

**“MODELAMIENTO DE UN MICRO AEROGENERADOR EN SISTEMAS DE GENERACIÓN
DISTRIBUIDA PARA EL SECTOR RESIDENCIAL”**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA: INGENIERÍA ELÉCTRICA

Tesis previa a la obtención del título de: INGENIERO ELÉCTRICO

**TEMA:
“MODELAMIENTO DE UN MICRO AEROGENERADOR EN SISTEMAS DE
GENERACIÓN DISTRIBUIDA PARA EL SECTOR RESIDENCIAL”**

**AUTOR:
MARIO FERNANDO TITUAÑA DE LA VEGA**

**DIRECTOR:
DIEGO FRANCISCO CARRIÓN GALARZA.**

Quito, marzo del 2015

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, Mario Fernando Tituaña De La Vega autorizo a la Universidad Politécnica Salesiana la publicación total o parcial de este trabajo de grado y su reproducción sin fines de lucro.

Además declaro que los conceptos y análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Quito, Marzo del 2015

Mario Fernando Tituaña De La Vega
CC:172352089-4

AUTOR

CERTIFICA

Haber dirigido y revisado prolijamente cada uno de los capítulos técnicos y financieros del informe de la monografía, así como el funcionamiento del “MODELAMIENTO DE UN MICRO AEROGENERADOR EN SISTEMAS DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA PARA EL SECTOR RESIDENCIAL” realizada por el Sr. Mario Fernando Tituaña De La Vega, previa a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico en la Carrera de Ingeniería Eléctrica.

Por cumplir los requisitos autoriza su presentación.

Quito, Marzo del 2015

Ing. Diego Francisco Carrión Galarza.

DIRECTOR

DEDICATORIA.

Mario Fernando Tituaña De La Vega.

Este proyecto es dedicado a Dios que siempre me cuida y a la persona que me vio crecer y me cuidó, no solo a mí sino a toda mi familia este proyecto también lo dedico a mi abuelo Nicolas Tituaña Suquillo, que supo educar a su hijo mi padre haciéndole un hombre de bien, también lo dedicado a mi madre cuyo consejos nunca me fallaron y a mi hermano que siempre está para ayudarme y apoyarme.

AGRADECIMIENTO.

Mario Fernando Tituaña De La Vega.

Agradezco muy cordial mente a la universidad politécnica salesiana y a sus docentes, los cuales colaboraron con su conocimiento a mi aprendizaje, aclarando las inquietudes, dudas que se dieron en el avance y progreso de mi carrera.

INDICE GENERAL

| | |
|--|-----|
| DECLARATORIA DE AUTORÍA | I |
| CERTIFICA | II |
| DEDICATORIA..... | III |
| AGRADECIMIENTO..... | IV |
| INDICE GENERAL..... | V |
| INDICE DE FIGURAS..... | IX |
| INDICE DE TABLAS | XI |
| INDICE DE ANEXOS | XII |
| RESUMEN | XIV |
| ABSTRACT | XV |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO I | 3 |
| GENERACIÓN DISTRIBUIDA | 3 |
| 1.1 Fuentes de energía..... | 3 |
| 1.2 Clasificación de la generación distribuida..... | 5 |
| 1.2.1 De acuerdo a la potencia nominal..... | 5 |
| 1.2.2 De acuerdo a la topología empleada..... | 6 |
| 1.2.2.1 Sistema de velocidad fija..... | 7 |
| 1.2.2.2 Sistema generador asincrónico doblemente alimentado..... | 8 |
| 1.2.2.3 Sistema de convertidor completo..... | 9 |
| 1.3 Impacto a la red de distribución..... | 9 |
| 1.3.1 Control primario y secundario de frecuencia y voltaje..... | 10 |
| 1.3.2 Confiabilidad de los Sistemas eléctricos de potencia en su etapa de distribución..... | 11 |

| | | |
|--|---|----|
| 1.3.3 | Índices de confiabilidad de la red. | 11 |
| 1.3.3.1 | Índices basados en la potencia instalada. | 12 |
| 1.4 | Modos de conexión a la red de distribución. | 13 |
| CAPÍTULO II | | 16 |
| MICRO AEROGENERACIÓN EÓLICA..... | | 16 |
| 2.1 | Recurso eólico. | 16 |
| 2.1.1 | La rosa de los vientos | 19 |
| 2.1.2 | La teoría de Betz. | 22 |
| 2.1.3 | Distribución de Weibull..... | 24 |
| 2.1.4 | El modelo WRF. | 25 |
| 2.1.5 | El modelo MASS. | 26 |
| 2.2 | Tipos de aerogeneradores. | 27 |
| 2.2.1 | De acuerdo a la potencia suministrada. | 32 |
| 2.3 | Caracterización de los micro aerogeneradores..... | 33 |
| 2.4 | Eficiencia de los micro aerogeneradores eólicos. | 34 |
| 2.4.1 | Efectos como se producen Flickers y armónicos: | 34 |
| 2.4.2 | Potencia y rendimiento del aerogenerador:..... | 38 |
| 2.4.3 | Potencia de una turbina. | 38 |
| 2.4.4 | Rendimiento real del aerogenerador..... | 39 |
| CAPÍTULO III | | 40 |
| MODELIZACIÓN DEL MICRO AEROGENERADOR | | 40 |
| 3.1 | Modelización del recurso eólico | 40 |
| 3.1.1 | Direcciones de la velocidad del viento | 40 |
| 3.1.2 | Velocidades del viento | 44 |
| 3.1.3 | Tiempo de funcionamiento de un aerogenerador..... | 45 |

| | |
|--|----|
| 3.1.4 Energía suministrada por el aerogenerador | 46 |
| 3.1.5 Potencia suministrada por el viento | 46 |
| 3.1.6 Potencia suministrada por el aerogenerador..... | 46 |
| 3.2 Instalación Tipo | 51 |
| 3.2.1 Grados de electrificación y potencia contratada..... | 54 |
| 3.2.2 Tipos de demanda de energía eléctrica | 55 |
| 3.2.3 Consumo promedio de un usuario residencial | 55 |
| 3.2.4 Dimensionamiento del sistema de generación eólica | 57 |
| 3.2.4.1 Cálculo del número de baterías | 58 |
| 3.2.4.2 Cálculo del inversor | 59 |
| 3.2.4.3 Protecciones | 60 |
| 3.2.4.4 Puesta a tierra | 63 |
| 3.3 Modelo de gestión energética | 63 |
| 3.3.1 Importancia del modelo | 64 |
| 3.3.2 Requerimientos de un sistema de gestión energética..... | 65 |
| 3.3.3 Metodología | 65 |
| 3.3.4 Correlación entre la potencia entregada por el aerogenerador y el consumo de la vivienda | 66 |
| 3.4 Acoplamiento a la red de distribución | 71 |
| 3.4.1 Elementos constitutivos de un sistema de generación eólico | 71 |
| CAPÍTULO IV | 73 |
| ANÁLISIS DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA..... | 73 |
| 4.1 Análisis del sistema de generación distribuida como una opción para el sistema eléctrico residencial. | 73 |
| 4.2 Análisis Técnico | 76 |
| 4.2.1 Instalación aislada de la red pública..... | 76 |

