AEROGENERADOR	Palas	Tubería de PVC					Barato y fácilmente disponible, pero el rendimiento y la fiabilidad no han sido probadas
		Madera				x	Amplia disponibilidad de madera y habilidades locales en carpintería. Buena calidad de la madera local, apropiada por costo, disponibilidad y propiedades de la misma.
		Fibra de vidrio	x		x		Ideal para la fabricación en serie y de altos volúmenes de producción, pero se necesitan de moldes y manufactura apropiada para estos.
		Chapa metálica prensada		x			Barato y sencillo, pero propenso a fallos debidos a la fatiga
	Generador	GIP de flujo axial	x		x	x	Simple para la fabricación y un óptimo funcionamiento a bajas velocidades de viento. Imanes de Ferrita que son baratos y disponibles, aunque los imanes de Neodimio aumentan los rendimientos anuales de energía en un 20%
		Motores como generador					Requieren caja multiplicadora y altas velocidades de rotación.
		GIP de flujo radial		x			Posible sólo para la fabricación de gran volumen debido a la compleja geometría de los componentes.
	Torre	Poste con tirantes (vientos)	x	x	x	x	Pueden ser bajadas fácilmente a tierra para el mantenimiento y requieren menos material en general, pero las secciones de acero de gran tamaño necesitan mayor presencia de tensores.
		Torre de celosía				x	Diseño más compacto, posibilidad de ser escaladas para el mantenimiento, perfiles de acero más cortos, pero más complejo de fabricar.
	SISTEMA ELÉCTRICO	Acumulador	Baterías de automóviles				
Baterías de ciclo profundo			x	x	x	x	Una vida más larga y una mayor DoD, pero alto costo inicial y menor disponibilidad.
Super-condensadores							No son tóxicos, de bajo mantenimiento, 100% DoD, vida útil ilimitada y no requiere controlador de carga, pero de alto costo inicial y aún no están disponibles en el mercado.
R. carga		Importado	x		x	x	Difíciles de fabricar localmente.
		Mano de obra local		x			Diseño muy sencillo de fabricación con productos electrónicos disponibles localmente.
Desviación de carga		Calentador de agua reciclado			x	x	Sencillo, barato y disponible
		Fabricación local		x			Solamente es más barato si se lo fabrica en grandes volúmenes.
Inversor (ac)		Importado	x		x	x	Difícil de fabricar en la localidad.

Por medio de la tabla 4.1 nos ayuda para poder realizar la caracterización de la máquina a utilizar en García Moreno.

4.2. Prospección eólica preliminar

Como se mencionó en párrafos anteriores, se realizó una encuesta sobre un segmento de la población de la parroquia García Moreno, barrio La Libertad cuyos resultados y análisis se comentan a continuación.

Análisis de la Encuesta.

- **PREGUNTA 1 ¿Utiliza usted energía eléctrica?**

Los resultados mostraron que de los 87 encuestados, 85 respondieron que sí disponen de energía eléctrica y solo 2 que no están conectados a la red.

Si bien es cierto que la mayoría de los pobladores están conectados a la red eléctrica convencional, muchos se quejaron que la calidad de la misma no siempre es buena, presentándose situaciones en las que se manifiestan caídas de tensión cuando a la casa se conecta algún dispositivo eléctrico de gran demanda, como por ejemplo duchas eléctricas. Los resultados de esta pregunta se muestran en la figura 4.5.

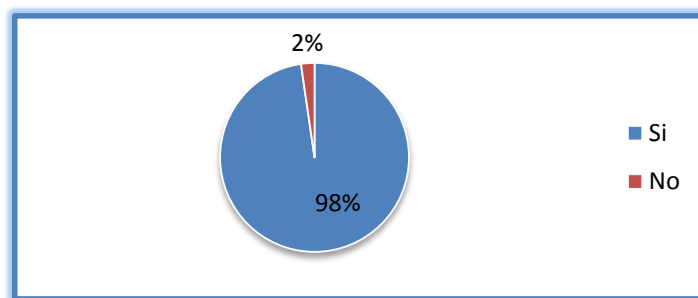


Figura 4. 5. Resultados de la pregunta 1 de la encuesta.

- **PREGUNTA 2. El consumo eléctrico en su hogar es: Alto Moderado Bajo**

Esta pregunta arrojó como resultado los datos mostrados en la figura 4.6, donde se muestra que el consumo de energía eléctrica es moderado para el 64 % de los encuestados. Como aclaración, se consideró como consumo alto un costo de energía comprendido entre 15 a 20 dólares mensuales, costo moderado entre 11 a 15 dólares mensuales y bajo entre 0 a 10 dólares por mes.

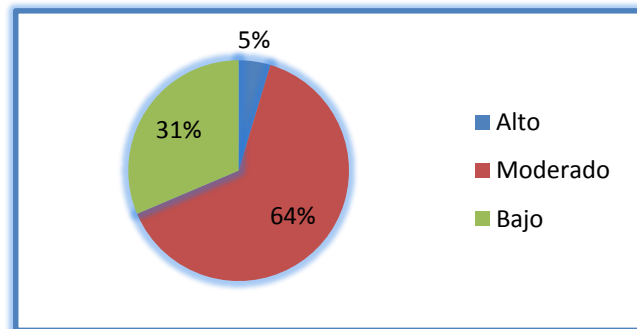


Figura 4. 6. Resultados de la pregunta 2 de la encuesta.

- **PREGUNTA 3. ¿Qué tipo de clima predomina en su lugar de residencia?**

En lo que se refiere a esta pregunta, 57 personas indicaron que es ventoso y 17 que el clima es frío.

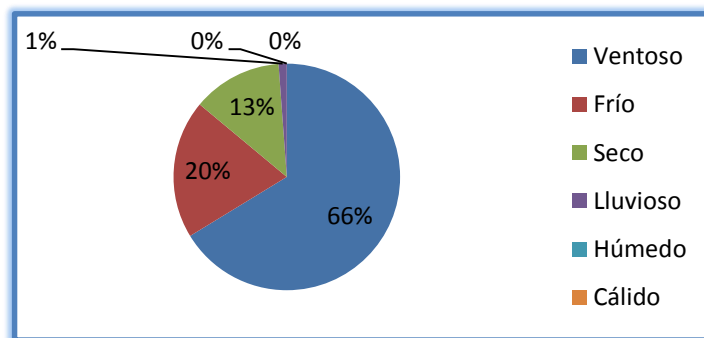


Figura 4. 7. Resultados de la pregunta 3 de la encuesta.

De acuerdo a los datos obtenidos, el clima predominante en este sector es el ventoso (66 %) en la mayoría de su tiempo, como también predomina de manera constante el clima frío (20 %)

- **PREGUNTA 4. ¿En qué época del año se siente con más intensidad el viento?**

El periodo de tiempo considerado como de mayor presencia de viento es el de julio-agosto, que es típico de la serranía ecuatoriana.

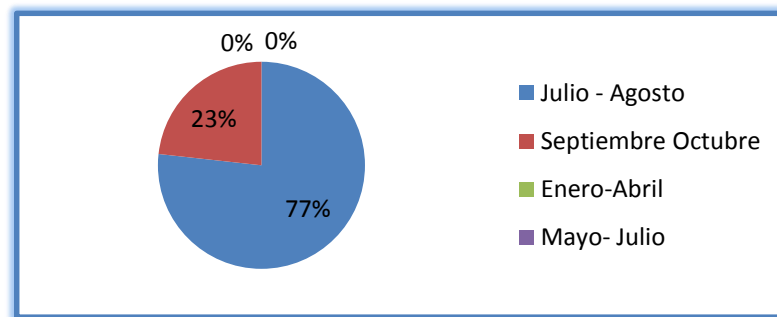


Figura 4. 8. Resultados de la pregunta 4 de la encuesta.

Se puede concluir que hay buena presencia de viento la mayor parte del año que representa el 77 % según la encuesta, en los meses de Julio y agosto.

- **PREGUNTA 5. ¿En qué hora del día hay mayor intensidad del viento?**

Según el resultado de esta pregunta, 73 encuestados (85 %), estuvieron de acuerdo en afirmar que es en la tarde donde se produce la mayor cantidad de viento. Los resultados en porcentaje se muestran en la figura 4.9.

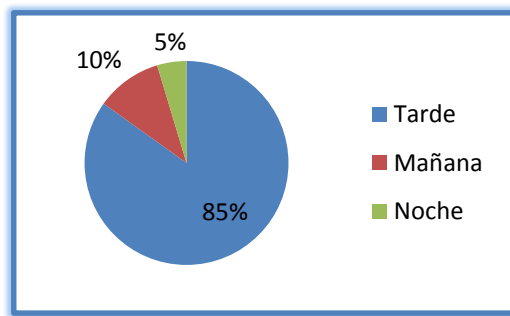


Figura 4. 9. Resultados de la pregunta 5 de la encuesta.

- **PREGUNTA 6. ¿Cuál es el tiempo aproximado en horas en el día que dura el viento de mayor intensidad?**

Los resultados de esta pregunta fueron más equilibrados en porcentaje, siendo 35 las personas (41 %) las que contestaron que los vientos de mayor intensidad duran un promedio de dos horas.

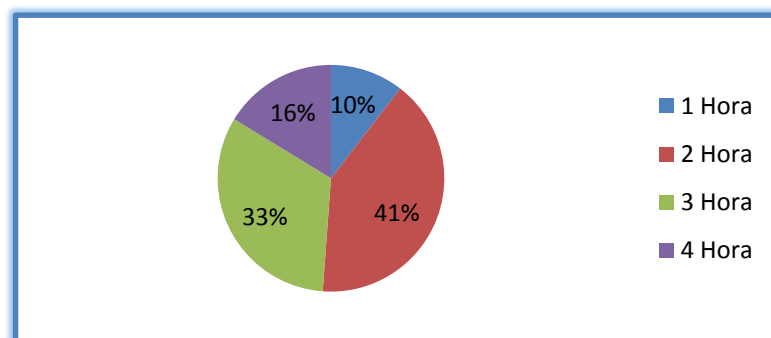


Figura 4. 10. Resultados de la pregunta 6 de la encuesta.

- **PREGUNTA 7. ¿En qué hora del día hay menor intensidad del viento?**

Fueron 69 personas las que contestaron que en la mañana se presentan vientos de menor intensidad, mostrándose en porcentajes los resultados en la figura 4.11. La hora del día de esta situación está entre 08:00 y las 10:00 am

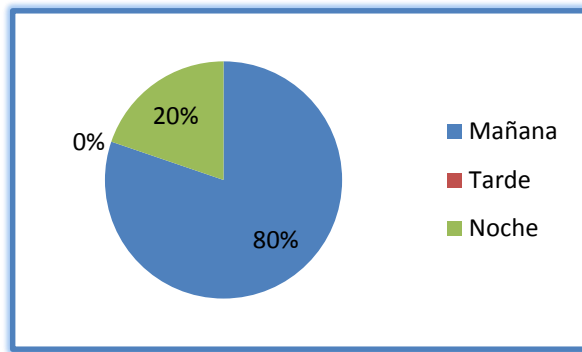


Figura 4. 11. Resultados de la pregunta 7 de la encuesta.

- **PREGUNTA 8. La dirección predominante del viento es:**

Se pudo concluir que en todo el sector de la Libertad y sus alrededores el viento siempre va de Sureste – Noreste (100 %), tal como indica la figura 4.12

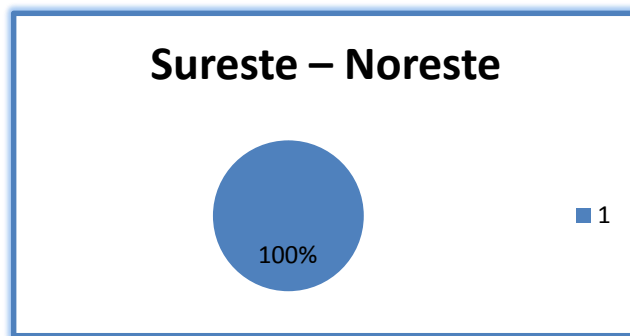


Figura 4. 12. Resultados de la pregunta 8 de la encuesta.

- **PREGUNTA 9. ¿Existen vías de acceso al sector donde se va a instalar el sistema conversor de energía?**

En cuanto a esta pregunta y corroborada por el autor las vías de acceso son en general de buena calidad (100 % de los encuestados así lo afirmaron), lo que no acarrearía problemas de costos adicionales por transporte en la instalación del proyecto, si este fuera el caso. En la figura 4.13 se ilustra con un gráfico este resultado.

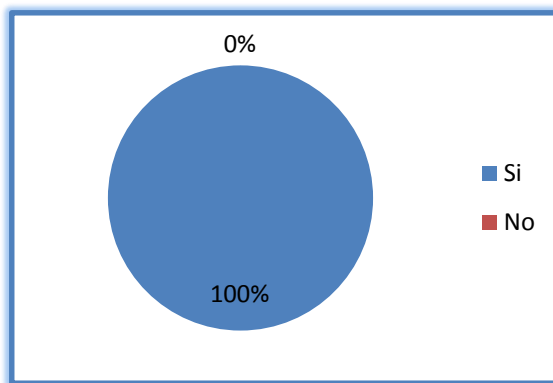


Figura 4. 13. Resultados de la pregunta 9 de la encuesta.

- **PREGUNTA 10. ¿Existe avifauna a los alrededores de la instalación del sistema conversor de energía?**

Según los resultados de esta pregunta, existe presencia de aves en la zona (Figura 4.14)

En cuanto a este resultado, no está claro si las maquinas eólicas pequeñas afectan de manera significativa a las aves, lo que si se ha observado en grandes aerogeneradores es que ciertas especies de aves anidan en la góndola del aerogenerador, debido al confort que sienten por la temperatura de la caja multiplicadora.

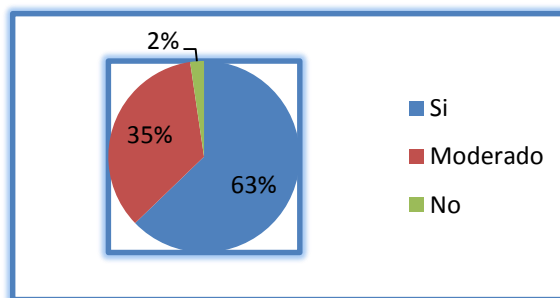


Figura 4. 14. Resultados de la pregunta 10 de la encuesta.

Por los datos obtenidos la avifauna en este sector considerable con la existencia de diversos tipos de aves.

En resumen, a continuación se detalla el resultado final de la encuesta:

Datos Generales.

- Director del Proyecto: Ing. Alex Mayorga.
- Encuestador: Ing. Alex Mayorga.
- Muestra Poblacional: $86.96 = 87$
- Fecha: Abril – Mayo de 2013
- Provincia: Tungurahua.
- Cantón: Pelileo.
- Parroquia: García Moreno.
- Barrio: La Libertad.

La figura 4.15, es una fotografía del barrio La Libertad, García Moreno, cuya ubicación geográfica es:



Figura 4. 15. Fotografía Sector La Libertad.

Ubicación Geográfica.

- Latitud: **-1°19'0" N (1.31667).**
- Longitud: **78°31'60" E (78.5333).**

- Altura: **2580 m.s.n.m.**
- Temperatura Promedio: **14-18°.**
- Presión Barométrica: **55,9 mmHg**
- Tipo de acceso: **Asfaltado 3 Km, empedrado 10 Km, Afirmado 1 Km.**

Se puede observar en la figura 4.16, una panorámica de la carretera que conduce al lugar donde se tomó los datos de velocidad de viento.



Figura 4. 16. Fotografía Sector Vía a Nitón (Barrio La Libertad).

Comportamiento Estacional.

- Mayor Presencia de Viento: **Julio – Agosto.**
- Menor Presencia de Viento: **Diciembre – Enero.**
- Dirección Predominante: **Sureste – Noreste.**

Comportamiento Diario.

- Mayor Presencia de Viento: **Tarde (15:00 a 18:00).**

- Menor Presencia de Viento: **Mañana (06:00 a 09:00).**
- Dirección Predominante: **Sureste – Noreste.**

4.2.1. Evidencia biológica

Durante la realización de la encuesta se evidenció la presencia de vegetación rastrera y árboles con ciertos patrones de orientación que dan cuenta de un significativo potencial eólico en el lugar (Figura 4.17), como se puede ilustrar en las siguientes fotografías tomadas en la zona de estudio.



Figura 4. 17. Fotografías barrio La Libertad. Evidencia biológica de presencia de viento en el mes de mayo de 2013.

- Efectos Ecológicos observados: Plantas viradas, follaje de un solo lado, vegetación rastrera.

Esto indica según la figura 2.1, que hay viento entre grado 4 y 5 según la escala de Griggs-Putman.

4.2.2. Estimación de velocidad de viento de forma cualitativa

Para afirmar un poco más la prospección preliminar hasta aquí realizada, se utilizó la escala de Beaufort, para en base a esta hacer una primera aproximación de la posible velocidad de viento del sector.

Utilizando esta escala, los criterios recogidos por los pobladores fueron los que se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4. 2. Criterios de apreciación de la intensidad del viento para escala Beaufort en El Barrio La Libertad, Parroquia García Moreno.

GRADO ESCALA DE BEAUFORT.	NUMERO DE PERSONAS
0	0
1	0
2	3
3	10
4	50
5	15
6	8
7	0
8	0
9	0
10	0
11-17	0

De la tabla anterior se deduce que, de acuerdo a la escala Beaufort, el nivel de viento es de grado cuatro. La velocidad de viento estimada se muestra en la tabla 4.3.

Tabla 4. 3. Valor probable de velocidad según la Escala de Beaufort.

Viento en el rostro (1,6–3,3)m/s	Hojas agitadas constantemente (3,4-5,4) m/s	Viento levanta polvo (5,5 -7,9)m/s	Los arbustos con hojas se balancean (8-10,7) m/s	Las grandes ramas si agitan (10,8-13,8) m/s
3	10	50	15	8

La figura 4.18 muestra la distribución porcentual del resultado anterior, lo que hace evidente que existe un buen potencial eólico en la parroquia García Moreno, considerando que el 58 % de los encuestados dijeron que el viento del lugar es levanta polvo (Según la escala de Beaufort)

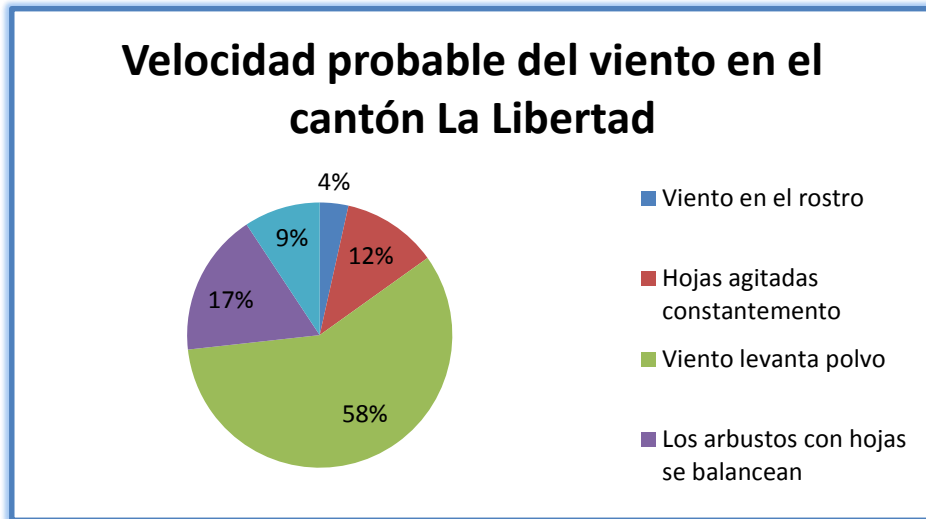


Figura 4. 18. Resultados de la aplicación de la escala de Beaufort.

Del análisis de la figura 4.18, la probable velocidad media de viento en García Moreno, barrio la libertad está entre 5,5 y 7,9 m/s.

4.3. Medición de la velocidad del viento en el barrio La Libertad

Para la medición del viento, el anemómetro se ha colocado a 10 metros de altura en una torre acondicionada para el efecto. Los datos fueron recopilados durante las 24 horas del día en período de tiempo que va desde el 19 de mayo al 16 de julio de 2013, con una frecuencia de un Hertz, promediados cada 5 minutos y estos a su vez promediados para una hora. En el anexo 4-A se presenta la tabulación de las medidas horarias de viento en el lapso de tiempo considerado.

4.3.1. Tratamiento estadístico de la velocidad de viento

El número total (N) de datos de velocidad promedio horaria obtenidos es de 1416, de los cuales se discriminaron 216 que se encontraban por debajo de 1 m/s de

velocidad y que además aparecieron en su mayoría en horas de la madrugada, siendo el valor de $N = 1\ 200$.

Se ha determinado además para cada rango (N_c), los siguientes valores:

- Centro de clase (V_i)
- Frecuencia de ocurrencia (n_i) de cada valor de velocidad
- Frecuencia relativa (f_i)
- Frecuencia acumulada “menor o igual que” (F_i)
- Frecuencia acumulada “mayor que” (F'_i)

En la tabla 4.4. se detallan los valores de los resultados obtenidos:

Tabla 4. 4. Análisis estadístico de velocidad de viento.

li	ls	V_i	n_i	f_i	F_i	F'_i	$f_i.v_i$	$F'_i.N$	y_i	x_i	$f_i.x_i$	$f_i.x_i^2$	$f_i.y_i$	$f_i.x_i.y_i$	Densidad de probabilidad
1.0	2.5	1.7	158.0	0.1	0.1	0.9	0.2	1042.0	-2.0	0.6	0.07	0.04	-0.26	-0.14	0.106
2.5	3.9	3.2	174.0	0.1	0.3	0.7	0.5	868.0	-1.1	1.2	0.17	0.20	-0.16	-0.19	0.135
3.9	5.3	4.6	183.0	0.2	0.4	0.6	0.7	685.0	-0.6	1.5	0.23	0.36	-0.09	-0.13	0.131
5.3	6.7	6.0	223.0	0.2	0.6	0.4	1.1	462.0	0.0	1.8	0.33	0.60	-0.01	-0.02	0.108
6.7	8.1	7.4	181.0	0.2	0.8	0.2	1.1	281.0	0.4	2.0	0.30	0.60	0.06	0.11	0.080
8.1	9.5	8.8	142.0	0.1	0.9	0.1	1.0	139.0	0.8	2.2	0.26	0.56	0.09	0.20	0.053
9.5	10.9	10.2	94.0	0.1	1.0	0.0	0.8	45.0	1.2	2.3	0.18	0.42	0.09	0.22	0.032
10.9	12.3	11.6	33.0	0.0	1.0	0.0	0.3	12.0	1.5	2.5	0.07	0.17	0.04	0.10	0.018
12.3	13.7	13.0	9.0	0.0	1.0	0.0	0.1	3.0	1.8	2.6	0.02	0.05	0.01	0.03	0.009
13.7	15.1	14.4	2.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	2.0	2.7	0.00	0.01	0.00	0.01	0.004
15.1	16.5	15.8	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	0.00	0.01	0.00	0.00	0.002
TOTAL			1200	1			5.9		3.9		1.64	3.01	-0.22	0.19	

En la figura 4.19, se observa la distribución de velocidades por medio de un histograma.

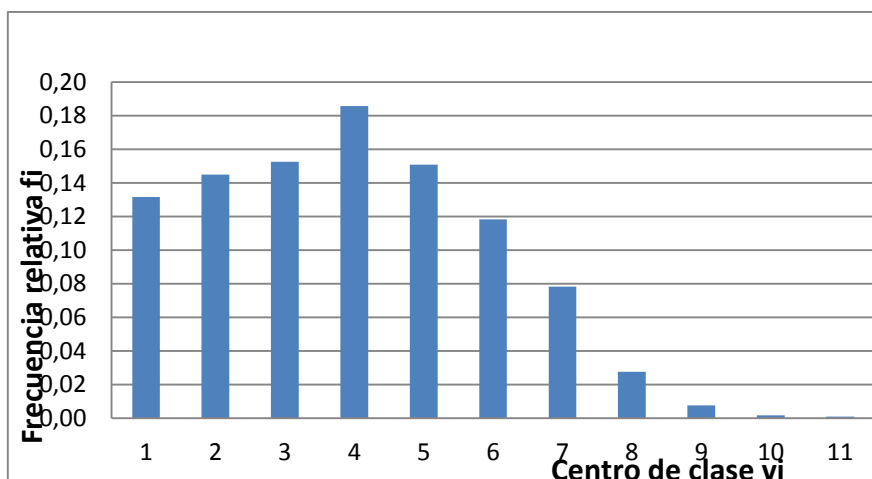


Figura 4. 19. Histograma de frecuencias relativas (f_i) vs velocidad de viento (V_i).

Posteriormente el histograma fue ajustado matemáticamente con la función de distribución teórica de Weibull mediante la ecuación (3.4)

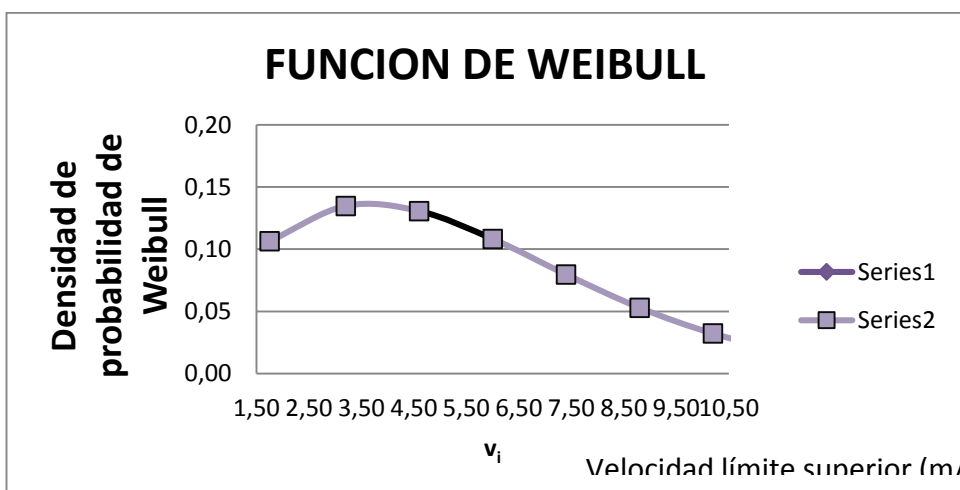


Figura 4. 20. Gráfica de la función de Weibull de los datos registrados.

Los parámetros de forma (k) y escala (c) se determinaron a través de la técnica de mínimos cuadrados, cuyos productos se muestran también en la tabla 4.4.

La intensidad de turbulencia del sitio se calcula con la ecuación 3.7. Para la desviación estándar se utilizó la expresión (3.3) para datos agrupados.

Finalmente, los resultados del tratamiento estadístico se muestran en la tabla 4.5

Tabla 4. 5. Resultados del tratamiento estadístico de velocidad de viento.

Velocidad media. $\langle v \rangle$ (m/s)	Factor de forma k	Factor de escala c (m/s)	Desviación estándar σ	Intensidad de turbulencia I_t
5,92	1,76	5,85	0,584	0,1

4.3.2. Densidad de energía y potencial eólico anual de parroquia García Moreno, Barrio la Libertad

De acuerdo con las ecuaciones expuestas en el apartado 3.8.5, en la tabla 4.6 se muestran los resultados de la cantidad de potencia que da el viento por unidad de superficie de García Moreno. La densidad del viento se obtuvo para una temperatura ambiente promedio del lugar de 16°C, y a una altura de 2580 m.s.n.m

Tabla 4. 6. Resultados potencial eólico.

Promedio del cubo de las velocidades $\langle v_i^3 \rangle$ (m ³ /s ³)	Densidad del aire δ (kg/m ³)	Densidad de energía $\langle \frac{E}{A} \rangle$ $\left(\frac{Kw \cdot h}{m^2 \text{ año}} \right)$	Densidad de potencia $\langle \frac{P_d}{A} \rangle$ (W/m ²)
308,96	0,899	1216,6	138,8

Los resultados de la tabla 4.6 muestran que la densidad del aire es más baja que la que usualmente se utiliza como aproximación para cálculos eólicos (1,225 kg/m³), lo que es normal en sitios elevados como en este caso.

La densidad de energía y la densidad de potencia aseguran la posibilidad de instalación de un pequeño aerogenerador, sin embargo en el siguiente apartado, se analiza el potencial eólico que se podría obtener sobre alturas superiores con respecto al suelo, con el fin de potenciar la instalación.

4.3.3. Potencial eólico de viento a distintas alturas

En la tabla 4.7 se tabulan los resultados del potencial eólico según la ecuación (3.14) a distintas alturas, considerando un valor de 1/7 para el coeficiente de rugosidad, muy usual en prospecciones eólicas aisladas como es nuestro caso.

Tabla 4. 7. Potencial eólico a distintas alturas de la Parroquia García Moreno, La Libertad.

z'	$\langle v \rangle$	$\langle P/A \rangle'$
(m)	(m/s)	(Kw/m ²)
10	5,92	0,138
11	6,00	0,144
12	6,08	0,149
13	6,15	0,154
14	6,21	0,159

De acuerdo a los datos de la tabla 4.7, con elevar dos metros adicionales la torre de soporte del aerogenerador, se estaría con un potencial de 0,149 kW/m².

4.4. Evaluación de la necesidad energética del sitio de estudio

Por lo general, en la zona se ha encontrado modelos de casas que han sido promocionadas por el gobierno del Ecuador que constan de 2 dormitorios, espacio para la sala y la cocina y 1 baño.

El uso de electrodomésticos para entretenimiento como reproductores de películas, televisores grandes, equipos de sonido, está limitado y depende de los ingresos de los dueños de casa. En cuanto a otros aparatos eléctricos como planchas, duchas son generalmente encontrados en las viviendas visitadas.

Otra aspecto importante a destacar, es que algunas viviendas de la parroquia García Moreno, barrio La Libertad, a pesar de tener muy cerca el tendido eléctrico, toman la energía de la casa alemana por no tener recursos para comprar una acometida legal. Quizás debido a esta situación, la calidad de la energía en el sector no es tan buena, ya que especialmente por las noches, algunas personas del lugar comentaron que han sufrido caídas de tensión, lo que no les permite instalar algún tipo de máquina de potencia elevada (máquinas de coser) para realizar algún tipo de trabajo.