| | |
|---|-----|
| 4.2.2 Instalación simultánea con la red pública..... | 77 |
| 4.2.3 Almacenamiento de la energía producida..... | 81 |
| 4.2.4 Elección del inversor..... | 82 |
| 4.2.5 Elección e instalación de la torre..... | 82 |
| 4.2.6 Conexiones e instalación del panel de control..... | 83 |
| 4.3 Análisis económico..... | 83 |
| 4.3.1 Estimación de la producción de la energía eólica..... | 84 |
| 4.4 Análisis social..... | 92 |
| CONCLUSIONES..... | 94 |
| RECOMENDACIONES..... | 97 |
| REFERENCIAS..... | 100 |
| ANEXOS..... | 105 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura1.1 Topología de los sistemas de velocidad fija..... | 7 |
| Figura1.2 Topología de los sistemas asincrónicos doblemente alimentado. | 8 |
| Figura1.3 Topología de sistemas de convertidor completo..... | 9 |
| Figura1.4 Componentes de un sistema de conexión a la red de distribución. | 14 |
| Figura1.5 Conexión tipo de una micro red el sector residencial..... | 15 |
| | |
| Figura 2.1 Velocidad media del viento (m/s) | 18 |
| Figura 2.2 Temperatura promedio del aire (°C)..... | 18 |
| Figura 2.3 Rosa de los vientos..... | 19 |
| Figura 2.4 Distribución de frecuencia de las clases de viento..... | 21 |
| Figura 2.5 Rosa de los vientos correspondiente a la estación meteorológica..... | 21 |
| Figura 2.6 Modelo de Betz. | 22 |
| Figura 2.7 Coeficiente de potencia de un rotor. | 23 |
| Figura 2.8 Distribución de Weibull..... | 25 |
| Figura 2.9 Aerogenerador con rotor Savonius. | 27 |
| Figura 2.10 Aerogenerador con rotor Darrieus..... | 28 |
| Figura 2.11 Aerogenerador con rotor Giromill..... | 28 |
| Figura 2.12 Aerogenerador con rotor Windside. | 29 |
| Figura 2.13 Aerogenerador tipo tripala..... | 30 |
| Figura 2.14 Aerogenerador tipo bipala. | 30 |
| Figura 2.15 Aerogenerador tipo monopala..... | 31 |
| Figura 2.16 Aerogenerador a barlovento. | 31 |
| Figura 2.17 Aerogenerador a sotavento..... | 32 |
| Figura 2.18 Partes del micro-aerogenerador. | 33 |
| Figura 2.19 Voltaje Flicker | 35 |
| Figura 2. 20 Armónico a la red..... | 36 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.1 Ubicación del anemómetro | 41 |
| Figura 3.2 Flujo grama para la selección del lugar..... | 42 |
| Figura 3.3 Distribución de direcciones del viento | 43 |
| Figura 3.4 Gráfico de las direcciones del viento..... | 43 |
| Figura 3.5 Distribución de frecuencia de las clases de viento..... | 44 |
| Figura 3.6 Distribución probabilística de la velocidad del viento | 45 |
| Figura 3.7 Micro aerogenerador Long Bow 1 Kw. | 47 |
| Figura 3.8 Instalación de la torre del micro aerogenerador..... | 51 |
| Figura 3.9 Instalación del micro aerogenerador a la red. | 52 |
| Figura 3.10 Elementos de protección del aerogenerador | 61 |
| Figura 3.11 Diagrama de puesta a tierra..... | 63 |
| Figura 3. 12 Planificación de un modelo de gestión energética | 64 |
| Figura 3.13 Metodología para desarrollar un sistema de gestión de la energía.... | 65 |
| Figura 3.14 Comparativa entre la potencia generada y la demanda energética de un día | 69 |
| Figura 3.15 Flujograma de conmutación de potencias del sistema acoplado a la red pública..... | 70 |
| Figura 3.16 Diagrama unifilar de la conexión del aerogenerador a la red..... | 72 |
| Figura 3.17 Conexión simultánea de aerogenerador y red pública | 72 |
| | |
| Figura 4.1 Esquema de una instalación eólica aislada de la red..... | 76 |
| Figura 4.2 Conexión simultánea con la red pública..... | 78 |
| Figura 4.3 Diagrama de pérdidas de un aerogenerador real. | 79 |
| Figura 4.4 Curva de potencia del aerogenerador en función de la velocidad del viento | 80 |
| Figura 4.5 Histograma de la velocidad anual del viento..... | 84 |
| Figura 4.6 Representación gráfica del Periodo de Recuperación de la Inversión. | 91 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla1.1 Fuentes de generación distribuida no tradicionales. | 4 |
| Tabla1.2 Clasificación de la generación distribuida. | 6 |
| Tabla1.3 Los valores límites permitidos de los índices FMIK y TTIK. | 13 |
| | |
| Tabla 2.1 Estadística obtenida diariamente en Quito 01/2012 - 01/2014 entre 7 am y 7 pm de la velocidad media del viento y su temperatura promedio del aire. | 18 |
| Tabla 2.2 Resultados diarios de la velocidad y dirección del viento, del mes de octubre del sector de los chillos del 2014. | 20 |
| Tabla 2.3 Límites en la Distorsión de la Corriente según IEEE 519..... | 37 |
| Tabla 2.4. Límites de distorsión de Voltaje según IEEE 519..... | 37 |
| | |
| Tabla 3.1 Características del micro aerogenerador Long Bow | 47 |
| Tabla 3.2 Curva de potencia del Long Bow 1 Kw utilizada en el cálculo..... | 49 |
| Tabla 3.3 Estimación de la potencia media..... | 50 |
| Tabla 3.4 Estratos de consumo | 55 |
| Tabla 3.5 Consumo energético diario de una residencia | 56 |
| Tabla 3.6 Principales características para elegir elementos de protección | 62 |
| Tabla 3.7 Energía mensual proporcionada por el aerogenerador | 67 |
| Tabla 3.8 Requerimientos mensuales de energía del usuario | 67 |
| Tabla 3.9 Porcentaje de contribución del aerogenerador..... | 68 |
| | |
| Tabla 4.1 Consumo diario de los principales aparatos de uso residencial. | 75 |
| Tabla 4.2 Producción anual del aerogenerador. | 85 |
| Tabla 4.3 Ejemplo de los costos de los componentes de energía eólica. | 86 |
| Tabla 4.4 Tabla de amortización. | 87 |
| Tabla 4.5 Flujos de caja proyectados a 20 años. | 90 |

INDICE DE ANEXOS

| | |
|--|-----|
| Anexo A Resultados diarios de la velocidad y dirección del viento, del mes de octubre del sector de los chillos del 2014. | 106 |
| Anexo B Scripts utilizados..... | 126 |
| Anexo C Estudio de carga y demanda..... | 129 |
| Anexo D Tabla de conductores AWG | 130 |
| Anexo E Atlas Eólico del Ecuador (MEER) | 131 |
| Anexo F Long- Bow..... | 147 |
| Anexo G WRPLOTT..... | 151 |

GLOSARIO DE TÉRMINOS

| | |
|---------|---|
| MEER | El Ministerio de Electricidad y Energía Renovable |
| CENACE | Consejo Nacional de Electricidad |
| INAMHI | Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología |
| EEQ.SA | Empresa Eléctrica Quito |
| INEC | Instituto Nacional de Estadísticas y Censos |
| SRI | Servicio de Rentas Internas |
| DMQ | Distrito Metropolitano de Quito |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| FMIK | Frecuencia media de interrupción por KVA nominal instalado |
| TTIK | Tiempo total de interrupción por KVA nominal instalado, expresado en horas por KVA. |
| EENS | Energía esperada no suministrada |
| WRPLOT | Wind Rose Plots for Meteorological Data |
| WRF | Weather Research and Forecasting Model |
| MASS | Mesoscale Atmospheric Simulation System |
| m.s.n.m | Metro sobre el nivel del mar |
| Pn | Potencia nominal |
| FFUn | Factor de frecuencia de uso. |
| CIR | Carga instalada del consumidor representativo, |
| DMU | Demanda máxima unitaria |
| FSn | Factor de simultaneidad |
| DC | Corriente Directa |
| AC | Corriente Alterna |
| kW | Kilovatios |
| W | Vatio |
| kWh | Kilovatios hora |
| MW | Mega vatios |
| Cp | Coeficiente de potencia de la turbina |
| | Densidad del aire |
| SCR | Relación de corto circuito. |
| TDD | Distorsión total de la demanda. |
| Icc | Corriente de corto circuito |
| DM | Demanda diaria |
| TA | Tiempo de autonomía |
| ALM | Capacidad de almacenamiento de las baterías. |
| DSC | Valor de descarga de la batería, recomendado por el fabricante |
| VAN | Valor actual neto |
| TIR | Tasa interna de retorno |
| PRI | Periodo de Retorno de la Inversión |

RESUMEN

Mario Fernando Tituaña De La Vega

Mariofernanfo_nando

Universidad Politécnica Salesiana

Resumen — La necesidad de una mejor utilización del sistema eléctrico, el ahorro de energía, el aspecto económico, el impacto social y ambiental, han contribuido al desarrollo de nuevas formas de generación distribuida, especialmente basadas en fuentes renovables de energía, así se espera que la energía eólica tenga una mayor participación en un futuro muy cercano.

En este trabajo se analiza y determina desde una perspectiva técnica, social y económica la utilización de un sistema micro eólico a nivel residencial, como forma alternativa de ahorro de energía en la zona norte de Quito, provincia de Pichincha del territorio ecuatoriano.

Este trabajo realizara una revisión sobre conceptos de generación distribuida, su clasificación y efecto de los sistemas de energía eólica, describiendo conceptos de micro aerogeneradores eólicos, sus principales tipos, el recurso eólico, sus pérdidas y eficiencias.

Plantea el modelo de un sistema a nivel residencial con el micro aerogenerador Long Bow 1 kW, de Zytech Aerodyne, a través del recurso eólico disponible y su gestión energética, realizando un análisis técnico, social, y económico de la generación eólica como sistema de generación distribuida.

Índice de Términos — Sistema eléctrico, generación distribuida, gestión energética, impacto social, fuentes renovables, sistema micro eólico, recurso eólico, pérdidas, eficiencia, modelo, Zytech Aerodyne.

ABSTRACT

Mario Fernando Tituaña De La Vega

email@xxx.yy.zz

Universidad Politécnica Salesiana

Abstract— The need for better use of electrical systems, energy saving, economics, social and environmental impact, have contributed to the development of new forms of distributed generation, especially based on renewable energy sources, thus is expected to wind power will have greater participation in the very near future. This paper analyzes and determines from a technical, social and economic perspective using a residential micro wind system as an alternative way of energy saving in northern Quito, on Ecuadorian province of Pichincha.

This work conducts a review of concepts of distributed generation, classification and effects of wind energy systems, describes concepts of micro wind turbines, their main types, the wind resource, losses and efficiencies.

Planning of the model for a residential system using a Long Bow 1 kW micro wind turbine from Zytech Aerodyne through wind resources available and energy management, performing a technical, social, and economic analysis of wind power as an distributed generation system.

Index Terms - Electrical System, distributed generation, energy management, social impact, renewable sources, micro wind systems, wind resource, losses, efficiency, model, Zytech Aerodyne.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de tener un mejor uso de la energía eléctrica, un mayor cuidado en la conservación del medio ambiente, y un ahorro de los medios de energía convencional, ha llevado en la actualidad, a la utilización de generadores de pequeña y mediana escala, instalados en lugares próximos a las cargas, que utilicen energías renovables y a su vez estén conectados a las redes de distribución ya existentes. El objetivo fundamental de este trabajo es realizar la modelización de un micro aerogenerador eólico, que tenga ciertas características especiales, como son: bajo costo, fácil disponibilidad de los accesorios para su mantenimiento e instalación, con buena respuesta en potencia para el recurso eólico disponible en la zona de Quito, provincia de Pichincha, en el territorio ecuatoriano, que permita su instalación a la red de distribución, y que pueda tener opción a futuro a formar parte de un sistema híbrido de generación de energía, como una posible alternativa a ser implementado en un medio doméstico, ya sea con una finalidad de ahorro de energía o porque las condiciones del lugar no permite el acceso a la red estatal.

Las estrategias de investigación que se siguen para alcanzar el objetivo planteado son:

- Se realiza un estudio de los mecanismos de la generación distribuida y de los aerogeneradores eólicos.
- Se escoge el micro aerogenerador.
- Se ajusta la distribución de frecuencias de una serie del viento con la función densidad de probabilidad de Weibull.
- Se realiza los cálculos de la densidad del aire en base del modelo de presión y temperatura.
- Se toma en cuenta las siguiente consideraciones:

1) La densidad de potencia es proporcional a la densidad del aire. Es decir, a mayor altura, menor la energía disponible a igual velocidad del viento.

2) La energía que se puede extraer del viento es proporcional al área barrida por el rotor, o sea al cuadrado de su diámetro.

3) La densidad de potencia es proporcional al cubo de la velocidad del viento.

- Se realiza la curva de la potencia por medio de una tabla de valores numéricos.
- Se obtiene la potencia media producida por el micro aerogenerador.
- Se realiza un análisis del sistema como una opción para el sistema eléctrico residencial.
- Se realiza el análisis técnico, económico, y social sobre la micro aerogeneración eólica como medio alternativo en la producción de energía eléctrica residencial.
- Se analiza el costo de inversión del sistema de generación eólica con una rápida recuperación del capital invertido, como justificación de su utilización.
- Se establece que el modelo sirve para micro aerogeneradores eólicos, que permitan proporcionar energía eléctrica en zonas donde no se dispone de red eléctrica o con el objetivo de conseguir un ahorro en los costos, permitiendo también la conexión a redes de distribución existentes, y también facilitando el funcionamiento de forma autónoma, incluso en condiciones de fallo de suministro de la red de distribución.
- Se incluye la posibilidad de realizar una extensión del sistema de generación de energía eólica, a otras formas de generación de energía fotovoltaica o solar, entre otras.

CAPÍTULO I

GENERACIÓN DISTRIBUIDA

Una mejora del rendimiento en la producción y ahorro de la energía eléctrica, así como el cuidado del medio ambiente, entre otras cosas, han contribuido particularmente a que el concepto de la generación distribuida, se extienda a nivel mundial con la utilización de generadores instalados en lugares próximos a las cargas y a su vez conectados a las redes de distribución.

La generación distribuida se puede definir como una fuente de potencia eléctrica activa en un rango inferior a 100 MW, conectado al sistema eléctrico de distribución y localizado cerca de la carga [1].

En este capítulo se tratará sobre los conceptos básicos de la generación distribuida, sus principales fuentes, su clasificación, su efecto en los sistemas eléctricos de potencia, en particular de un sistema considerado no convencional, como es la energía eólica, y sus modos de conexión a la red de distribución.

1.1 Fuentes de energía.

Los aspectos más importantes que caracterizan a los sistemas de generación distribuida son los siguientes:

- La utilización de fuentes de energía renovables, como son la potencia irradiada por el Sol, la fuerza del viento, la energía del agua de mares y océanos, la materia orgánica, el calor geotérmico, entre otros. Especialmente, porque presentan evidentes ventajas en la conservación del medio ambiente respecto a otras fuentes de energía [2], [3].
- La mayoría de los sistemas de generación distribuida son modulares, lo que representa una facilidad para su montaje, instalación, mantenimiento y reparación [4].
- La producción simultánea de generación, lo que permite un mejor aprovechamiento de la electricidad [3].

Se puede dividir a las fuentes de generación como: convencionales y no-convencionales. Entre las convencionales se puede citar: turbinas de gas, motores de combustión, micro-turbinas, y entre las no-convencionales: generadores eólicos, celdas fotovoltaicas y solares, biomasa, entre otras [5].

A continuación, se resume en la tabla 1.1 [5], algunos de estos sistemas que se emplean en la generación distribuida no tradicionales, así como su rendimiento y el rango de su aplicación.

Tabla1.1 Fuentes de generación distribuida no tradicionales.

| Fuentes no tradicionales: | Rango de aplicación: | Rendimiento: |
|---------------------------|----------------------|--------------|
| Eólica. | 200 W – 5 MW. | 35 – 45 % |
| Solar. | 200 W – 100 MW. | 15 – 20 % |
| Mini hidráulica. | 10 kW – 10 MW. | 30 – 50 % |
| Fotovoltaica. | 200 W – 100 kW. | 10 – 20 % |
| Pilas de combustible. | 1 kW – 10 MW. | 35 – 85 % |
| Biomasa. | 100 kW – 100 MW. | 30 – 40 % |

Eólica: el Sol produce un calentamiento no uniforme en la superficie de la Tierra, la energía cinética del viento que se origina por esta diferencia de presión terrestre, es utilizado para mover las palas de un aerogenerador, transmitiéndose un movimiento de rotación, el cual mediante un generador es convertido en electricidad. El rango de la potencia en el que se utiliza es aproximadamente de 200 W a 5 MW, con un rendimiento promedio aproximadamente del 40 % [6].

Solar: la energía de la radiación solar es convertida en energía calorífica, utilizándose directamente esta energía o en otros casos transformándola en electricidad. El rango de la potencia en que se utilizan es aproximadamente de 200 W a 100 MW, pero tienen en promedio un bajo rendimiento [6].

Mini hidráulica: la energía potencial del agua es transformada en energía cinética mediante tuberías para ser luego transformada en energía mecánica y finalmente en energía eléctrica. Se consideran como mini hidráulica porque la potencia de aplicación no supera los 10 MW, ni es inferior a 10 kW. Tienen un rendimiento aproximado del 40 % [6].

Fotovoltaica: la radiación solar es transformada en energía eléctrica mediante un dispositivo electrónico que contiene un material semiconductor llamado celda fotovoltaica. El rango aproximado de la potencia de instalación, en la que se utiliza las celdas fotovoltaicas es de 200 W a 100 kW, con un bajo rendimiento promedio [6].

Pilas de combustible: son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química de un combustible en electricidad. Aunque su principal inconveniente es su costo elevado, poseen un alto rendimiento promedio aproximadamente del 60 %. El rango de potencia de las aplicaciones es de 1 kW hasta 10 MW [6].

Biomasa: se utiliza la energía química proveniente de la materia orgánica de origen biológico y de reciente formación, para ser transformada en energía eléctrica por diversos procesos. El rango aproximado de la potencia en la que se utiliza la biomasa es de 100 kW a 100 MW, con un rendimiento promedio del 35 % [6].

1.2 Clasificación de la generación distribuida.

A la generación distribuida, se la puede dividir en dos grupos, uno según la potencia nominal y otro por la topología empleada en la red de distribución.

1.2.1 De acuerdo a la potencia nominal.

De acuerdo al valor de la potencia nominal utilizada se puede clasificar a la generación distribuida de la siguiente manera [7]:

- **Micro:** cuando la potencia nominal va desde 1W hasta 5KW.
- **Pequeña:** cuando la potencia nominal está entre 5KW y 5MW.
- **Mediana:** cuando la potencia nominal va desde 5MW hasta 50MW.
- **Grande:** cuando la potencia nominal está entre 50MW hasta 100MW.

En la tabla 1.2 [7], se resume la clasificación de la generación distribuida de acuerdo al rango de la potencia nominal empleada, se ha tomado como valores referenciales los más comunes, aunque estos podrían variar.

Tabla1.2 Clasificación de la generación distribuida.

| Generación distribuida | Rango potencia nominal |
|-------------------------------|-------------------------------|
| Micro | Entre: 1 W y 5 kW. |
| Pequeña | Entre: 5 kW y 5 MW. |
| Mediana | Entre: 5 MW y 50 MW. |
| Grande | Entre: 50 MW y 100MW. |

1.2.2 De acuerdo a la topología empleada.

Específicamente se detallará las diferentes topologías de la generación distribuida bajo el marco de la generación eólica, las mismas que están en función de cómo se conecta el generador a la red. Básicamente se puede establecer tres categorías [8]:

- Velocidad fija.
- Máquina asíncrona doblemente alimentada.
- Convertidor completo.

1.2.2.1 Sistema de velocidad fija.

En el sistema de velocidad fija, el generador está conectado directamente a la red sin un convertidor de potencia intermedio. Generalmente se utiliza un generador asincrónico de jaula de ardilla con el estator conectado a la red [8].

Este sistema no es muy utilizado, porque presenta las siguientes desventajas:

- No es muy eficiente, por el pequeño rango de velocidades del viento.
- Cambios en la frecuencia de la potencia generada, debido a variaciones en la velocidad del viento.
- Se debe utilizar un banco de condensadores, lo que ocasiona resonancia en la red, y el consiguiente consumo de potencia reactiva [8].

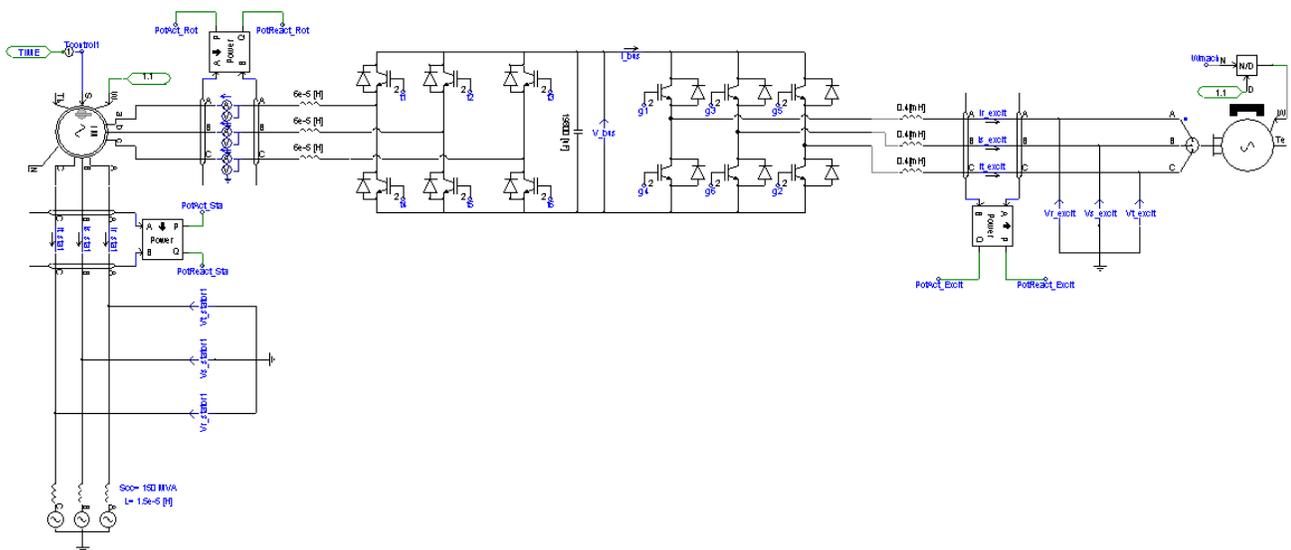


Figura1.1 Topología de los sistemas de velocidad fija.