En cuanto al tiempo de consumo de energía eléctrica, los habitantes del sector han manifestado, que muy por la mañana, los adultos mayores salen a sus labores cotidianas en el campo o en la ciudad de Pelileo y regresan alrededor del 5 o 6 de

la tarde. Los niños o jóvenes van para el colegio y regresan alrededor de las 2 pm. Se ha estimado entonces que las luminarias permanecen encendidas aproximadamente 1 o 2 horas en la mañana y 4 o 5 en la tarde y noche. Los fines de semana es donde más tiempo permanecen encendidas las cargas eléctricas de la casa.

Tomando en cuenta todos estos aspectos, se ha elaborado la siguiente tabla donde se muestra en detalle un análisis energético de una de las viviendas de las personas encuestadas que nos servirá para determinar algunos parámetros para el diseño del aerogenerador. Cabe resaltar que en el análisis se ha incluido ciertas cargas que no son de uso habitual, (computador, DVD, etc) pensando que ha futuro estas puedan ser incluidas en la vivienda por los usuarios.

Tabla 4. 8. Análisis energético vivienda tipo.

	Cargas	Número de cargas	Potencia Unitaria (W)	Consumo estimado (h/día)	Energía en W.h/día	Energía en W.h/año
DORMITORIOS	Luminarias	3	20	5	300	109500
	DvD	1	25	0.45	11.25	4106.25
	Tv	1	100	2	200	73000
	Computador	1	130	1	130	47450
	Plancha	1	1200	0.25	300	109500
SALA	Luminarias	2	40	4	320	116800
	Equipo de sonido	1	75	1.5	112.5	41062.5
COCINA	Luminarias	1	20	2	40	14600
	Refrigerador	1	250	6	1500	547500
	Licudadora	1	450	0.25	112.5	41062.5
BAÑOS	Ducha eléctrica	1	1500	1	1500	547500
	Luminarias	1	15	1	15	5475
				$\Sigma =$	4541.25	1657556.25

Se concluye entonces que la necesidad energética será de:

$$E = 1657556.25/1000 \approx 1658 \left[\frac{kW.h}{año} \right]$$

El generador deberá ser capaz de entregar esta cantidad de energía durante el año, es decir trabajando 8760 h/año, la potencia útil (P_u) del generador ha de ser de:

$$P_u = \frac{1658}{8760} = 0,189kW$$

4.5. Conclusiones del capítulo

A través del estudio realizado se ha logrado caracterizar el pequeño aerogenerador que mejor se adapta a las condiciones de García Moreno, es así que se determinó que la mejor opción es diseñar un aerogenerador tripala a sotavento con orientación por veleta, material de los álabes de madera y generador de imanes permanentes, que pueden ser perfectamente contruidos con la tecnología disponible en Ecuador.

Utilizando la metodología para una prospección preliminar, se obtuvo un valor estimativo de la velocidad promedio de viento de 5,5 a 7,9 m/s y a través del tratamiento estadístico fue corroborado con un valor real promedio de velocidad de viento de 5,92 m/s que resulta adecuado para pequeñas instalaciones eólicas.

Se encontró evidencia biológica con un índice de Griggs – Putman entre 4 y 5, que es un indicativo de presencia de viento con potencial eólico.

El factor de forma k es un indicativo del sesgo de la curva de densidad de probabilidad que muestra que los datos de velocidad se distribuyen en torno a la velocidad promedio de viento. En el caso estudiado el valor de k es cercano a 2, que es utilizado por los fabricantes de turbinas para determinar la curva de potencia de la máquina, asumiendo con esto un buen potencial eólico.

El factor de escala c , indica que los datos obtenidos con el anemómetro son confiables cuando ésta tiene un valor cercano al de la velocidad media, como sucede en el caso estudiado.

Se puede observar también que el índice de turbulencia es bajo (0,1) con lo se justifica el uso de máquinas de eje horizontal.

En cuanto al potencial eólico, en la zona estudiada se obtuvo un valor de 0,149 W/m^2 a 12 m de altura que puede satisfacer la necesidad energética de 1658 kW.h/año observada en una vivienda típica del lugar.

CAPÍTULO V. LA PROPUESTA

5.1. Título de la propuesta

Diseño de un aerogenerador de baja potencia de producción nacional.

5.2. Justificación de la propuesta

En zonas rurales, es conveniente centrar la inversión en aprovechar los recursos propios de cada zona, para hacer funcionar actividades de generación. La tecnología utilizada debe estar basada en la economía y en la disponibilidad natural de fuentes de energía alternativa.

Una de esas fuentes es sin duda la energía eólica, que en Ecuador está disponible en muchos lugares siendo posible su uso a pequeña escala como una forma para atender pequeñas demandas de energía entre la población dispersa en zonas rurales. Una de las demandas más importantes es la mejora en los servicios básicos, tales como salud, educación, agua potable, tareas agrícolas así como otras aplicaciones en zonas alejadas a donde no llegan las redes nacionales o regionales.

A pesar que en este trabajo de investigación se ha evidenciado que prácticamente toda la población de García Moreno posee energía eléctrica, no es menos cierto que hay zonas como la estudiada que poseen un potencial eólico que puede utilizarse para aplicaciones puntuales como bombeo de agua y electrificación para iluminación.

A pesar de su disponibilidad la energía eólica no ha sido convenientemente aprovechada debido a los altos costos de los equipos y la disponibilidad de repuestos, especialmente cuando estos equipos son importados de países desarrollados, igualmente por falta de conocimientos sobre los recursos eólicos, así también como la falta de promoción de este tipo de energía.

De lo anterior podemos decir que el campo principal de aplicación de la energía eólica en estos sectores es el diseño de máquinas para generación de electricidad de forma que pueda ser almacenada en baterías para su utilización particular posterior.

Sin embargo, para grandes demandas de energía es necesario un alto número de acumuladores o baterías que provocan gran impacto ambiental una vez que ha cumplido su vida útil. Por esta razón, la propuesta de esta investigación va encaminada a satisfacer necesidades de iluminación con máximo una batería para la acumulación de energía.

5.3. Objetivos de la propuesta

- Determinar los parámetros de diseño del aerogenerador.
- Diseñar el aerogenerador utilizando tecnología nacional.

5.4. Estructura de la propuesta

La estructura de la propuesta se ha planteado de la siguiente manera:

- Se utilizará los resultados obtenidos en capítulos precedentes para con ellos dimensionar y/o seleccionar sus componentes principales.
- Se realizará un análisis de esfuerzos actuantes sobre la máquina para probar por medio de software su resistencia a dichos esfuerzos.
- Por último se hará un análisis económico para comprobar la factibilidad de su construcción en el país.

5.5. Desarrollo de la propuesta

En base al análisis de los capítulos precedentes, se muestra a continuación los parámetros de diseño sobre los cuales se basa la propuesta del aerogenerador:

- Velocidad media de viento a 12 m de altura de torre: $\langle v \rangle_{12} = 6,1 \frac{m}{s}$
- Potencial eólico de la parroquia García Moreno: $\langle \frac{P_d}{A} \rangle = 0,149 \frac{kW}{m^2}$

- Potencia útil: $P_u = 0,189 \text{ kW}$
- Tipo de rotor o turbina: De eje horizontal rápida.
- Sistema de sustentación: Torre tubular articulada.
- Tipo de generador eléctrico: Generador de imanes permanentes.

5.5.1. Diseño de la turbina

Como se ha mencionado antes, el rotor de un aerogenerador convierte la potencia disponible de viento en potencia útil de forma que sea capaz de satisfacer las necesidades energéticas demandadas. Para lograr esto, el rotor debe girar a altas velocidades, lo que conlleva que la sección transversal de los álabes o palas del mismo, tengan un perfil aerodinámico (Santillán, 2006).

Para diseñar la turbina se debe considerar lo siguiente:

- Número de álabes o palas, que garanticen estabilidad dinámica y alta velocidad de rotación.
- Tamaño de la turbina, caracterizada por el radio del área de barrido.

A continuación se detalla el procedimiento de diseño para los tópicos indicados.

5.5.1.1. Número de álabes o palas (B)

Se determinan de acuerdo a la velocidad específica de la máquina y al tipo de rotor seleccionado.

Velocidad específica (1). Denominada así porque se utiliza para comparar el funcionamiento de máquinas eólicas diferentes, a velocidad específica, también llamada TSR (Tip Speed Ratio) es la relación entre la velocidad periférica del rotor medida en el extremo del álabe (u) y la velocidad de viento (v), y nos sirve como indicador de cuantas veces es más rápida una turbina con relación a la velocidad del viento (Villarrubia, Ingeniería de la energía Eólica, 2012).

Las turbinas de viento lentas, frecuentemente utilizadas para bombeo de agua, tienen un **1** pequeño y gran número de palas y requieren un par de arranque alto, pero la fuerza (torque) que entrega es aprovechado para mover mecanismos pesados y de alta inercia.

Las turbinas de viento rápidas tienen un **1** alto y el número de palas tiende a ser menor y bajo par de arranque, lo que permite utilizarlas en generación de electricidad, donde es muy importante que la turbina pueda rápidamente alcanzar la velocidad nominal de generador mejorando sensiblemente su rendimiento.

En las tablas 5.1 se muestra la relación entre el número de palas o álabes y la velocidad específica.

Tabla 5. 1. Número de álabes o palas según velocidad específica y tipo de máquina.
Fuente: (Díez, 1993)

TSR	1	2	3	4	5 a 8	8 a 15
Número de álabes	6 a 20	4 a 12	3 a 8	3 a 5	2 a 4	1 a 2

Tipo de máquina	TSR de diseño	Tipo de álabe
Bombeo de agua	1	Placa plana
	1	Placa curvada
	1	Ala de tela
Generadores eólicos pequeños	3 - 4	Perfil simple
	4 - 6	Perfil alabeado
	3 - 5	Perfil de tela
Generadores eólicos grandes	5 - 15	Perfil alabeado

Se puede observar que para el tipo de máquinas a diseñar en esta propuesta (pequeños aerogeneradores) el valor de **1** oscila entre 3 y 6 y un número de palas entre 1 a ocho. Como se ha mostrado en apartados anteriores, la tendencia actual es fabricar turbinas entre uno a tres álabes o palas para generación de electricidad.

Por las razones expuestas, para esta propuesta se selecciona una turbina de tres álabes y una velocidad específica 1 de 6

5.5.1.2. Tamaño de la turbina

El tamaño de una turbina (figura 5.1) viene determinado por la superficie del área de barrido que genera el álabe cuando está girando. La longitud del álabe será por tanto igual al radio (R) del círculo que limita el área de barrido (A).

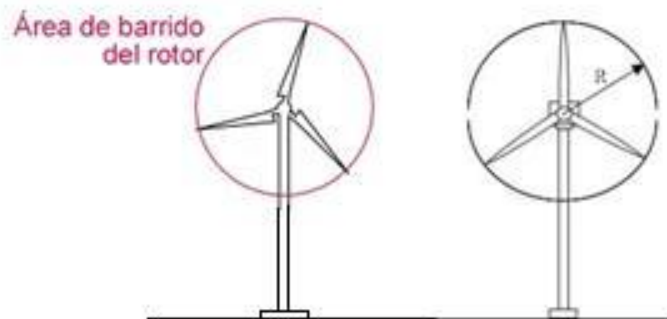


Figura 5. 1. Área de barrido rotor de eje horizontal. Fuente: (MEGAWIND, 2006)

Al seleccionarse una turbina de eje horizontal como muestra la figura 5.1, el área de barrido se calcula como $A = \pi R^2$, siendo esta área la que capta la potencia disponible de viento y la transforma en energía cinética que luego es aprovechada para mover un generador que es el que entregará la potencia útil (P_u) que se requiere. Esta transformación de energía se muestra en la figura 5.2.

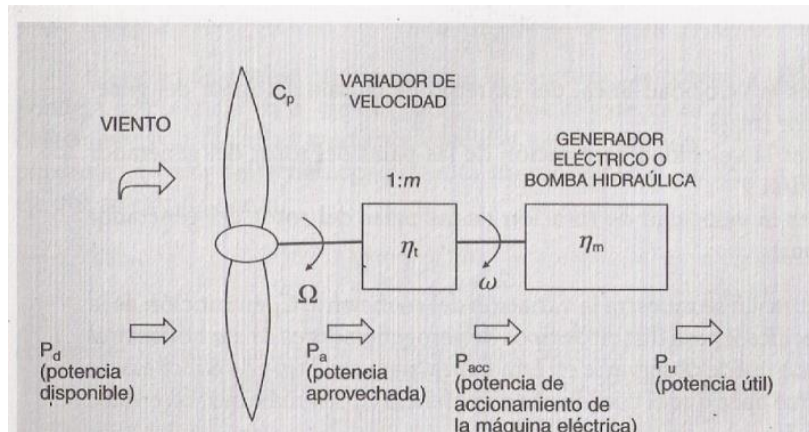


Figura 5. 2. Transformaciones de energía en sistemas conversores de energía eólica.
Fuente: (Villarrubia, Energía Eólica, 2004)

Es conveniente ahora definir las siguientes potencias y rendimientos:

Potencia disponible (P_d). Potencia contenida en el viento debida a su energía cinética.

Potencia aprovechada (P_a). Es la potencia que capta el rotor del eje de la máquina y que es usada para accionar la caja multiplicadora de velocidad. Puede calcularse por medio de la siguiente relación:

$$P_a = C_p P_d$$

Donde:

C_p = Coeficiente de potencia.

El valor teórico de este coeficiente fue determinado por el físico alemán Albert Betz, que indica que una eólica puede como máximo capturar el 59,3 % de la energía cinética del viento, sin embargo no considera todos los factores que influyen en este mecanismo como son la resistencia aerodinámica de las palas, la pérdida de energía por la estela generada en la rotación, la compresibilidad del fluido, la interferencia de las palas.

El rendimiento práctico del aerogenerador depende del tipo de rotor que se esté utilizando, además del rendimiento de los diversos mecanismos que lo componen, material de las palas, etc., esto hace que el rendimiento de una turbina esté en el orden de 46 %.

En la figura 5.3 se muestra la variación del coeficiente C_p en función de la velocidad específica λ para distintos tipos de aerogeneradores de eje horizontal y vertical donde se puede ver que para cada tipo de máquina existe un valor de λ que hace que C_p sea máximo.

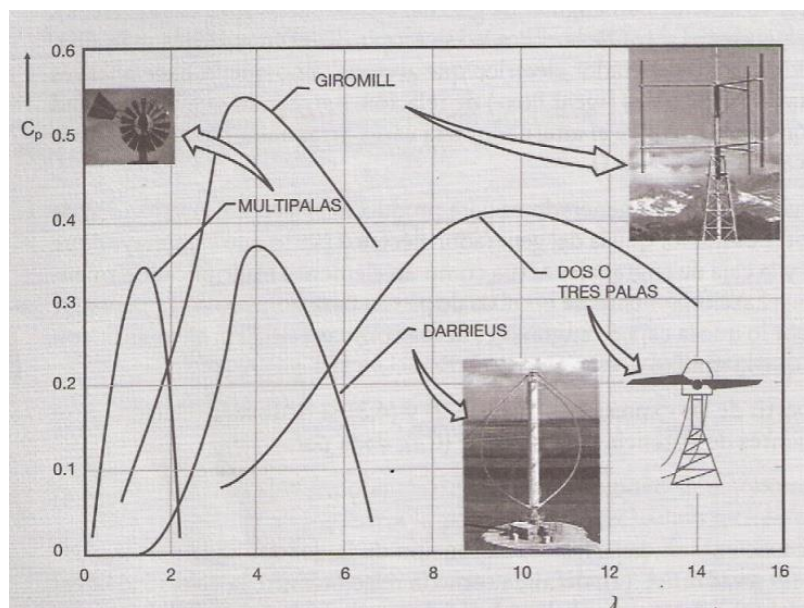


Figura 5. 3. Ejemplo de variación del coeficiente de potencia vs Velocidad específica.
Fuente: (Villarrubia, Energía Eólica, 2004)

Potencia de accionamiento (P_{ac}). Es la potencia a la salida del multiplicador de velocidad utilizada por poner en movimiento el generador eléctrico y se obtiene a través de la relación:

$$P_{ac} = \eta_m P_a$$

Donde:

η_m = Rendimiento del generador eléctrico.