Fuente: J. Álvarez, J. López, “Estudio De Diferentes Topologías De Generación”, Upna, Pamplona, España.

1.2.2.2 Sistema generador asincrónico doblemente alimentado.

En este sistema se utiliza un generador asincrónico o de inducción, en el que se ha incorporado al rotor, un sistema de conversión electrónico, compuesto por dos convertidores trifásicos que actúan como inversores o rectificadores, uno conectado al rotor y otro conectado a la red, permitiendo el flujo de potencia entre ellos.

Este sistema presenta las siguientes ventajas:

- Se puede generar potencia activa a velocidades superiores e inferiores a la de sincronismo.
- Se puede controlar la potencia reactiva del estator, hasta un factor de potencia de valor cercano a uno.
- La potencia convertida aumenta proporcionalmente con el cubo de la velocidad del viento [8].

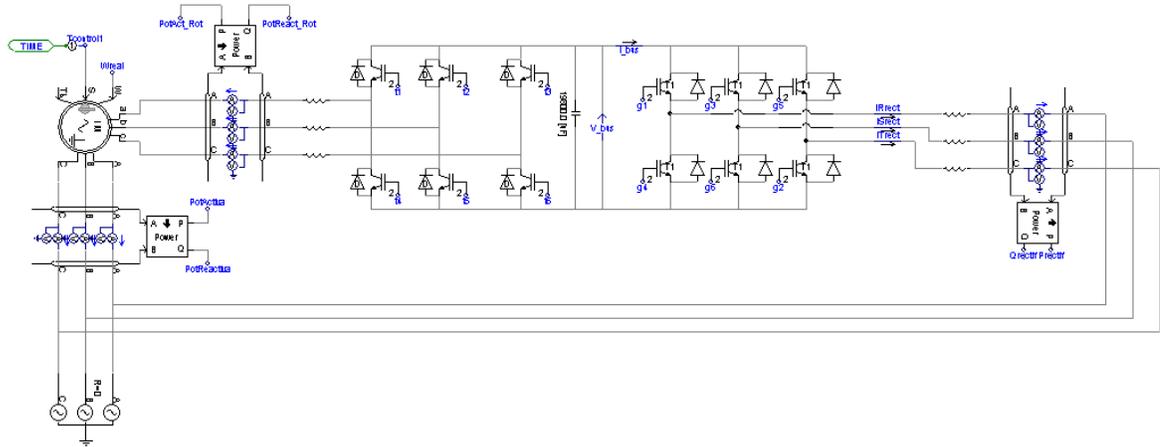


Figura1.2 Topología de los sistemas asincrónicos doblemente alimentado.

Fuente: J. Álvarez, J. López, “Estudio De Diferentes Topologías De Generación”, Upna, Pamplona, España.

1.2.2.3 Sistema de convertidor completo.

El generador va conectado a la red a través de un convertidor de potencia que varía la frecuencia de la potencia generada de forma de igualar a la de la red. Generalmente se utilizan generadores sincrónicos, aunque también se puede emplear generadores asincrónicos de jaula de ardilla [8].

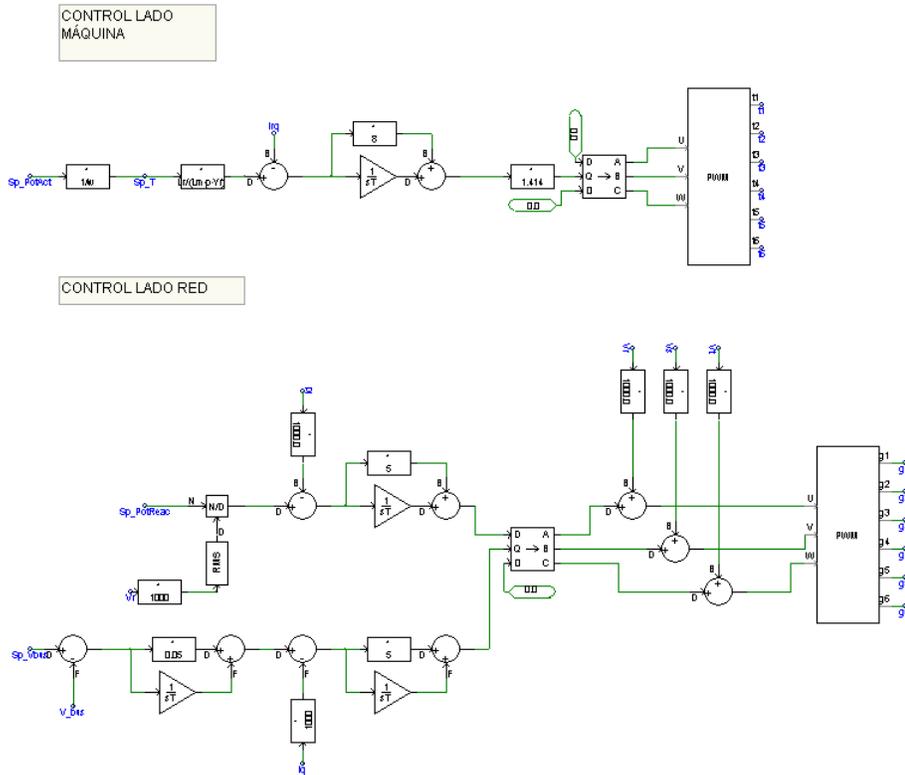


Figura1.3 Topología de sistemas de convertidor completo.

Fuente: J. Álvarez, J. López, "Estudio De Diferentes Topologías De Generación", Upna, Pamplona, España.

1.3 Impacto a la red de distribución.

El impacto a la red de distribución repercute, entre otras cosas, sobre el nivel de pérdidas, calentamiento de los equipos y regulación del voltaje. Aunque existen leyes y normas que incentivan y promueven la inserción a la red de distribución, sin embargo, en ellas solo se indica la desconexión de las máquinas ante condiciones anormales de tensión o frecuencia. La conexión de un medio de

generación distribuida a una red de distribución tiene un impacto positivo sobre el voltaje, pero negativo ante la frecuencia. [9]

Es necesario una rápida y oportuna desconexión del medio de generación ante una falla del mismo, pero una demora podría ocasionar una desconexión de los generadores en la red de distribución.

Las fallas con más riesgo para la red de distribución son las más alejadas porque pueden producir grandes sobretensiones, que se incrementan en horas de mínima demanda y cuando más capacitivo es el generador [10].

Un crecimiento descontrolado de la generación distribuida podría conducir a tener algunos efectos, no previstos en la planificación de la red de distribución.

1.3.1 Control primario y secundario de frecuencia y voltaje.

Se debe realizar un control de la generación de energía sobre la red de distribución, con el fin de mantener los valores de voltaje y de frecuencia, que se requieran para conseguir los objetivos del diseño impuestos, esto se consigue mediante: [11]

- **El control primario:** como cada inversor controla la tensión y la frecuencia en su salida, es decir, la tensión y frecuencia de eje directo, es necesario utilizar este control para mantener estos valores en los rangos establecidos [11].
- **El control secundario:** ya que el voltaje y la frecuencia, en algún punto determinado del sistema, puede ser muy bajo, se utiliza este tipo de sistema de control que permite re establecer el voltaje y la frecuencia a los valores nominales [11].

Debido a que pueden estar muchos sistemas de control funcionando simultáneamente, se deben desacoplar algunos, para poder efectuar el control adecuado.

Por ejemplo, si el ancho de banda para el control primario de la corriente es: Ω , el ancho de banda para el control primario de voltaje es: $\Omega/10$, y el ancho de banda para el control secundario de voltaje es: $\Omega/1000$. Normalmente, los controles secundarios de voltaje y frecuencia tienen anchos de banda de menos de 1Hz [11].

1.3.2 Confiabilidad de los Sistemas eléctricos de potencia en su etapa de distribución.

La confiabilidad de los sistemas eléctricos de potencia es una herramienta muy importante, porque es una manera de contar con una buena continuidad del suministro de energía eléctrica a las cargas que sean colocadas por el consumidor.

La confiabilidad normalmente está involucrada con la calidad de la energía. La necesidad de suministro eléctrico de una onda de voltaje casi pura, el uso de cargas de equipos electrónicos delicados, y la nula interrupción en el suministro eléctrico son razones para esperar tener una gran confiabilidad de las redes eléctricas. [12]

La confiabilidad también sirve para justificar una determinada inversión de acuerdo al comportamiento real que se tenga de un sistema.

1.3.3 Índices de confiabilidad de la red.

Estos índices intentan medir la continuidad del suministro es decir, el número de veces que se ve interrumpidos y por un cierto tiempo [13].

1.3.3.1 Índices basados en la potencia instalada.

Los índices de calidad se definen para cada generador de tensión (), de acuerdo a las siguientes expresiones: [14]

a) **FMIK**: Frecuencia media de interrupción por KVA nominal instalado:

En un período determinado, representa la cantidad de veces que el KVA promedio sufrió una interrupción de servicio.

Es decir:

$$FMIK_{Aj} = \frac{\sum_i KVA_{fs_{iAj}}}{KVA_{instAj}} \quad (1.1)$$

b) **TTIK**: Tiempo total de interrupción por KVA nominal instalado:

En un período determinado, representa el tiempo medio en que el KVA promedio no tuvo servicio.

Es decir:

$$TTIK_{Aj} = \frac{\sum_i KVA_{fs_{iAj}} * T_{fs_{iAj}}}{KVA_{instAj}} \quad (1.2)$$

Donde:

FMIK: Frecuencia media de interrupción por KVA nominal instalado, expresada en fallas por KVA.

TTIK: Tiempo total de interrupción por KVA nominal instalado, expresado en horas por KVA.

KVA_{fsj}: Cantidad de KVA nominales fuera de servicio en cada una de las interrupciones “j”.

KVA_{inst}: Cantidad de KVA nominales instalados.

T_{fsi}: Tiempo fuera de servicio, para la interrupción “j”.

A_j: Generador de tensión “j”.

Estos índices son basados en energía. Energía esperada no suministrada (EENS): es producido por la falta de servicio, se consideran los parámetros de confiabilidad del sistema, realizando que los índices de confiabilidad FMIK y TTIK de un sistema de distribución, comparen el efecto producido por la inclusión de refuerzos en la red. De esta forma, se determinan las combinaciones que minimizan el costo total de inversiones, refuerzos en los alimentadores, y el costo de la EENS [15].

Para el cálculo de los índices se consideran todas las interrupciones del sistema con duración mayor o igual a tres minutos. Es obvio, que las interrupciones que ocurran en el sistema, tanto en el generador, como en la red, interferirán en el valor de estos índices.

Los valores límites permitidos, para los índices FMIK y TTIK, tanto para la red como el generador, se presentan en la tabla 1.3 [12].

Tabla1.3 Los valores límites permitidos de los índices FMIK y TTIK.

| Índice | Valor límite para FMIK | Valore límite para TTIK |
|-----------|------------------------|-------------------------|
| Red | 4.0 | 8.0 |
| Generador | 5.0 | 10.0 |

1.4 Modos de conexión a la red de distribución.

Algunas razones para la conexión de un medio de generación distribuida a la red de distribución son: disminuir el consumo de la energía eléctrica, aumentar la confiabilidad, al mismo tiempo que estos requieren menos inversión y además se utilizan energía renovable.

El sistema de conexión permite conectar el generador con la red de distribución y con las cargas locales, además que debe proporcionar acondicionamiento, protección, control y medición de la unidad de generación distribuida.

En la figura 1.4 se muestran los principales componentes de la conexión a la red de distribución, los cuales se explican a continuación [16].

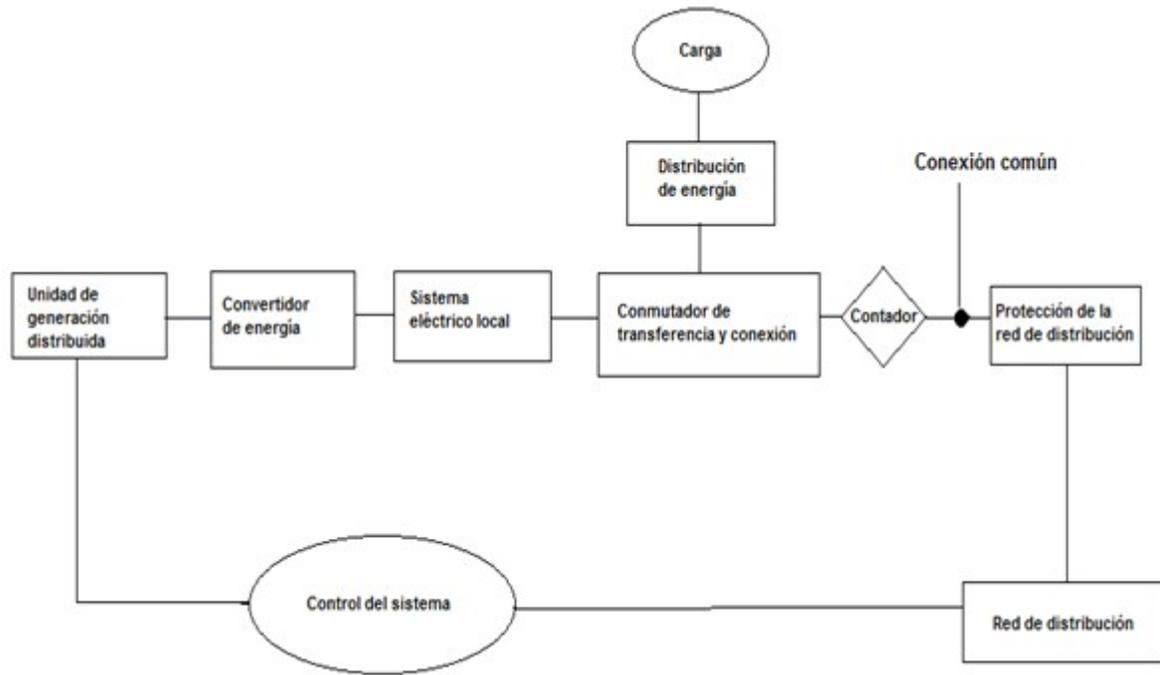


Figura1.4 Componentes de un sistema de conexión a la red de distribución.

Fuente: propia del autor.

- **Unidad de generación distribuida:** es el generador que proporciona la energía, y que en este caso, corresponde a la turbina eólica, que utiliza la energía del viento.
- **Convertidor de energía:** son los dispositivos eléctricos y electrónicos que permiten convertir la corriente continua en corriente alterna, cambiar el nivel de tensión y/o proporcionar aislamiento eléctrico.
- **Sistema eléctrico local:** corresponde a las canalizaciones eléctricas de la instalación al lado de la unidad de generación distribuida.
- **Conmutador de transferencia y conexión:** corresponde al dispositivo automático que permite un cambio de carga entre generadores y la

conexión sincronizada entre la unidad de generación distribuida y la red de distribución.

- **Distribuidor de energía:** son dispositivos automáticos que conectan la unidad de generación distribuida con la canalización eléctrica de la red de distribución.
- **Contador:** corresponde a un dispositivo que mide la energía desde y hacia la red de distribución.
- **Conexión común:** es el punto de conexión del sistema eléctrico local y la red de distribución.
- **Protección de la red de distribución:** son los dispositivos eléctricos de control de operación de los equipos como protección a la red de distribución.
- **Control del sistema:** se realiza a través de un dispositivo que controla el generador y realiza la comunicación, medida y despacho hacia la red de distribución [17].

Una conexión tipo simplificada desde la unidad de generación a la red de distribución para un sistema micro eólico, para una casa y para un conjunto habitacional, como se puede apreciar en las figuras 1.5.

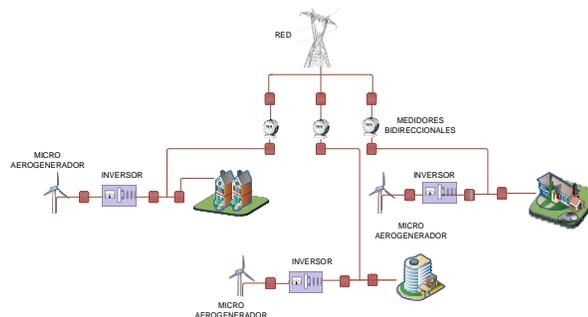


Figura1.5 Conexión tipo de una micro red del sector residencial

Fuente: propia del autor.

CAPÍTULO II

MICRO AEROGENERACIÓN EÓLICA

La energía del viento ha sido aprovechada desde la antigüedad, en muy diversas aplicaciones, y en la actualidad es utilizada, sobre todo para la producción de energía eléctrica.

Un micro aerogenerador eólico se puede definir como un generador eléctrico movido por una turbina accionada por el viento en el rango entre los 20 W y los 2000 W [18].

En este capítulo se tratará sobre los conceptos básicos de micro aerogeneración eólica, el recurso eólico, los principales tipos de aerogeneradores, las pérdidas y eficiencias del micro aerogenerador eólico.

2.1 Recurso eólico.

La evaluación del recurso eólico es una de las principales fases en cualquier desarrollo de un proyecto de energía eólica, ya que los datos obtenidos determinan la viabilidad del mismo. El objetivo de esta evaluación es la elección del correcto aerogenerador y la estimación de la energía eléctrica deseada.

La velocidad, dirección, y turbulencia que tiene el viento depende de algunos factores, por ejemplo: de la rotación de la tierra, la diferencia de temperaturas, la forma del terreno, etc [19].

La evaluación debe incluir: datos del viento, reconocimiento del terreno, obstáculos, altura del montaje, y estimación de la generación de la energía eléctrica.

Los datos más importantes relacionados con el aprovechamiento de la energía eólica son los datos del movimiento, intensidad y estabilidad de los vientos, estos pueden ser obtenidos por:

La NASA: facilita la información con datos más precisos y confiables dados por el satélite QuikSCAT con el fin de determinar los mejores lugares, donde ubicar los aerogeneradores.

En base a los instrumentos que están en el satélite, es posible medir la dirección, la velocidad y la fuerza del viento [20].

El libro Atlas Eólico, editado por el Ministerio de Electricidad y Energías Renovables (MEER), en Quito, contiene información sobre las características del terreno, y permite identificar las zonas de mejor aprovechamiento del viento para la generación eléctrica en ciudades y provincias del Ecuador que cuentan con un alto potencial eólico.

Las provincias de Pichincha, Cañar, Chimborazo, Loja, El Oro, y Azuay son las que poseen el mayor potencial de aprovechamiento de este tipo de energía [21].

Ecuador es uno de los países de gran potencial eólico, esto facilitaría el uso de energía eólica, y ayudaría a satisfacer la gran demanda de energía eléctrica en este país.

En la tabla 2.1 [22], se resume un promedio de la velocidad del viento y la temperatura, de observaciones realizadas diariamente entre las 7 am y 7 pm en el periodo 01/2012 y 01/2014 en la ciudad de Quito en el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (Inamhi) [23] [24], a 10 metros por encima de la superficie del suelo, como se puede apreciar en las figuras 2.1 y 2.2.