Potencia útil (P_u). Potencia que finalmente entregará el generador eléctrico que se evalúa con la expresión:

$$P_u = \eta_g P_{ac}$$

Donde:

η_g = Rendimiento del generador eléctrico. Para el caso de generadores de imanes permanentes (GIP) el rendimiento de estos se estima entre 70% al 75%.

De este análisis se puede ver que la potencia útil es igual a:

$$P_u = \eta_m \eta_g C_p P_d \quad (a)$$

En el apartado 2.2.10. se definió la potencia disponible como:

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

Además, Según Villarrubia (2004), se define como velocidad eficaz “a aquella velocidad que debería tener el viento durante todo el año, para presentar una densidad de potencia disponible igual a la que tiene en realidad” y que es igual a la raíz cúbica de la velocidad media cúbica $\langle v^3 \rangle$, la potencia disponible es:

$$P_d = \frac{1}{2} \rho A \langle v^3 \rangle \quad (b)$$

Reemplazando la ecuación (b) en la (a), tomando en cuenta la relación para el cálculo del área (A) de barrido y despejando R se obtiene la siguiente expresión para el cálculo del radio de la turbina:

$$R = \left[\frac{2P_u}{\pi \eta_m \eta_g C_p \delta \langle v^3 \rangle} \right]^{0.5} \quad (5.1)$$

Donde:

$\eta_g = 0,7$ como parámetro base de diseño.

$\eta_m = 1,0$ debido a que el generador va conectado directamente al eje de la turbina por ser un generador de imanes permanentes.

$C_p = 0,42$ como parámetro base de diseño para un rotor de eje horizontal.

$\delta = 0,899 \text{ kg/m}^3$ Densidad media del aire en García Moreno.

$$\langle v^3 \rangle = 308,96 \frac{\text{m}^3}{\text{s}^3}$$

Reemplazando valores, El radio R es igual a 1,19 m.

La velocidad eficaz es siempre mayor que la velocidad media, por lo que si usáramos para el cálculo el valor de esta velocidad media el tamaño del rotor se incrementa. Este aumento captará mayor energía de viento, que ayudará a compensar las pérdidas debido a los aparatos electrónicos como reguladores de carga e inversores. Se fija entonces el valor del radio de la turbina en $R = 1,5\text{m}$ para el presente diseño.

5.5.1.3. Diseño de los álabes de la turbina

Para obtener energía eléctrica con una turbina movida por el viento, es necesario que ésta tenga la suficiente velocidad de rotación para poder accionar el generador; esto se logra si el álabe tiene una sección transversal aerodinámica y el menor número de álabes.

Selección del Perfil.- En el Apartado 2.2.16 se han expuesto los diferentes tipos de perfiles y se ha explicado con detalle la nomenclatura de los perfiles NACA, debido a que son los más utilizados en la generación eólica y concretamente los perfiles NACA de 4 y 5 cifras.

Respecto a los perfiles NACA-4 cifras, existen básicamente 3 familias que se emplean en aerogeneradores (Bazán, 2013).

En primer lugar los perfiles 00XX, especialmente el 0015 (Figura 5.4), que tienen un perfil totalmente simétrico pero que se han destinado básicamente a aerogeneradores de eje vertical.

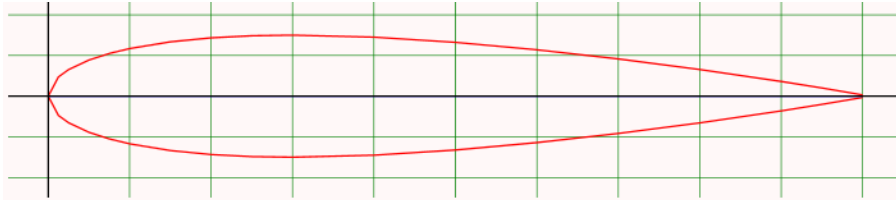


Figura 5. 4. Gráfica de un perfil NACA 0015 generado con JAVAFOIL.

La segunda familia serían los perfiles NACA-4 cifras del tipo 24XX. Estos perfiles son muy versátiles y son utilizados para diferentes utilidades, su Reynolds de trabajo es bajo y el C_L/C_D es bueno (Figura 5.5.). Al no presentar caras convexas, le hace un candidato para que la fabricación sea sencilla.

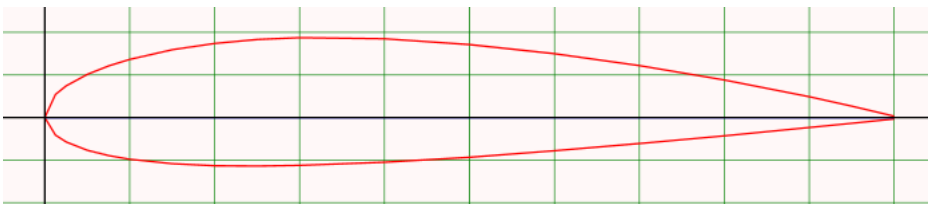


Figura 5. 5. Gráfica de un perfil NACA 24XX generado con JAVAFOIL.

La tercera familia importante en los perfiles NACA-4 cifras son las 44XX (Figura 5.6). Estos perfiles son muy utilizados en mini-aerogeneradores debido a su elevado C_L/C_D , por lo tanto son una buena alternativa. Pero el diseño de su perfil cóncavo hace que la fabricación de este perfil sea más costosa.

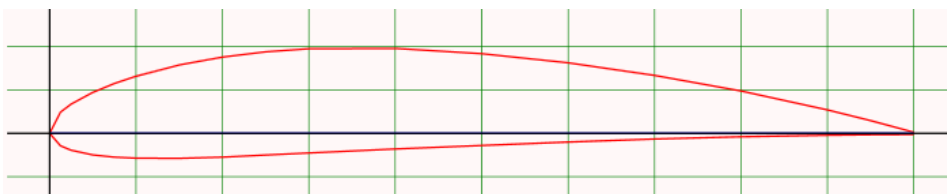


Figura 5. 6. Gráfica de un perfil NACA 44XX generado con JAVAFOIL.

Dentro de los perfiles NACA-5 cifras también se encuentran dos importantes familias utilizadas en aerogeneradores. En primer lugar las series 23-0XX (Figura 5.7), de características muy similares a las 44XX, pero con perfiles simétricos biconvexos que hacen que tengan una geometría más compleja, por el contrario tienen un C_L/C_D algo superior a la serie 44XX.

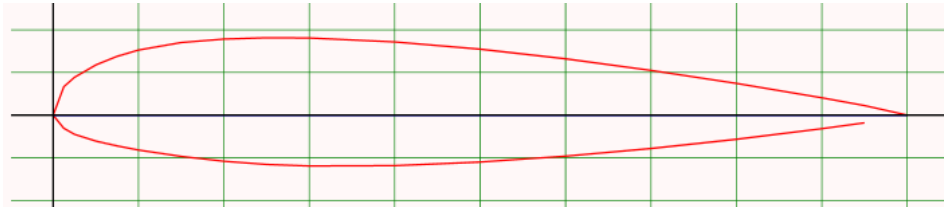


Figura 5. 7. Gráfica de un perfil NACA 23-0XX generado con JAVAFOIL.

La segunda familia es la 6X-2XX (Figura 5.8). Pero sus características son más propicias para aerogeneradores con diámetros elevados, superiores a los 20m, y por ello se ha extendido su utilización en aerogeneradores de media y alta potencia y no a los mini-aerogeneradores.

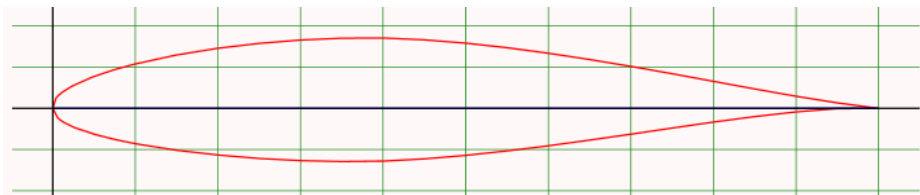


Figura 5. 8. Gráfica de un perfil NACA 6X-2XX generado con JAVAFOIL.

Existe la opción de realizar la geometría de la pala con diferentes tipos de perfil, pero queda descartado por la complejidad de los cálculos.

Por lo tanto, se descartan los perfiles NACA-00XX por simplicidad y porque son básicamente utilizados en aerogeneradores verticales. Y los NACA 6X-2XX ya que se utilizan en aerogeneradores de gran tamaño.

Se ha seleccionado luego de este análisis el perfil NACA 4415, cuya geometría generada en el programa Javafoil se muestra en anexo 5-A, con estas coordenadas se obtuvo el siguiente perfil mostrado en la figura 5.9

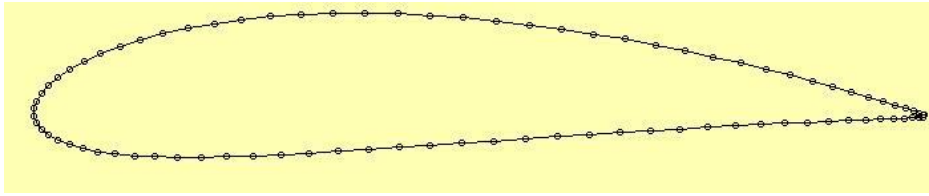


Figura 5. 9. Perfil NACA 4415 generado con JAVAFOIL.

Mediante el mismo programa se ha determinado el diagrama polar (Figura 5.10) para un número de Reynolds calculado de 500000.

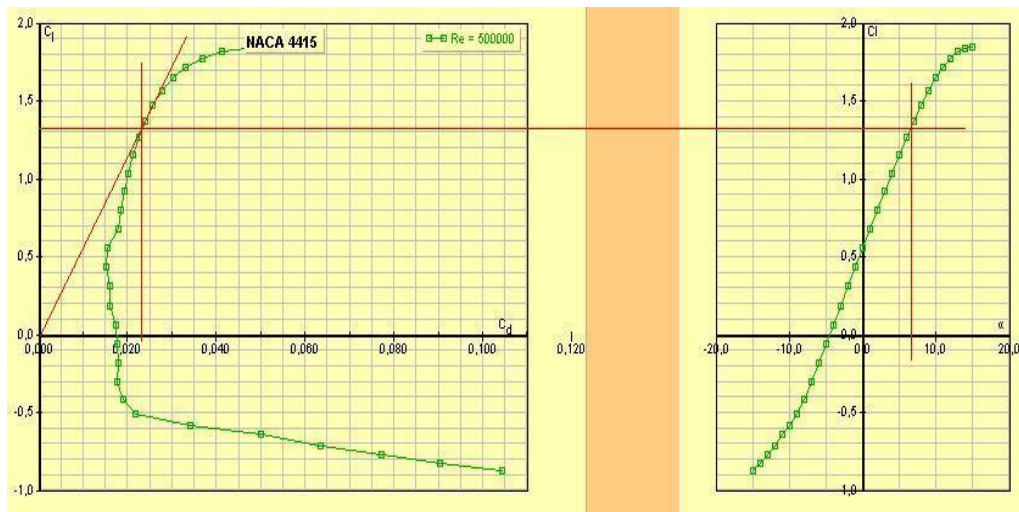


Figura 5. 10. Diagrama polar NACA 4415 generado con JAVAFOIL.

Obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla 5.2.

Tabla 5. 2. Resultados del diagrama polar perfil NACA 4415.

Coeficiente de sustentación C_L	Coeficiente de arrastre C_D	Ángulo de ataque α	Relación mínima C_D/ C_L
1,31	0,023	6,5°	0,0175

Como se puede apreciar, este perfil presenta un elevado coeficiente de sustentación, necesario para garantizar una velocidad de rotación alta del rotor.

En base al radio calculado se procede a diseñar el álabe en función de las siguientes ecuaciones:

$$C = \left[\frac{8\pi r_i}{BCL} \right] (1 - \cos\gamma) \quad (5.2)$$

$$\gamma = \frac{2}{3} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_{ri}} \right) \quad (5.3)$$

$$\lambda_{ri} = r_i \frac{\lambda}{R} \quad (5.4)$$

$$\beta = \gamma - \alpha \quad (5.5)$$

Dónde:

C = Cuerda del perfil (mm).

r_i = Radio local (mm).

B = Número de álabes seleccionado.

γ = Ángulo de viento ($^{\circ}$ sexagesimal).

β = Ángulo de calaje ($^{\circ}$ sexagesimal).

λ_{ri} = Relación de velocidades local.

Para el cálculo, se divide al radio en un número de N de estaciones (10 a 15), correspondiendo cada parte medida desde el centro de giro, un valor de radio r_i .

Los resultados se muestran en la tabla 5.3.

Tabla 5. 3. Resultados del cálculo de cuerda y ángulo de torsión para diez estaciones.

Estación	r_i (mm)	λr	γ	α	β	C (mm)
1	150	0,6	39,36	6,5	32,86	217,56
2	300	1,2	26,54	6,5	20,04	202,13
3	450	1,8	19,37	6,5	12,87	162,89
4	600	2,4	15,08	6,5	8,58	132,13
5	750	3	12,29	6,5	5,79	109,92
6	900	3,6	10,35	6,5	3,85	93,64
7	1050	4,2	8,93	6,5	2,43	81,36
8	1200	4,8	7,85	6,5	1,35	71,83
9	1350	5,4	6,99	6,5	0,49	64,25
10	1500	6	6,31	6,5	-0,19	58,08

Los resultados muestran un álabe que puede resultar de difícil construcción debido a que el borde de salida es curvo, además de su gran tamaño, lo que resultaría más costoso. Esto se muestra en la figura 5.11, donde se ha graficado la variación de la longitud de la cuerda vs la estación correspondiente.

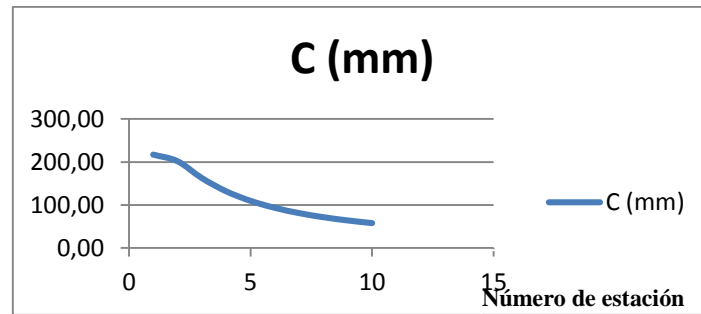


Figura 5. 11. Variación de la cuerda vs posición de la estación.

Una buena alternativa para este problema es construir el álabe si es linealizado de manera que el borde de salida sea una línea recta; esto se lo realiza resolviendo las siguientes ecuaciones para encontrar los coeficientes a_1 , a_2 , a_3 y a_4 para valores de r_i iguales a:

$$r_i = 0.5R \text{ y } r_i = 0.9R \quad (5.6)$$

$$C = a_1 r_i + a_2 \quad (5.7)$$

$$\beta = a_3 r_i + a_4 \quad (5.8)$$

De la tabla anterior, para $r_i = 0.5R = 750 \text{ mm}$ se obtiene valores de cuerda y ángulo de calaje: $C = 109,92 \text{ mm}$ $\beta = 5,79^\circ$ y para $r_i = 0,9R = 1350 \text{ mm}$: $C = 64,25 \text{ mm}$ $\beta = 0,49^\circ$

De las ecuaciones (5.7) y (5.8) se forman las siguientes ecuaciones:

- $109.92 = 750a_1 + a_2$
- $64.25 = 1350a_1 + a_2$

- $5.79 = 750a_3 + a_4$
- $0.49 = 1350a_3 + a_4$

Resolviendo las ecuaciones anteriores se obtiene:

- $a_1 = -0,076$
- $a_2 = 167$
- $a_3 = -0,0088$
- $a_4 = 12,415$

Reemplazando estos valores en las ecuaciones (5.7) y (5.8) se obtiene las dos ecuaciones generales para el cálculo de la cuerda y el ángulo de calaje:

$$C = -0.076r_i + 167$$

$$\beta = -0.0088r_i + 12.415$$

Estas ecuaciones se aplican para cada estación alejadas del centro de giro una distancia r_i dando como resultado un álabe *linealizado*. Los parámetros obtenidos se muestran en la tabla 5.4.

Tabla 5. 4. Cálculo de los parámetros de construcción del álabe.

Estación	r_i	β	C
	(mm)	(°)	(mm)
1	100	11,535	159,4
2	200	10,655	151,8
3	300	9,775	144,2
4	400	8,895	136,6
5	500	8,015	129
6	600	7,135	121,4
7	700	6,255	113,8
8	800	5,375	106,2
9	900	4,495	98,6
10	1000	3,615	91
11	1100	2,735	83,4
12	1200	1,855	75,8
13	1300	0,975	68,2
14	1400	0,095	60,6
15	1500	-0,785	53

En la figura 5.12 se aprecia el efecto de *linearización* del borde de salida.

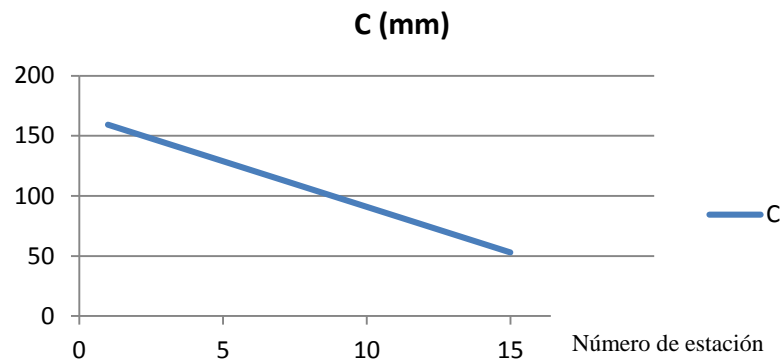


Figura 5. 12. Alabe linealizado.

De los datos obtenidos se ha modelado el álabe en el programa Solidworks, que se muestra en la figura 5.13.



Figura 5. 13. Modelado del álabe programa SolidWork.

Materiales de las palas

Uno de los aspectos más importantes en el diseño de palas es la elección de los materiales empleados en su fabricación. Una selección adecuada de estos materiales es vital ya que las propiedades estructurales y la vida útil de las palas depende en gran medida de los materiales utilizados. El material del que se

componen las palas es un aspecto muy importante ya que éste debe de responder a frecuentes variaciones en la velocidad del viento y a ráfagas de vientos fuertes. Por ello el material de las palas debe ser ligero, indeformable, resistente a la fatiga mecánica, resistente a la erosión y a la corrosión y económico.

Tipos de materiales.- Para satisfacer estas solicitaciones hay varias alternativas posibles para la fabricación de las palas, generalizando se pueden utilizar tres tipos de materiales:

- Madera: sencilla, ligera, fácil de trabajar y resiste bien a la fatiga.
- Metales: se emplean aleaciones ligeras de aluminio con silicio o con magnesio ya que con estos materiales se obtienen costes muy bajos si se producen en grandes series. Una de las desventajas es que el aluminio resiste mal a la fatiga, lo cual limita su empleo.
- Materiales poliméricos, resinas, fibras y plásticos: destacan por su bajo peso, insensibilidad a la corrosión y su buena resistencia a la fatiga pero el coste es más elevado que en los casos anteriores.

Para esta propuesta se ha considerado el uso de madera, ya que es fácil de modelar, barata y se la puede conseguir en cualquier lugar de la serranía del Ecuador y ha demostrado que puede resistir largos periodos de tiempo expuestas a los climas más hostiles (Vinuela, 2012).

El uso de materiales como aluminio queda descartado por el peso, problemas de desgaste en la punta del álabe, alto costo en el moldeo. Las de fibra tienen el inconveniente de que se necesitan de moldes para su conformado, lo que encarecería notablemente el diseño (Santillán, 2006).

5.5.1.4. Diseño mecánico de los álabes

Se ha considerado en esta propuesta recurrir a un programa de simulación de comportamiento mecánico para facilitar el cálculo dinámico del rotor ante las diversas fuerzas que actuarán sobre éste.

Para la simulación del alabe NACA 4415 se ha utilizado como material madera de laurel, que es muy utilizada en nuestro medio y sobre todo de bajo costo, el mismo que tiene las siguientes propiedades mecánicas que se muestra en la tabla 5.5 (Vinueza, 2012):

Tabla 5. 5. Propiedades mecánicas de madera de laurel. Fuente: (Vinueza, 2012)

Módulo de elasticidad (N/m ²)	Módulo Cortante	Límite de Tracción (N/m ²)	Límite de Compresión (N/m ²)	Límite de Elasticidad (N/m ²)	Coefficiente de Poisson	Densidad (kg/m ³)
88,6·10 ⁸	71·10 ⁶	22,5·10 ⁶	31,8·10 ⁵	45,5·10 ⁶	0.3	390

Fuerzas que actúan sobre el alabe.- Antes de comenzar el diseño, se modela el álabe junto con los discos que servirán de sujeción y que irán conectados en conjunto al eje del rotor, como se muestra en la figura 5.14.

Las cargas que actúan sobre el rotor se pueden clasificar en estáticas y dinámicas.

La fuerza centrífuga es una carga estática perpendicular al eje de giro; la pala suele colocarse ligeramente inclinada, proporcionando dicha fuerza centrífuga una componente de tracción a lo largo de la pala y otra de flexión en sentido contrario al de las cargas aerodinámicas; los esfuerzos estáticos que dichas cargas originan son muy pequeños.

Las cargas dinámicas son debidas al giro de la pala existiendo también cargas transitorias debidas a las maniobras de la máquina.

La gravedad actúa como una carga periódica que se comporta como una fuerza oscilante en el plano del rotor, apareciendo una desalineación por cuanto el rotor nunca funciona perpendicularmente a la acción del viento, sino que tiene oscilaciones que generan cargas dinámicas.

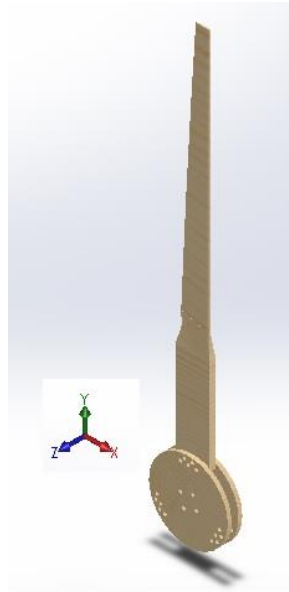


Figura 5. 14. Ensamblaje del álabo con los discos de fijación.

La velocidad de diseño debe ser un 70% mayor que la velocidad media (International Electrotechnical Commission, 2008), si la velocidad media es de 6,1 m/s a 12 metros de altura, entonces la velocidad de diseño será:

$$v_{diseño} = 10,064 \text{ m/s}$$

Fuerza centrífuga (F_{Cent}). La fuerza centrífuga que empuja las palas hacia afuera y tiende a arrancarlas del cubo del rotor viene dada por la ecuación:

$$F_{Cent} = \frac{1}{2} m_{pala} \frac{U_G^2}{r_G} \quad (5.9)$$

Donde:

m_{pala} = Masa de la pala. Este valor se estima del modelado que se realizó anteriormente, por lo que: $m_{pala} = 0,82 \text{ kg}$

r_G = Posición del centro de gravedad con respecto al centro de giro del rotor. Del álabo modelado $r_G = 1117,85 \text{ mm}$

U_G = Velocidad periférica en el centro de gravedad de la pala, que se puede calcular con la expresión:

$$U_g = \lambda_{cg} v_{diseño} \quad (5.10)$$

En la que λ_{cg} es la velocidad específica medida en el centro de gravedad de la pala. Para su cálculo, se usa la ecuación (5.4):

$$\lambda_{cg} = \lambda \frac{r_G}{R}$$

Con lo que:

$$\lambda_{cg} = 4,47$$

Por lo tanto:

$$U_G = 45 \text{ m/s}$$

Reemplazando en la ecuación (5.9) de fuerza centrífuga:

$$F_{Cent} = 742,72 \text{ N}$$

Fuerza Aerodinámica (F_{aer}). Una fórmula aproximada para determinar la resistencia aerodinámica de un aerogenerador en rotación, inmerso en una corriente de aire de velocidad v , se puede expresar en la forma:

$$F_{aer} = 0,062A(v_{diseño})^2 \quad (5.11)$$

En la que A viene dada en m^2 y $v_{diseño}$ en m/s .

$$F_{aer} = 435,1 \text{ N}$$

La fuerza aerodinámica actúa en la totalidad de palas del rotor, por lo que el valor obtenido hay que dividirlo para el número de palas seleccionado ($B=3$) (Díez, 1993).

$$F_{aer} = 145 \text{ N}$$

Momento Flector (M). El momento flector de la pala se calcula a partir de las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre las mismas, que son paralelas al eje de giro, a la distancia r_G del mismo, de la forma:

$$M = r_G F_{aer} \quad (5.12)$$

$$M = 162,12 \text{ N.m}$$

El punto de máximo esfuerzo, que a su vez está sometido a una fatiga máxima, se encuentra situado en la zona donde la pala se une al cubo del rotor.

Momento de Torsión (M_r). Este momento actúa en el plano de rotación, estando localizada la tensión máxima en la zona de implantación de cada pala con el rotor. El momento de torsión de las palas respecto al eje de giro (par motor), viene dado por la expresión:

$$M_r = \frac{P_{acc} R}{\lambda v_{diseño}} \quad (5.13)$$

La potencia de accionamiento está en Watts, diámetro del rotor D en metros y la velocidad de diseño en m/s.

Al no existir caja multiplicadora la potencia de accionamiento es igual a la potencia aprovechada:

$$P_{acc} = P_a = C_p P_d$$

Se ha establecido que:

$$P_d = \frac{1}{2} \delta A (v_{diseño})^3$$

Por lo que:

$$P_{acc} = 1\,360,53 \text{ W}$$

Por lo tanto el momento de torsión es de:

$$M_r = 33,8 \text{ N.m}$$

El par motor así obtenido es el total, por lo que para calcular el par originado por cada pala, habrá que dividirlo por el número de palas B.

$$M_r = 11,27 \text{ N.m}$$

Propiedades físicas del alabe.- Estas propiedades se han obtenido del software SolidWorks al haber realizado su respectivo modelado.

Centro de masa del alabe: (milímetros)

$$X = 8,7$$

$$Y = 565,28$$

$$Z = 28,89$$

Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia (gramos·milímetros²) medidos desde el centro de masa:

$$I_x = (0.04, 1.00, -0.09) \quad P_x = 3773272.76$$

$$I_y = (-0.05, 0.09, 0.99) \quad P_y = 66478282.92$$

$$I_z = (1.00, -0.04, 0.06) \quad P_z = 69727665.83$$

Momentos de inercia: (gramos * milímetros²) medido desde el centro de masa y alineado con el sistema de coordenadas resultante.

$$L_{xx} = 69611395,30 \quad L_{xy} = 2631440,34 \quad L_{xz} = -411027,25$$

$$L_{yx} = 2631440,34 \quad L_{yy} = 4395646,05 \quad L_{yz} = -5655245,82$$

$$L_{zx} = -411027,25 \quad L_{zy} = -5655245,82 \quad L_{zz} = 65972180,17$$

Momentos de inercia: (gramos * milímetros²) medido desde el sistema de coordenadas de salida.

$$I_{xx} = 237785884,57 \quad I_{xy} = 3560662,04$$

Aplicamos las fuerzas y momentos en el centro de gravedad del álabe, una vez que se ha ingresado las propiedades de la madera a los elementos sólidos, esto se muestra en la figura 5.15:



Figura 5. 15. Mallado del álabe para aplicación de cargas.

Resultados del análisis

Una vez que se ha mallado el elemento a analizar y colocado las cargas calculadas, el programa inicialmente arroja las tensiones que se muestran en la tabla 5.4

Tabla 5. 6. Análisis de tensiones nodales.

Nombre	Tipo	Mín.(N/m ²)	Máx. N/m ²)
Tensiones1	Tensión de Von Mises	8656.42 Nodo: 172256	2.235x10 ⁷ Nodo: 69501

En la figura 5.16 se muestra en forma de gráfico el análisis de von Mises.

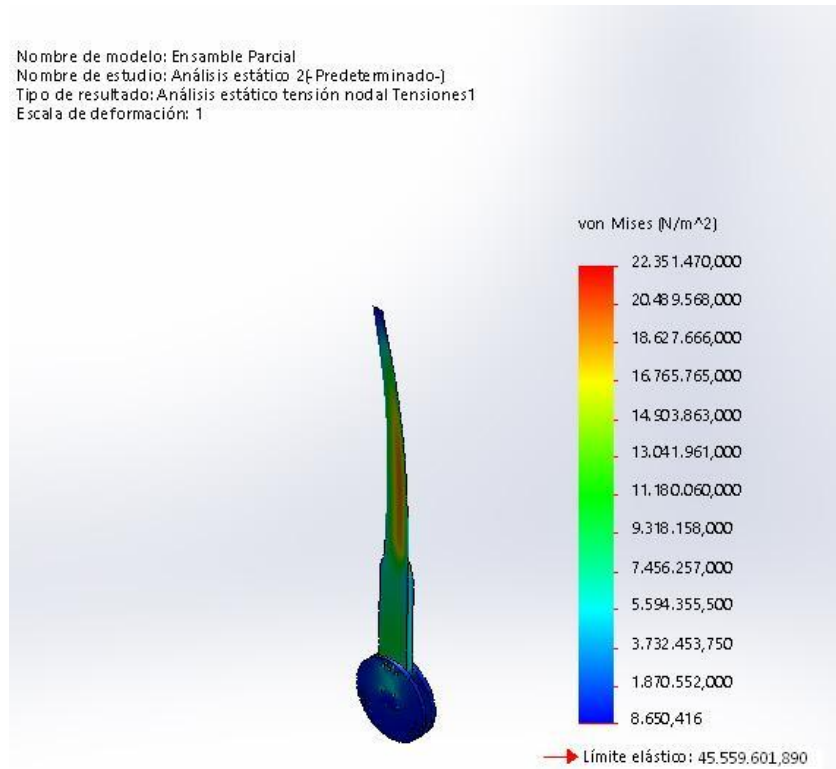


Figura 5. 16. Análisis de tensiones.