Tabla 2.1 Estadística obtenida diariamente en Quito 01/2012 - 01/2014 entre 7 am y 7 pm de la velocidad media del viento y su temperatura promedio del aire.

| Mes | Ene 01 | Feb 02 | Mar 03 | Abr 04 | May 05 | Jun 06 | Jul 07 | Ago 08 | Sep 09 | Oct 10 | Nov 11 | Dic 12 | Anual 1-12 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|
| / | 4,65 | 6,2 | 6,2 | 7,75 | 7,75 | 6,2 | 6,2 | 6,2 | 6,2 | 4,65 | 4,65 | 6,2 | 6,071 |
| Tp (°C) | 17 | 16 | 16 | 16 | 17 | 18 | 18 | 18 | 18 | 17 | 16 | 17 | 17 |

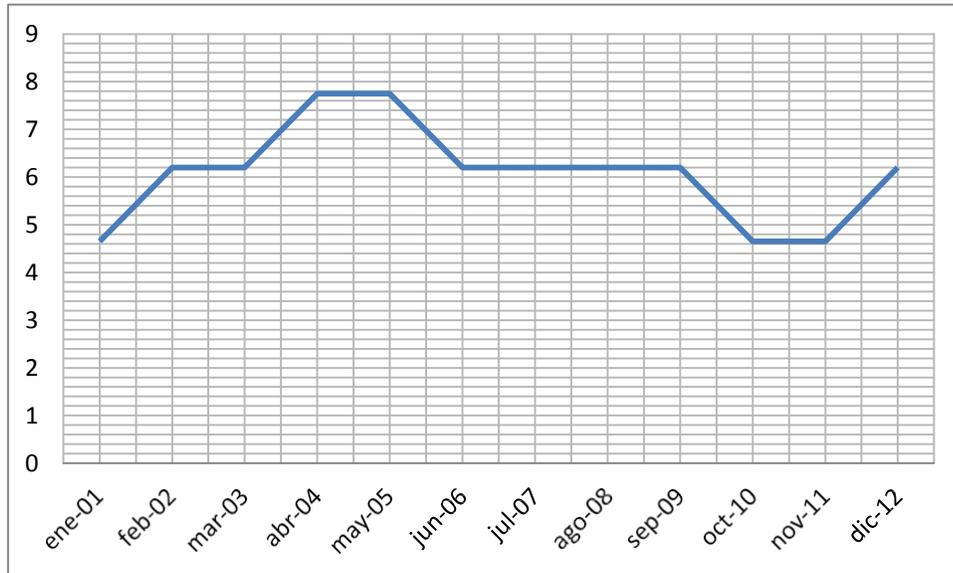


Figura 2.1 Velocidad media del viento (m/s)

Fuente: Propia del autor.

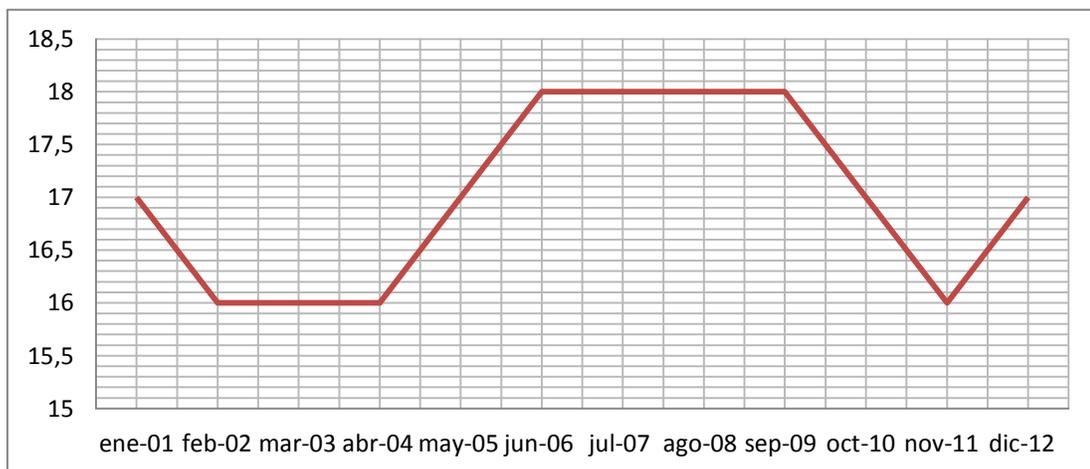


Figura 2.2 Temperatura promedio del aire (°C)

Fuente: Propia del autor.

2.1.1 La rosa de los vientos

La rosa de los vientos muestra información acerca de distribuciones de velocidades del viento y la frecuencia de variación de las direcciones, esto se basa por observaciones de las instalaciones meteorológicas que recogen los datos de velocidad media cada cierto tiempo, por lo general cada 10 minutos o 1 hora durante varios años, haciendo esto útil para situar aerogeneradores [25].

Para poder evaluar los recursos eólicos de un área geográfica hay que realizar mediciones continuas de la velocidad y dirección del viento para saber si es apta para la instalación de aerogeneradores, para poder controlar las variaciones del viento de un año a otro, a lo largo de un año, un mes, un día [25].

En la actualidad la rosa del viento es dividida en 360°, teniendo de origen el norte correspondiente a 0°, el este a 90°, el sur a 180°, el oeste a 270° y 360° nuevamente al norte, contando en el sentido de giro del reloj. De esta manera se obtiene la dirección del viento [26], como se puede apreciar en las figuras 2.3 [27].

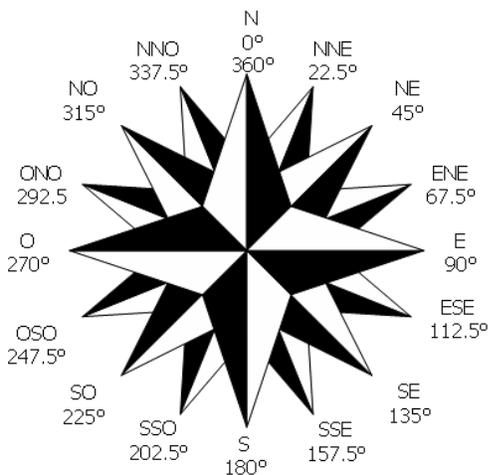


Figura 2.3 Rosa de los vientos.

Fuente: G. Guerrón, E. García, and A. Montero, "Influencia de las ráfagas de viento en la calidad de la energía de los parques eólicos (Influence of wind gusts in power quality on wind farms),"

pp. 25–44, 2014.

En la tabla 2.2 [28] se tiene por ejemplo en el mes de octubre del año 2014, la velocidad y dirección del viento, ver anexo A.

Tabla 2.2 Resultados diarios de la velocidad y dirección del viento, del mes de octubre del sector de los chillos del 2014.

| Año | Mes | Día | Velocidad (m/s) | Dirección (°) |
|------|-----|-----|-----------------|---------------|
| 2014 | 10 | 1 | 1,08 | 215,50 |
| 2014 | 10 | 2 | 1,1 | 132,79 |
| 2014 | 10 | 3 | 0,95 | 272,34 |
| 2014 | 10 | 4 | 1,31 | 144,89 |
| 2014 | 10 | 5 | 1,14 | 114,87 |
| 2014 | 10 | 6 | 0,64 | 170,17 |
| 2014 | 10 | 7 | 1,68 | 230,09 |
| 2014 | 10 | 8 | 1,06 | 279,22 |
| 2014 | 10 | 9 | 0,91 | 127,21 |
| 2014 | 10 | 10 | 0,83 | 31,33 |
| 2014 | 10 | 11 | 1,02 | 191,29 |
| 2014 | 10 | 12 | 1,23 | 111,07 |
| 2014 | 10 | 13 | 1,67 | 318,5 |
| 2014 | 10 | 14 | 1,41 | 128,75 |
| 2014 | 10 | 15 | 0,91 | 178,12 |
| 2014 | 10 | 16 | 1,13 | 241,72 |
| 2014 | 10 | 17 | 0,79 | 274,6 |
| 2014 | 10 | 18 | 1,01 | 89,47 |
| 2014 | 10 | 19 | 0,81 | 177,88 |
| 2014 | 10 | 20 | 0,6 | 130,65 |
| 2014 | 10 | 21 | 0,96 | 133,26 |
| 2014 | 10 | 22 | 1,1 | 190,94 |
| 2014 | 10 | 23 | 1,26 | 266,05 |
| 2014 | 10 | 24 | 0,93 | 244,81 |
| 2014 | 10 | 25 | 1,02 | 128,87 |
| 2014 | 10 | 26 | 1,2 | 221,19 |
| 2014 | 10 | 27 | 0,91 | 281,24 |
| 2014 | 10 | 28 | 1,08 | 196,04 |
| 2014 | 10 | 29 | 0,8 | 138,72 |
| 2014 | 10 | 30 | 0,82 | 275,54 |
| 2014 | 10 | 31 | 1,32 | 156,88 |

Los datos de la tabla 2.2 permiten conocer la frecuencia y la velocidad media del viento para distintas direcciones, estas son distribución de frecuencia de las clases de viento y la rosa de viento (WRPLOT View - Freeware) [29],[30], los cuales se aprecia en las figuras 2.4 y 2.5

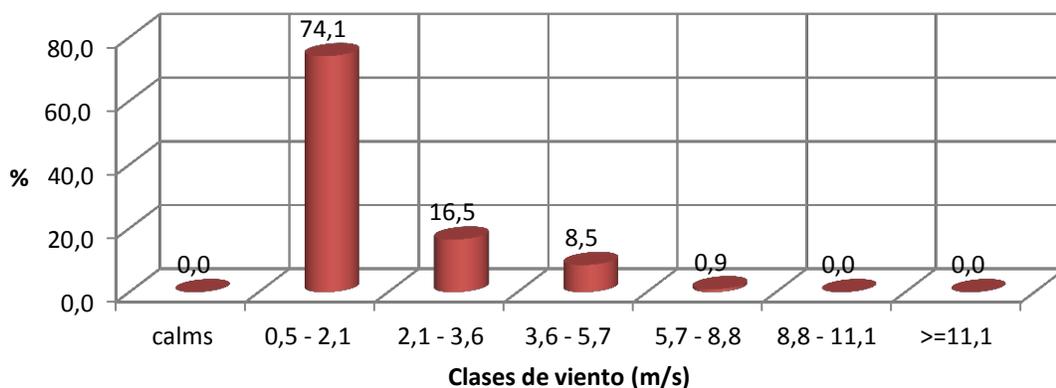


Figura 2.4 Distribución de frecuencia de las clases de viento

Fuente: Propia del autor.