En base al estudio realizado, se observa que el alabe y el disco llegan a sufrir el máximo esfuerzo de **22,35 MPa** en el **Nodo: 69501** y que es muy inferior al módulo de elasticidad de la madera de laurel es de $45,5 \times 10^6 \frac{N}{m^2}$

Los desplazamientos originados por las cargas aplicadas se muestran en la tabla 5.7.

Tabla 5. 7. Desplazamientos generados.

Nombre	Tipo	Mín.	Máy.
Desplazamientos1	URES: Desplazamientos resultantes	0 mm Nodo: 120283	97,8062 mm Nodo: 67792

Se puede determinar que el alabe y el disco llegar a sufrir un desplazamiento resultante máximo de **97,8062 mm** en el **Nodo 67792** que se produce tanto por las

fuerzas: aerodinámica y centrífuga; los momentos flector y torsor y el peso del alabe. Gráficamente, se muestran estos resultados en la figura 5.17

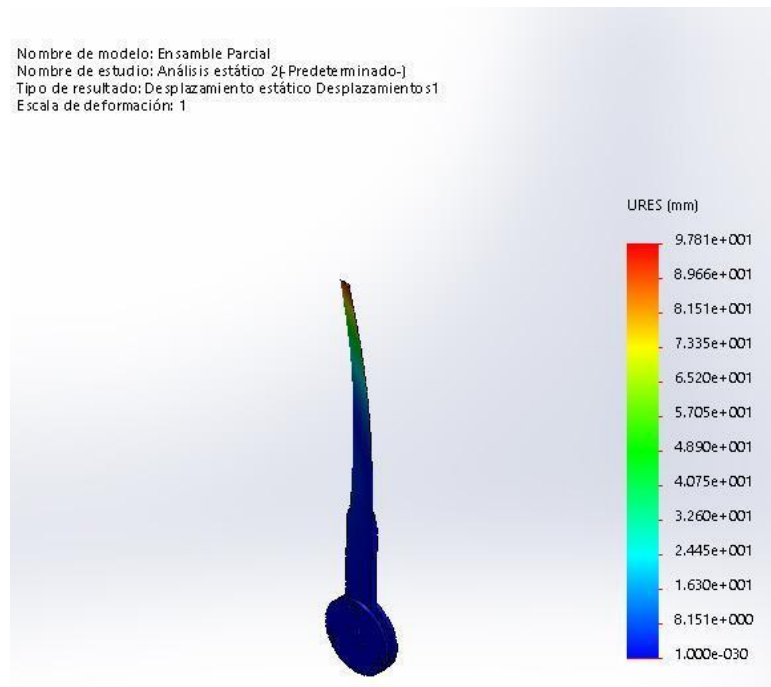


Figura 5. 17. Análisis de deformaciones.

Estudio de Deformaciones unitarias.- Continuando con el análisis reportado por el programa, se muestra en la tabla 5.8 El análisis de deformaciones unitarias sobre el álabo y en la figura 5.18 se observa esto de manera gráfica.

Tabla 5. 8. Deformaciones unitarias.

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	1.15499e-006 Elemento: 102818	0.00195701 Elemento: 72677

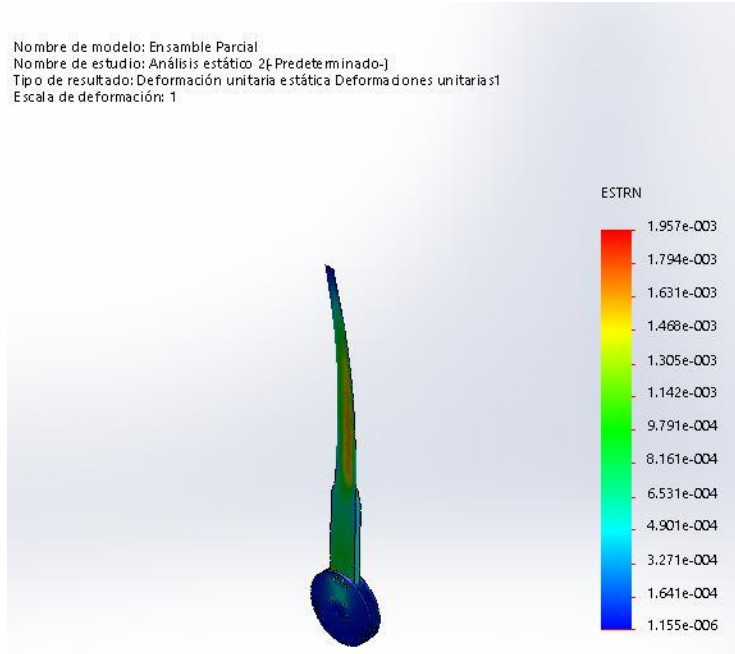


Figura 5. 18. Análisis de deformación.

Para concluir el análisis de los resultados, el factor de seguridad de todo el ensamble (disco y alabe) como se puede apreciar en la figura 5.19 que indica el factor de seguridad mínimo, **FDS_{mín}** es de **2,518**, con lo que se concluye que los **álabes serán capaces de resistir los esfuerzos generados por el viento.**

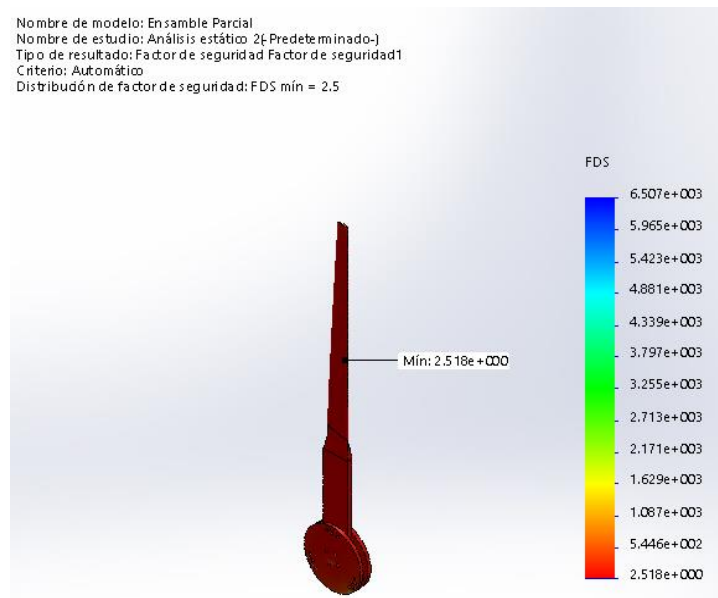


Figura 5. 19. Factor de seguridad dinámico.

5.5.2. Selección del generador de imanes permanentes

Un generador de imanes permanentes es un generador para bajas velocidades que puede ser acoplado directamente al eje de la turbina. Son dos los motivos para que se proyecte el uso de generadores acoplados directamente en el aprovechamiento de la energía del viento para la generación de energía:

- El costo de la energía producida, ya que con esto se disminuye el costo del tren de potencia, y las pérdidas por conversión de energía.
- Reducción del ruido. Esto es muy importante, especialmente si el generador será instalado en zonas habitadas.

Del análisis realizado en el apartado 4.1.2. se constató que Blue Energy utiliza en sus diseños un generador de imanes permanentes propuesto por Hugh Piggott que ha demostrado por más de 15 años ser muy efectivo en la construcción de máquinas eólicas de pequeña escala, siendo utilizado en muchos lugares del mundo por su facilidad de construcción y adaptabilidad a situaciones de clima extremo como las que se dan en sitios rurales, parecidos al lugar de aplicación de esta propuesta.

El generador de imanes permanentes de Blue Energy es de flujo axial de 5 fases con 24 imanes de boro neodimio de grado 40 dispuestos de forma equidistante sobre dos discos de acero que actúan como rotores (12 imanes en cada disco).

Entre los rotores, va dispuesto un estator de diez bobinas que recoge la energía magnética entregada por los imanes como indica la figura 5.20.

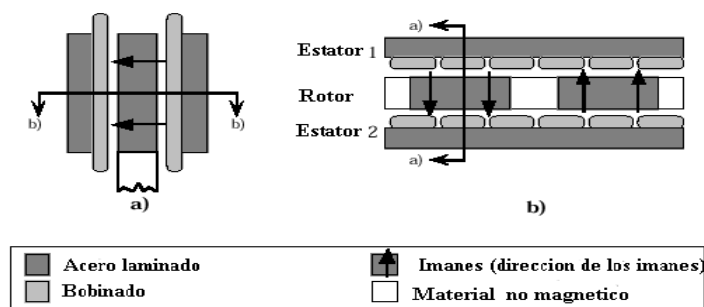


Figura 5. 20. Diagrama de un GIP de flujo axial. Fuente: (Sánchez & Chiroque, 2005)

Para que esto sea posible, los imanes de cada rotor deben estar encarados de forma que un polo norte esté en la misma dirección que el polo sur del imán correspondiente del otro rotor. El generador produce corriente alterna, la misma que debe ser rectificadora y convertida a corriente directa mediante 5 rectificadores, esto producirá una única salida que baja por la torre y conecta una batería.

Las bobinas se construyen a partir de alambre de cobre esmaltado AWG de 1.6 mm de diámetro. Cada una de ellas tiene 67 vueltas, de ahí que sus dimensiones finales fueron de 84x18 mm con un espesor de 18 mm. Para su construcción se utiliza una sencilla máquina fabricada especialmente para el efecto. La figura 5.22 es una fotografía donde se puede apreciar el circuito de bobinas antes de ser encastado en el molde.



Figura 5. 21. Ensamblaje del bobinado del estator.

Cada una de las 10 bobinas tienen dos extremos, uno de estos es soldado a un cable neutro, y los otros serán conectados a los diodos rectificadores.

Tanto los rotores como el estator están encastados en resina de poliuretano reforzada con láminas de fibra de vidrio con el fin de evitar la oxidación y corrosión, además de brindarle gran resistencia. En las fotografías que se muestran en las figuras 5.22 y 5.23, se ve la forma de ensamble del estator y de los rotores, usando moldes especiales de madera y que fue realizado por el autor en la Universidad Técnica de Ambato en el año 2010.



Figura 5. 22. Fotografías donde se muestra el ensamble y encastado de uno de los rotores realizados en la Universidad Técnica de Ambato.



Figura 5. 23. Estator en el molde ya encapsulado.

Tanto los álabes como el generador están unidos por medio de un buje de la rueda de un auto. Al ser diseñados estos bujes para las exigencias de un automotor, se asegura una larga vida útil para el ensamble. El montaje se muestra en la figura 5.24

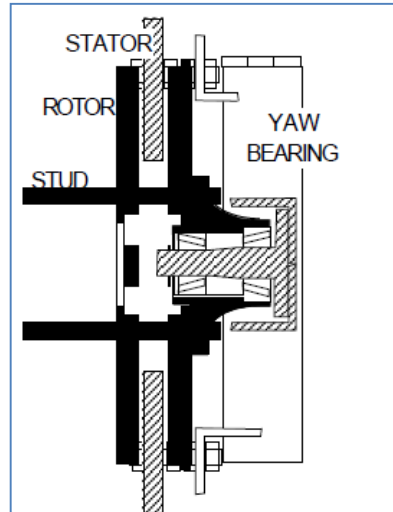


Figura 5. 24. Diagrama que muestra el ensamblaje final de los rotores, el estator utilizando la punta del eje de una rueda de auto. Fuente: (Piggott, 2003)

El elemento mecánico que soporta todo el conjunto anterior se muestra en el siguiente dibujo CAD y en una fotografía de su construcción final (figura 5.26). Justo en el centro del canal, está sujeto el generador por medio de cuatro pernos. Además el canal servirá de apoyo a la caja de rectificadores. Sobre este mismo elemento va montada la veleta.

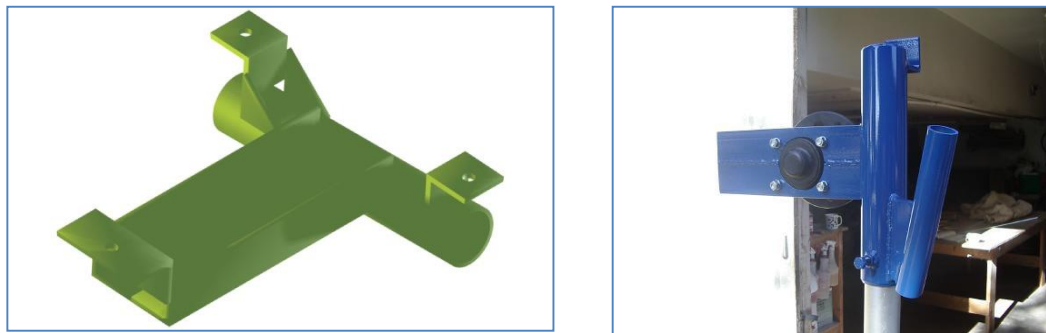


Figura 5. 25. Esquema y fotografía del soporte del generador y la veleta.

De acuerdo a Hugh Piggott, éste asegura que “... se puede obtener 12 V DC a 190 rpm” (Piggott, 2003), por lo que se procede a calcular la velocidad de giro del aerogenerador propuesto mediante la siguiente ecuación:

$$\omega = \left(\frac{30}{\pi}\right) \frac{\lambda(v)}{R} \quad (5.14)$$

Donde:

w = Velocidad de rotación del rotor [rpm]

Reemplazando datos, se obtiene una velocidad de rotación w de 233 rpm, lo que muestra que con este generador se alcanza la velocidad suficiente para cargar una batería de 12 V.

5.5.3. Selección sistema de orientación y control de frenado

Sistema de orientación.- Para la propuesta estudiada se ha adoptado como sistema de orientación el de veleta con las sugerencias de diseño que se muestran a continuación.

La solución con aleta estabilizadora o veleta se emplea principalmente para la orientación de eólicas hasta diámetros de 6 m. Esta solución consiste en una aleta que se acopla al rotor de la eólica tal como se observa en la Fig. 5.26 y mantiene el plano de rotación de las palas perpendicular al viento. Es una solución sencilla y de bajo coste, por eso se utiliza para aerogeneradores de baja potencia.

Para este tipo de dispositivo de orientación de la góndola (diámetros de palas menor a 6 m) se recomienda que la distancia entre el eje de rotación de la góndola (s) y la ubicación de la veleta (m) sea de aproximadamente 4 veces la distancia entre el eje de rotación de la góndola y el plano del rotor ($m = 4 s$).

La superficie de la veleta depende del área barrida por las palas. En el caso de eólicas compuestas por 3 palas la superficie de la veleta tiene que ser el 4 % del área barridas por las palas. (Díez, 1993)

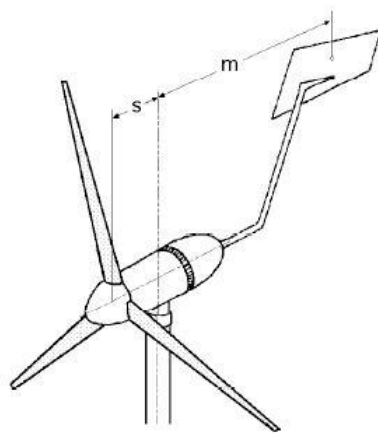


Figura 5. 26. Posición recomendada de la veleta. Fuente: (Díez, 1993)

Sistema de frenado.- Entre los mecanismos de regulación y control de potencia utilizados tradicionalmente en microaerogeneración se tienen: Dispositivo de aleta estabilizadora, palas con “Flaps” incorporados, palas con contrapesos y aerogeneradores basculantes. Las desventajas comparativas de éstos, frente a la propuesta son: poseen inestabilidades en el control de potencia, altos costos debido a sus elementos auxiliares requeridos y, baja confiabilidad de operación.

El método más ampliamente utilizado para pequeños sistemas conversores de energía eólica es el sistema de orientación y regulación por momento de cola (SOPMC) cuyo funcionamiento se describe en la figura 5.27:

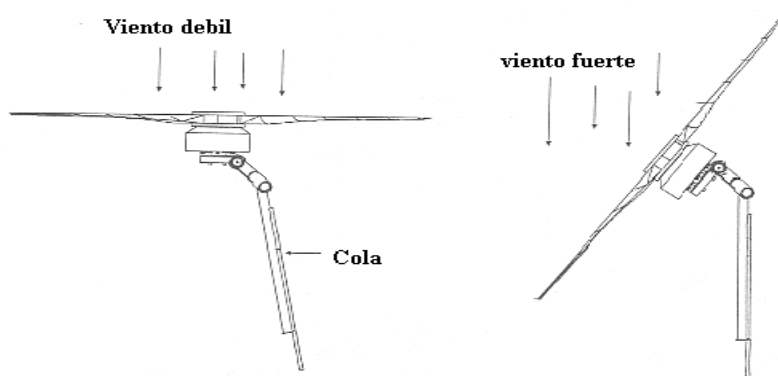


Figura 5. 27. Efecto de frenado provocado por la posición de la veleta con respecto al centro de giro. Fuente: (Piggott, 2003)

Su principio de funcionamiento se basa en hacer que la cola-veleta gire gracias a un mecanismo soporte con pivoteo inclinado. Además el eje del generador debe estar desfasado con respecto al eje del poste de giro.

Tal excentricidad hace que a altas velocidades de viento el rotor venza el momento de inercia de la cola, lográndose en conjunto un bloqueo lento o salida del frente de viento del rotor-generador.

Cuando el viento baja su velocidad, el peso de la cola veleta hace regresar al rotor hacia el frente de las líneas de corriente de viento, permitiendo así la recuperación continua de generación de potencia. Las ventajas del diseño propuesto frente a los mecanismos masificados son:

- Dispositivo compacto y sin mecanismos auxiliares
- Estabilidad de operación. No se produce vibraciones del sistema
- Construcción no dificultosa
- Continuidad y autonomía de operación en todo rango de velocidades
- Bajos costos de fabricación. Los costos de operación prácticamente son nulos, basta engrasar una vez al año al pivote.

En un trabajo de investigación realizado en la Universidad de San Marcos en Lima, Perú (Chávez, 2012) se determinó la geometría óptima de este sistema de acuerdo a dos parámetros: el ángulo relativo entre el eje del rotor y el eje de la cola veleta y el ángulo vertical entre el eje del mástil y la bisagra o pivote, como se indica en las figuras 5.28 y 5.29.

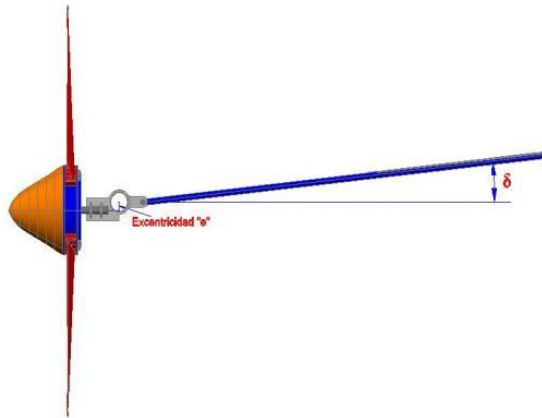


Figura 5. 28. Angulo de eje de cola. Fuente: (Chávez, 2012)

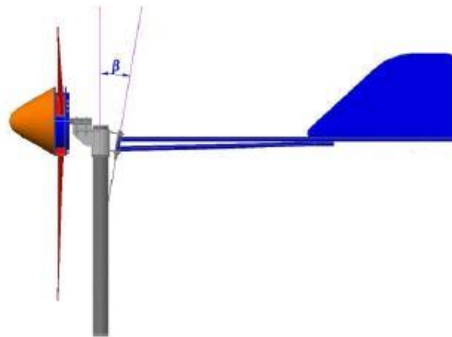


Figura 5. 29. Angulo de pivote de cola. Fuente: (Chávez, 2012)

Los valores óptimos de estos ángulos se determinaron mediante un balance de fuerzas y momentos sobre la cola veleta y el sistema completo, estableciéndose que dichos ángulos deben tomar los valores siguientes:

- Excentricidad entre eje rotor y eje de poste, e : 6 cm
- Angulo de pivote de cola, β : 8°
- Angulo de eje de cola, δ : 6°

Esta información es la que se ha tomado para el diseño de este sistema en la presente propuesta pudiéndose controlar sobrevelocidades superiores a los 10 m/s, según los autores del documento.

5.6. Estudio de impactos

En este apartado se realiza un análisis económico, social y ambiental que pudiera tener este proyecto.

5.6.1. Impacto económico

Para la evaluación de la inversión a realizar en la propuesta de este tema de investigación se realiza un análisis de los costos en función de los costos directos e indirectos, costos de mano de obra y otros adicionales para luego comparar el costo total con el de un aerogenerador comercial que tenga similares características que el aquí propuesto.

Costos directos.- Son los precios que tiene cada uno de los materiales empleados para la construcción del aerogenerador que se detallan en el anexo 5-B dando un valor total por este concepto de 505,07 dólares americanos.

Costos indirectos.- Son todos los gastos correspondientes a la utilización de maquinaria, costo de mano de obra, entre otros que no se ven reflejados directamente en la construcción. En la tabla 5.9 se detalla la maquinaria y herramientas básicas que se pueden utilizar para la construcción del aerogenerador y que se dispone en cualquier taller del Ecuador.

Tabla 5. 9. Costos indirectos del aerogenerador.

Maquinaria	Costo/hora (\$/h)	Estimación de horas empleadas	Coste (\$)
torno	5,5	8	44
Taladro de pedestal	1	10	10
Suelda eléctrica	1,5	6	9
pulidora	1,5	3	4.5
Herramientas varias			40
		SUBTOTAL	107,5

Costo de mano de obra.- es el valor que el personal gana por transformar la materia prima en producto final. En la tabla 5.10 se muestra que sería suficiente

solamente dos personas para la construcción de la máquina eólica, con un costo de mano de obra basado en el salario mínimo vigente en Ecuador.

Tabla 5. 10. Costo de mano de obra.

N° de trabajadores	Costo/hora	Horas empleadas (c/u)	Subtotal (USD)	Total (USD)
2	2,25	100	225	450

Sumando los valores anteriores, se obtiene un costo total para construcción del aerogenerador de 1 062,57 (dólares estadounidenses).

Costo de aerogeneradores comerciales.- Existen en el mercado infinidad de modelos de aerogeneradores con potencias nominales muy parecidas a la de esta propuesta (200W), pero que resultan bastante caros traerlos a Ecuador por las nuevas regulaciones a las importaciones que son ley en estos momentos.

Los aerogeneradores Bornay son los que tienen las mejores referencias en cuanto a calidad de producto, siendo su precio estimativo de 4000 euros para un modelo de 1500 W (SoloStocks, 2014)

Proviento S.A es la única empresa que distribuye en el país aerogeneradores. Estos son de fabricación china marca ZONHAN de 750 W de potencia nominal y tienen un costo de \$ 1200 e incluye el generador, los álabes, la veleta y el controlador. (Proviento, 2014). Los detalles técnicos de esta máquina se encuentran en el anexo 5-C

Es claro que el aerogenerador de baja potencia propuesto en esta tesis es mejor desde el punto de vista económico.

5.6.2. Impacto Social

El primer aspecto a destacar es el hecho de que la producción de electricidad a partir del viento es un proceso “limpio” tal y como es aplicado el término actualmente, es decir, que elimina la contaminación en el origen y no al final del proceso a través de costosas medidas correctoras. A diferencia de otras fuentes

convencionales, la producción de energía eólica no provoca la emisión de grandes cantidades de contaminantes atmosféricos, ni un gran volumen de residuos sólidos.

Impacto socioeconómico regional

La instalación de pequeños aerogeneradores en zonas pobres como la que se ha estudiado donde la energía eléctrica de la red convencional es difícil de acceder por cuestiones económicas, tiene una considerable importancia desde el punto de vista social y de los efectos positivos que permite, debido tanto a la creación de puestos de trabajo directos como a los indirectos. (Sánchez & Chiroque, 2005)

Los beneficios a los que la población de García Moreno accedería se enmarcan en la posibilidad de poder participar tanto en el proceso de fabricación como en el de operación y mantenimiento, así como en la actividad en si (aprovechamiento de la energía eólica).

En cuanto a tecnología, la construcción de un aerogenerador y una instalación eólica, involucra el acercamiento de varios sectores industriales como la industria del metal, fundición, mecanizado y acabados de superficie; industria de componentes eléctricos electrónicos; construcción con fibra de vidrio; componentes mecánicos; y mantenimiento de todos estos, siendo ésta una gran oportunidad para generar empresa y aportar a la nueva matriz productiva y energética que promueve el gobierno de Ecuador.

5.6.3. Impacto ambiental

A la hora de cuantificar la contaminación evitada por la sustitución de fuentes de energías no renovables por energía eólica aparecen varias dificultades: por una parte, resulta difícil valorar las emisiones asociadas a todo el proceso de producción de la energía ya que debe incluir tanto los procesos de extracción del combustible, la construcción de las instalaciones de producción, la operación y mantenimiento, y el tratamiento de los residuos finales. Por otra parte, una vez

obtenidos estos datos su extrapolación a otros espacios geográficos puede ser también compleja ya que los procesos pueden variar de forma importante. Sin embargo, se han realizado importantes estudios que pueden dar una idea de la contaminación evitada por la instalación de un micro aerogenerador en zonas rurales. Según los datos conocidos, se realiza a continuación se realiza una interpolación para nuestro caso de manera que conozcamos de manera aproximada el valor de la cantidad de emisiones reducidas. (Sánchez & Chiroque, 2005)

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

También debe considerarse que el consumo de agua para la generación de la energía eólica es nulo.

Ocupación del terreno.- Algo que se dice en contra del desarrollo de la energía eólica es la gran necesidad de terreno debido a la dispersión de la fuente, en contraposición, por ejemplo, con la gran concentración de la fuente en el caso de la energía térmica. La gran diferencia es que, mientras que en la energía eólica la mayor parte del terreno usado permanece intacto, en las fuentes no renovables el terreno tiene un uso exclusivo para ese aprovechamiento y su recuperación posterior para otros usos es difícil. (Sánchez & Chiroque, 2005)

En el caso del aerogenerador de baja potencia propósito de esta investigación, la ocupación del terreno es mínima y su recuperación tras la fase de desmantelamiento es total.

Riesgo de la avifauna.- Los riesgos para las aves causados por los aerogeneradores son los derivados de la posibilidad de colisión con las palas o con la torre. El movimiento de las palas hace que los aerogeneradores sean más

visibles para las aves que otras estructuras similares: torres eléctricas, antenas. (Ponce, 1996)

Sin embargo, estudios llevados a cabo en varios países sugieren que los aerogeneradores no tienen impacto significativo en la vida de las aves, al compararse con otras actividades humanas.

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

El impacto visual.- El impacto visual depende de la percepción de las personas. Para algunas los aerogeneradores son feos y deterioran el paisaje, mientras que para otras son agradables y representan una tecnología amigable al medio ambiente.

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

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

- La velocidad de giro de las palas. Este factor es el más importante; un incremento del 20 % de la velocidad multiplica por tres el ruido producido.
- El material de que están construidas las palas.
- El diseño de las palas, principalmente el espacio que existe entre el cuerpo de la pala y su extremo. Cuanto más pequeño sea este espacio, menor será el ruido generado.

- La velocidad del viento y sus turbulencias. Este factor puede incrementar tanto el ruido producido por los aerogeneradores, como el ruido ambiental.
- El número de palas.

El ruido que provoca un aerogenerador de baja potencia, entendiendo por baja potencia una potencia inferior a 1kW, es prácticamente inapreciable, ya que a bajas velocidades del viento, al girar las palas tan pequeñas a poca velocidad no producen ruido, y a velocidades entre 4 y 7 m/s y superiores, el ruido que provoca el viento en la atmósfera (debido a que choca con el suelo, árboles o cualquier obstáculo) enmascara al ruido producido por el aerogenerador. (Sánchez & Chiroque, 2005)

5.7. Comprobación de hipótesis

En este apartado se comprueba la hipótesis que condujo este tema de investigación, analizando los datos de potencial eólico y la caracterización del tipo de aerogenerador a usarse.

Sobre el potencial eólico encontrado en García Moreno, barrio La Libertad

A través de la encuesta realizada y la medición de la velocidad del viento en la Parroquia García Moreno, Barrio la Libertad se ha demostrado que el potencial eólico presente en la zona es satisfactorio para pequeñas aplicaciones de energía eólica.

Las vías de acceso hacia el Sector de “La Libertad” y sus alrededores son en su mayoría lastradas lo que posibilita su fácil acceso.

Los datos obtenidos en las encuestas no son en sí muy confiables, ya que el desconocimiento de la gente influyo en gran parte a la obtención de resultados, a pesar de ello y con la utilización de la Escalala de Beaufort, se confirmó un buen potencial eólico dando un un valor de velocidad promedio estimado de 5.5 a 7.9 m/s.

Se ha encontrado evidencia biológica que confirma este hecho además, esto ha sido corroborado con la medición de la velocidad de viento dando esta una media de 5.92 m/s, y un potencial eólico de 138.8 W/m² a 10 m de altura, que según Santillán a título ilustrativo manifiesta que:

- Debajo de los 50 W/m², no existe interés energético del viento.
- De 50 a 150 W/m², hay interés para fines de bombeo de agua y consumos disperso de energía eléctrica a baja escala.
- De 150 a 500 W/m², se consideran zonas de buenas características para aprovechamiento eólico, sea cualquiera de las aplicaciones que se quiera efectuar.
- Más de 500 W/m², se consideran zonas de buenas características eólico energéticas para generación de electricidad. (con equipos de menos de 0.5 MW)
- Zonas con 1000 w/m² de potencial se consideran sitios de interés eólico con características idóneas para la generación a mediana y gran escala (equipos de más de 0.5 MW).

Algo muy importante que se debe señalar es el bajo índice de turbulencia del sector que es de apenas el 10% de los datos de velocidad registrados, lo que posibilita el uso de aerogeneradores de eje horizontal que permanecerá estable la mayor parte del tiempo de generación eléctrica. En caso de que este índice hubiera sido superior, se tendría que pensar en el uso de un aerogenerador de eje vertical, que son inmunes ante las ráfagas de viento pero, como ya se ha señalado, su construcción es más onerosa y su fiabilidad ante rotores de 3 álabes y de eje horizontal es significativamente menor. (Alrededor de 25% de aprovechamiento de energía)

Sobre las características Tecnológicas de pequeños sistemas conversores de energía eólica

Es evidente que la tendencia actual en la construcción de pequeños aerogeneradores es la de utilizar los de eje horizontal, especialmente a barlovento por cuestiones prácticas como son un mejor valor de coeficiente de potencia, velocidades de giro más altas, facilidad en la construcción y una velocidad de arranque baja.