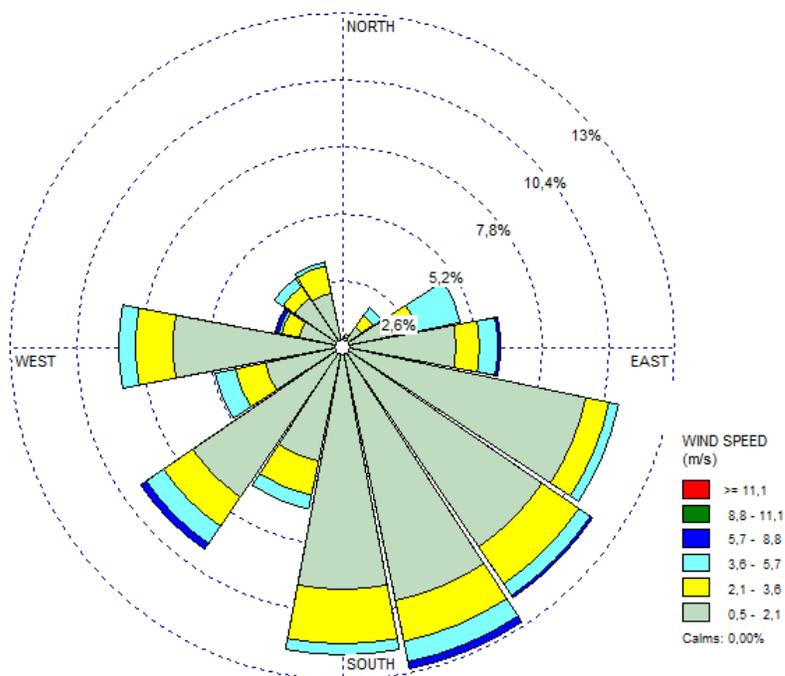


Figura 2.5 Rosa de los vientos correspondiente a la estación meteorológica.

Fuente: Propia del autor.

2.1.2 La teoría de Betz.

La teoría de Betz, supone que el aerogenerador está ubicado en un sector donde existe la energía cinética del viento, las hélices del aerogenerador no aprovechan toda la energía cinética del viento [31], apreciando la figura 2.6, donde v_1 es la velocidad del viento delante del rotor, v es la velocidad del viento a la altura del rotor y v_2 es la velocidad del viento detrás del rotor [32].

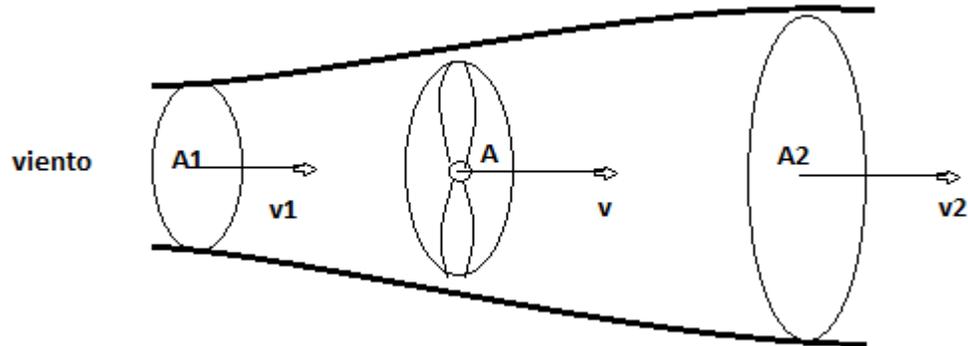


Figura 2.6 Modelo de Betz.

Fuente: J. López, “Energía Renovables”, 2011, Madrid, España.

Considerando que la velocidad promedio del viento en el área está determinada por la ecuación 2.4

$$- \quad (2.1)$$

Por lo que la ecuación de la potencia útil es:

$$- \quad (\rightarrow) (\rightarrow) \quad (2.2)$$

Donde:

: Potencia máxima [W]

C_p : Coeficiente de potencia de la turbina [%]

: Densidad del aire [Kg/m^3]

A: Área

V: Velocidad del viento a la altura del rotor [m/s]

V1: Velocidad del viento delante del rotor [m/s]

V2: Velocidad del viento detrás del rotor [m/s]

El valor máximo para la potencia se obtiene: $\frac{16}{27}$

Por lo tanto la potencia máxima es:

$$(\text{---}) - \quad (2.3)$$

Comparándola con la ecuación de la potencia útil, se ve que: (---)

que se conoce como el límite de Betz [31], como se puede apreciar en la figura 2.7 [32].

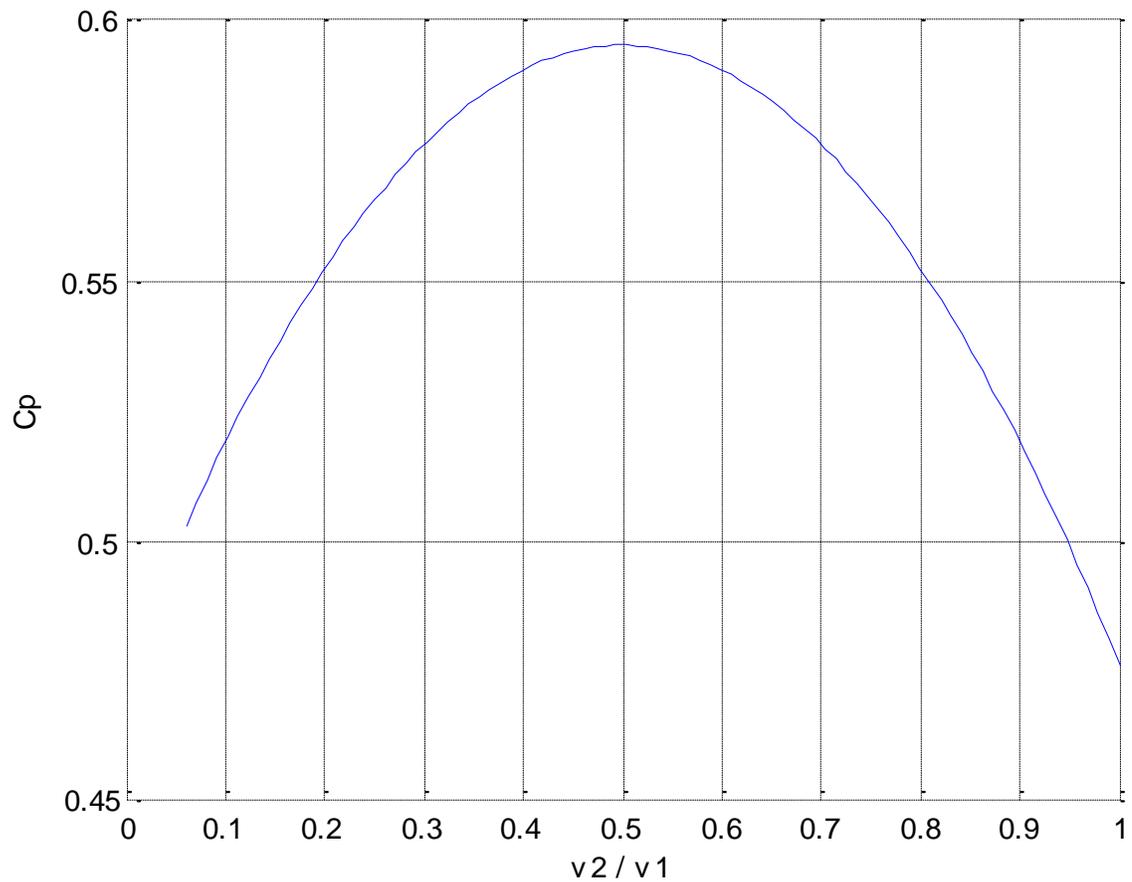


Figura 2.7 Coeficiente de potencia de un rotor.

Fuente: J L. A. Veritat, *Introducción a la teoría de las turbinas eólicas*. 2009, pp. 1–172.

2.1.3 Distribución de Weibull.

Se observa experimentalmente que la distribución de frecuencias de una serie de viento, o sea, la proporción relativa de los diferentes rangos de velocidades, se puede ajustar a una distribución de densidad de probabilidad, que tiene una forma analítica que permite realizar cálculos de una forma mucho más sencilla que el tratamiento directo de la serie completa. [31].

La distribución más comúnmente empleada para la representación de una serie de viento es la función densidad de probabilidad de Weibull, cuya expresión es:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2.4)$$

Donde:

V: velocidad del viento [m/s]

c : los parámetros que caracterizan la distribución

k: los parámetros que caracterizan la distribución

e: constante exponencial (2.71828)

F(V): función de distribución acumulada

Entonces, la función de distribución acumulada, F(V), de la probabilidad de que el viento sea igual o menor a un determinado valor, esto es:

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2.5)$$

En la figura 2.8 se ve la distribución de Weibull, que muestra la densidad de probabilidad del viento en función de su velocidad en m/s [31].