El tipo de rotor utilizado en aplicaciones como las que se quiere conseguir en esta investigación, es el de tipo hélice de 3 álabes o palas, que son capaces de asegurar un mejor equilibrio dinámico del rotor al ser las cargas actuantes repartidas de una mejor forma que en los modelos monopala y bipala, que poseen estos inconvenientes. Sin embargo la velocidad de rotación de estas máquinas es más lenta que los mono pala y bipala.

En cuanto a los materiales utilizados para la construcción del álabe, se destaca el hecho de que en los momentos actuales y a nivel comercial, se viene utilizando aquellos construidos con fibra de vidrio reforzada, y también de fibra de carbono. Para la realización de los álabes utilizando estos materiales, se requiere de la fabricación previa de moldes, que resulta conveniente para la fabricación en serie pero que talvez represente un costo más elevado.

En máquinas utilizadas en sectores rurales, como lo menciona Hugh Piggott, ha dado un magnífico resultado la utilización de madera, que si bien es cierto requiere un poco de experiencia en su confección, tiene la ventaja de que el material, por lo general, está disponible en estos lugares y los mismos artesanos del lugar pueden aprender a construir las palas, abaratando los costos de fabricación significativamente.

En cuanto al generador eléctrico que se utiliza en la actualidad se ha extendido el uso de generadores de imanes permanentes de boro neodimio tanto a nivel comercial como artesanal por poseer la gran ventaja de no necesitar una caja

multiplicadora para alcanzar la velocidad de sincronización de los generadores comunes y también debido a que la máxima eficiencia que pueden entregar los mismos, se hace a velocidades relativamente bajas y dentro de un rango de velocidades amplio lo que favorece su utilización ante la variabilidad de la velocidad del viento.

En lo que respecta al sistema de orientación para aerogeneradores de eje horizontal, es extendido el uso de una veleta de orientación que permite que el rotor siempre esté encarado al viento.

Sobre el sistema de regulación y frenado del rotor, a nivel comercial existen muchas posibilidades, especialmente utilizando dispositivos electrónicos que de pronto elevarían el costo de fabricación. Existe la alternativa de utilizar para el sistema de frenado, el de cabeceo y el de cortocircuitar el generador, especialmente en aquellas situaciones donde se haya superado la velocidad de diseño y para mantenimiento de la máquina. Las experiencias mostradas en los cuatro casos investigados han revelado que este último sistema es el más adecuado para aplicaciones rurales.

Se puede decir entonces que el establecimiento del potencial eólico de la Parroquia García Moreno, la caracterización de un sistema conversor de energía eólica y sus parámetros de diseño, hicieron posible el diseño de un aerogenerador factible de construirlo con tecnología nacional para satisfacer las necesidades energéticas en hogares aislados de dicha comunidad.

5.8. Sugerencias para el mantenimiento del aerogenerador

En este apartado se indican algunas sugerencias de mantenimiento que fueron adquiridas de aerogeneradores comerciales y de experiencias del autor:

- Revisar el correcto montaje de los álabes, buje y tornillería.

- Es aconsejable colocar el aerogenerador sobre una torre independiente separada de la vivienda para evitar que esta pueda provocar turbulencias, así como cualquier tipo de vibración que pueda ser transmitida a la vivienda.
- Debido a que los álabes estarán expuestos a condiciones climáticas severas en gran parte del año, es deseable que tengan un recubrimiento de poliuretano para minimizar los efectos negativos que pudieran sufrir (agrietamientos, picaduras).
- No cubrir la parte superior del regulador, los orificios de la tapa superior deben de estar descubiertos para una correcta ventilación.
- Revisar cada 6 meses las conexiones que van del generador a los rectificadores de corriente continua, pues las uniones se oxidan y se deterioran.
- Con el fin de minimizar pérdidas eléctricas, la distancia entre el aerogenerador y el cuadro de regulación deberá ser la menor posible, sin superar en ningún caso los cien metros.
- Realizar dos revisiones anuales consistentes en una inspección visual de las partes móviles y un reapriete de la tornillería.

5.9. Conclusiones del capítulo

Se ha logrado en este trabajo de investigación determinar los parámetros de diseño de un aerogenerador de baja potencia, resultando en un rotor que tendrá 1,5 m de radio, con tres álabes construidos de madera de laurel (muy abundante en García Moreno y en todo el Ecuador)

En cuanto al diseño mecánico se obtuvo un factor de seguridad de 2,5, lo que garantiza la estabilidad de la máquina ante vientos con velocidades superiores a los 10 m/s.

El generador a utilizar será de imanes permanentes, con un diseño más que probado en aplicaciones de energía eólica a nivel rural.

El sistema de orientación y frenado es típico de estas máquinas pero se han utilizado datos de diseño especiales para su caracterización que garantizarán la permanencia del rotor de cara al viento y a sacarlo de posibles turbulencias o ráfagas de viento cuando éstas sean superiores a velocidades de viento de 10 m/s

Se ha realizado también un estudio económico que asegura que el pequeño aerogenerador propuesto es factible de construirlo en Ecuador, utilizando mano de obra y tecnología nacional.

Se ha hecho también un estudio de impacto social y ambiental donde se muestra que pequeños sistemas conversores eólicos de energía eléctrica no tienen prácticamente ningún impacto en el entorno y más bien podría significar el desarrollo de esta tecnología en nuestro medio.

CONCLUSIONES GENERALES

Las mejores perspectivas de extensión del uso de la energía eólica en estos momentos residen en la producción de electricidad. Si bien no es una energía que pueda reemplazar a las hoy utilizadas, por distintos factores, como ser: el costo de las grandes turbinas eólicas, la región a instalarse, régimen de vientos, transporte de las partes componentes de una turbina, es una solución válida al problema energético que presentan pequeñas comunidades que se encuentran alejadas de la red de distribución eléctrica.

Se ha podido caracterizar un pequeño generador eólico de acuerdo al comportamiento de viento en una zona rural como García Moreno, el que posee un buen potencial eólico (149 W/m^2) y un bajo índice de turbulencia, que es una situación que se puede encontrar en los asentamientos humanos de la serranía del Ecuador.

El estudio del potencial eólico de García Moreno ha permitido también plantear una metodología de diseño de una máquina de conversión eólica, que por las

características propuestas, es factible de realizarse en Ecuador sin que la inversión inicial rebase los 1 500 dólares.

Cabe añadir que según el plan de desarrollo energético que lleva a cabo el Gobierno de Ecuador, el inversionista interesado dispone de aproximadamente 1300 dólares para la construcción de aerogeneradores de pequeña potencia por vivienda y un precio relativamente bajo del kW·h, lo que debería incentivar el desarrollo de esta tecnología.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que se investigue sobre algunos tópicos en energía eólica en el entorno de Ecuador, por ejemplo sistemas eléctricos, electrónicos y de acumulación, que necesariamente en los momentos actuales han de importarse de otros países, lo que significa un incremento de costos en la instalación y puesta en marcha de proyectos que usan como fuente primaria el viento.

Por la razón expuesta, es recomendable que las universidades y empresarios empecemos a preocuparnos por generar un desarrollo sustentable de la industria, no solo de la energía eólica, sino también de otras posibilidades tecnológicas de generación de energía con fuentes alternativas.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Abarzúa, A. (2012). *Aspectos de diseño de generadores sincrónicos de flujo axial para aplicación en aerogeneradores*. Santiago de Chile: Universidad de Chile. Página 18
- Batchelor, S., & Scott, N. (2011). *Evaluating the Impact of Wind Generators in Inner Mongolia*. GamosLtd. página 12
- Cruz, A. e. (1999). *Desarrollo de sistemas eólicos aislados*. Editorial CIEMAT.
- Endara, L., & Toctaguano, P. (2011). *Construcción de un generador eólico de bajas revoluciones por minuto para una vivienda rural, ubicada en el sector de Pansachí el morro perteneciente a la parroquia Mulaló del cantón Latacunga provincia de Cotopaxi*. Universidad Técnica de Cotopaxi, UNIDAD ACADEMICA DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADAS, Latacunga. página 7
- CONELEC, C. N. (2014). *REGULACIÓN No. CONELEC – 001/13*. QUITO. pp 3
- Leary, J., While, A., & Howell, R. (2012). Locally manufactured windpower technology for sustainable rural electrification. *Energy Policy*, 11. pp 11
- Molina, F., & Pacheco, L. (2014). *Construcción de un generador eólico de bajas revoluciones para la escuela Fiscal Mixta Portoviejo ubicada en el sector de Cuchitingue, Parroquia Aláquez, cantón Latacunga*. Latacunga: Univesidad Técnica de Cotopaxi. página 12
- ONU. (2013). *Objetivos de Desarrollo del Milenio*. New York.
- Piggott, H. (2003). *How to build a Wind Turbine*. página 43
- Santillán, R. (2006). *Fuentes Renovables de Energía*. Riobamba. página 7 y 15

Ponce, G. (1996). *Determinación de velocidades medias de viento en función de indicadores biológicos*. página 162

ONU. (2005). *XV Reunión del Foro de Ministros de Medio Ambiente de América Latina y el Caribe*. Caracas.

TECH4CDM. (2010). *La electrificación Rural en Ecuador*. SIXTH FRAMEWORK PROGRAMME. páginas 11 y 12

Villarrubia, M. (2004). *Energía Eólica*. Barcelona: CEAC. página 62

BIBLIOGRAFÍA COMENTADA

Ammonit. (2000). Medición de Viento Para realizar un correcto Pronóstico Energético. *Ammonit*, 54.

Arraña, E. M. (2012). Estado Del Arte En El Desarrollo De Pequeños Generadores Eólicos. *ASADES Vol 16*, 9.

Bastanion, R. (1992). *Energía del viento y diseño de turbinas*. Buenos Aires Argentina: Editorial fuente de cultura.

Batchelor, S., & Scott, N. (2011). *Evaluating the Impact of Wind Generators in Inner Mongolia*. GamosLtd.

Bazán, D. (2013). *Perfiles Aerodinámicos: Familias y Tipos*. Madrid.

Canavos, G. (1988). *Probabilidad y Estadística*. México: McGraw-Hill.

Chávez, S. G. (2012). *Diseño y Evaluación Experimental de un Sistema Mecánico de Regulación y Control De Potencia Para Pequeños Aerogeneradores*. Lima: Guzlop Editoras.

CONELEC, C. N. (2009). *Plan Maestro de electrificación 2009-2020*. Quito.

CONELEC, C. N. (2014). *REGULACIÓN No. CONELEC – 001/13*. QUITO.

- Craig, M. (2007). *Bringing Light to the Edge of the World: blueEnergy's Adventures*. MountainView California: TechTalk.
- Cruz, A. e. (1999). *Desarrollo de sistemas eólicos aislados*. Editorial CIEMAT.
- Díez, D. F. (1993). *Energía Eólica*. Barcelona: Departamento De Ingeniería Eléctrica Y Energética Universidad De Cantabria.
- Endara, L., & Toctaguano, P. (2011). *Construcción de un generador eólico de bajas revoluciones por minuto para una vivienda rural, ubicada en el sector de Pansachí el morro perteneciente a la parroquia Mulaló del cantón Latacunga provincia de Cotopaxi*. Universidad Técnica de Cotopaxi, UNIDAD ACADEMICA DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADAS, Latacunga.
- Gipe, P. (2000). *Energía Eólica Práctica*. Sevilla: Editorial Progenza.
- Grupo de Trabajo para el Impulso de la Energía Eólica. (2006). *Diez Preguntas y Diez Respuestas Sobre Energía Eólica*. La Habana.
- Guananga, D. (2012). *Estudio de un sistema de bombeo eólico con el fin de satisfacer las necesidades de irrigación agrícola en la parroquia García Moreno, Pelileo*. Ambato: Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Universidad Técnica de Ambato.
- IEA. (2010). *World Energy Outlook*. París: International Energy Agency.
- INEC. (2011). *Censo de Población y de Vivienda 2010*. Quito: INEC.
- International Electrotechnical Commission. (2008). *Wind turbines – Part 1: Design requirements*.
- Leary, J., While, A., & Howell, R. (2012). Locally manufactured windpower technology for sustainable rural electrification. *Energy Policy*, 11.

- MEGAWIND. (2006). *MEGAWIND*. Obtenido de <http://www.megawind.com/es/ener.html>
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, (. (2013). *Atlas Eólico del Ecuador*.
- Ministerio de Energía Renovable. (2013). *Atlas Eólico del Ecuador con fines de Generación Eléctrica*. Quito: MEER.
- Molina, F., & Pacheco, L. (2014). *Construcción de un generador eólico de bajas revoluciones para la escuela Fiscal Mixta Portoviejo ubicada en el sector de Cuchitingue, Parroquia Aláquez, cantón Latacunga*. Latacunga: Univesidad Técnica de Cotopaxi.
- ONU. (2005). *XV Reunión del Foro de Ministros de Medio Ambiente de América Latina y el Caribe*. Caracas.
- ONU. (2013). *Objetivos de Desarrollo del Milenio*. New York.
- Piggott, H. (2003). *How to build a Wind Turbine*.
- Ponce, G. (1996). *Determinación de velocidades medias de viento en función de indicadores biológicos*.
- Proaño, C., & Toala, H. (2009). *Plan Estratégico De Desarrollo*. Pelileo: Ilustre Municipalidad De Pelileo.
- Proviento. (26 de Noviembre de 2014). *Proviento*. Obtenido de <http://www.proviento.com.ec/>
- Sánchez, T., & Chiroque, J. (2005). *Evaluación y mejoras del aerogenerador ITDG modelo IT-PE-100*. Lima: ITDG-CONCYTEC-UNI.
- Santillán, R. (2006). *Fuentes Renovables de Energía*. Riobamba.

- Segurado, J. (2003). *La Energía Eólica*. Belgrano: Departamento de Investigación Universidad de Belgrano.
- Serrano, J. S. (2011). *Desarrollo De Un Banco De Ensayo Para La Evaluación De Las Prestaciones De Aerogeneradores De Pequeña Potencia*. Universidad Politécnica de Cartagena.
- SoloStocks. (26 de Noviembre de 2014). *SoloStocks*. Obtenido de <http://www.solostocks.com/venta-productos/generadores/aerogeneradores>
- TECH4CDM. (2010). *La electrificación Rural en Ecuador*. SIXTH FRAMEWORK PROGRAMME.
- Torres, A. M. (1992). *Utilización De La Energía Eólica Para Generación De Electricidad Y Almacenamiento En Baterías*. Tesis de grado. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Universidad de Las Palmas. (2012). *Estudio previo para una experiencia piloto de aprovechamiento de energía eólica en La Ciudad de Las Palmas de Gran Canaria*. Las Palmas de Gran Canaria.
- Villarrubia, M. (2004). *Energía Eólica*. Barcelona: CEAC.
- Villarrubia, M. (2012). *Ingeniería de la energía Eólica* (primera edición ed.). Barcelona, España: Marcabombo, S:A.
- Vinueza, M. (2012). Ficha Técnica N° 4: LAUREL. *Ecuador forestal*, 2.
- Wind Power. (2005). *TheWindPower*. Obtenido de <http://www.thewindpower.net/index.php>

ANEXOS