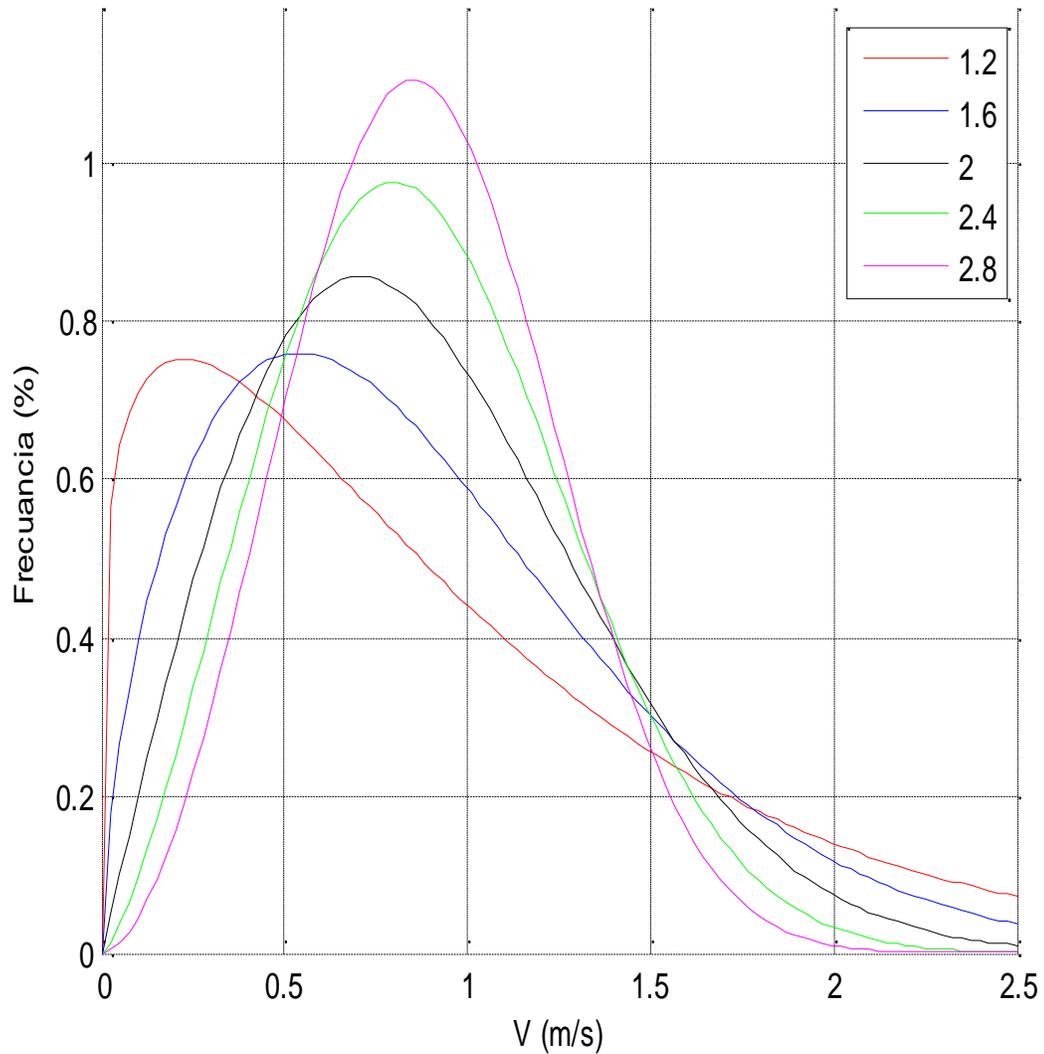


Figura 2.8 Distribución de Weibull

Fuente: Propia del autor.

2.1.4 El modelo WRF.

El modelo WRF que viene de las siglas de: “Weather Research and Forecasting Model”, hace referencia a las variables de la atmósfera: como viento, presión,

temperatura, entre otras, en un dibujo tridimensional de alta resolución, cuyos niveles siguen la topografía del terreno [31].

Este modelo proporciona información obtenida por cálculos matemáticos a partir de datos iniciales de los parámetros considerados. Y los resultados permiten identificar las zonas con mejores condiciones del recurso eólico, pero no ofrece cuantitativamente los valores absolutos que se obtienen en una determinada zona.

El modelo tiene una amplia gama de opciones para representar procesos importantes como son: las interacciones del suelo con la atmósfera, la radiación solar, la constitución física de las nubes, las precipitaciones y turbulencias. El WRF es un modelo de escala regional, definido por información meteorológica de otros modelos globales de menor resolución. Además, es una herramienta muy utilizada a nivel mundial [31].

El modelo permite considerar los procesos atmosféricos que afectan el viento cerca de la superficie terrestre. Los más importantes son: el suelo, la capa superior y la radiación.

Los periodos que se consideran corresponden a los meses desde enero a junio y de julio a diciembre del año 2013, a diferentes alturas desde el suelo. Ello permite una modelización, con la representación del comportamiento para algunos periodos de tiempo de las variables consideradas.

Se selecciona el año 2013, pues para ese año se cuenta con mapas y registros dados en la zona de la provincia de Pichincha, información que es utilizada para realizar predicciones aproximadas para los siguientes años.

2.1.5 El modelo MASS.

El modelo Mesoscale Atmospheric Simulation System, MASS, es un modelo numérico de investigación. El MASS simula los fenómenos físicos de la atmósfera, como la energía, cantidad de movimiento y la conservación de la masa. Además considera la turbulencia del viento, a través de la viscosidad y la estabilidad térmica del viento [31].

El MASS maneja el modelo Wind Map, que simula el flujo de viento, y con una dependencia de los efectos del terreno y de las variaciones en la superficie. El modelo MASS utiliza datos globales, geofísicos y meteorológicos, obtenidos de datos históricos dados por la NCEP y por la NCAR, National Center for Environmental Prediction y National Center for Atmospheric Research, respectivamente.

2.2 Tipos de aerogeneradores.

Los aerogeneradores se pueden clasificar según el eje del rotor y según la incidencia del viento.

Aerogenerador de eje vertical: es omnidireccional y el generador es instalado a poca altura del suelo, por lo que disminuye el costo del montaje, sin embargo, su eficiencia es menor que otro tipo de aerogeneradores, y además su mantenimiento resulta complejo porque es necesario desmontar todo el aerogenerador [33].

Aerogenerador con rotor Savonius: contiene un rotor muy simple, consiste en cilindros huecos desplazados respecto de su eje, de forma que la parte cóncava es empujada por el viento, y su parte convexa presenta una menor resistencia al giro. No son muy útiles para la generación de electricidad debido a su elevada resistencia al aire, pero su bajo costo y fácil construcción les hace útiles para aplicaciones mecánicas [33].

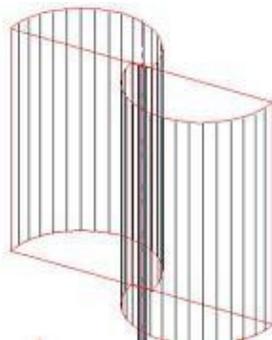


Figura 2.9 Aerogenerador con rotor Savonius.

Fuente: "OPEXenergy, operación y mantenimiento." [Online]. Available: <http://opex-energy.com/>. [Accessed: 06-Feb-2015].

Aerogenerador con rotor Darrieus: consiste en un eje vertical colocado sobre el rotor, con dos o más palas simétricas en forma de las alas de un avión. Ofrece mayores velocidades que las del rotor Savonius, aunque necesita de un sistema externo de arranque [33].



Figura 2.10 Aerogenerador con rotor Darrieus.

Fuente: "OPEXenergy, operacion y mantenimiento." [Online]. Available: <http://opex-energy.com/>. [Accessed: 06-Feb-2015].

Aerogenerador con rotor Giromill: consisten en palas verticales unidas al eje por brazos horizontales. Las palas verticales cambian su orientación a medida que se produce el giro del rotor para un mayor aprovechamiento de la fuerza del viento [33].



Figura 2.11 Aerogenerador con rotor Giromill.

Fuente: "OPEXenergy, operacion y mantenimiento." [Online]. Available: <http://opex-energy.com/>. [Accessed: 06-Feb-2015].

Aerogenerador con rotor Windside: similar al rotor Savonius, pero con un perfil alabeado con torsión que asciende por el eje vertical, su forma aerodinámica permite gran eficiencia, comparable con la de los aerogeneradores de eje horizontal [33].



Figura 2.12 Aerogenerador con rotor Windside.

Fuente: "OPEXenergy, operacion y mantenimiento." [Online]. Available: <http://opex-energy.com/>. [Accessed: 06-Feb-2015].

Aerogenerador de eje horizontal: tienen mayor eficiencia de energía y poseen mayor velocidad de rotación, por lo que los engranajes tienen menor relación de multiplicación de giro, además aprovechan mejor el aumento de la velocidad del viento con la altura. La mayoría de los aerogeneradores de eje horizontal que se construyen son de tipo tripalas [33].

Aerogenerador tipo tripala: es el más empleado en la actualidad, consta de 3 palas colocadas formando 120° entre sí. No se utiliza mayor número de palas porque aumentaría el peso y costo del aerogenerador [33].



Figura 2.13 Aerogenerador tipo tripala.

Fuente: "OPEXenergy, operacion y mantenimiento." [Online]. Available: <http://opex-energy.com/>. [Accessed: 06-Feb-2015].

Aerogenerador tipo bipala: aunque se ahorra el peso y el costo respecto a los aerogeneradores tripala, necesitan mayor velocidad de giro para producir la misma energía, y un diseño especial para lograr su estabilización [33].



Figura 2.14 Aerogenerador tipo bipala.

Fuente: "OPEXenergy, operacion y mantenimiento." [Online]. Available: <http://opex-energy.com/>. [Accessed: 06-Feb-2015].

Aerogenerador tipo monopala: tienen los mismos inconvenientes que los bipala, y se hace necesario incluir un contrapeso en el lado opuesto de la pala [33].



Figura 2.15 Aerogenerador tipo monopala.

Fuente: "OPEXenergy, operacion y mantenimiento." [Online]. Available: <http://opex-energy.com/>. [Accessed: 06-Feb-2015].

Según la orientación a la dirección del viento:

Orientadas a barlovento: el rotor se encuentra de frente a la dirección del viento, consiguiendo mayor aprovechamiento de la fuerza de este, pero es necesario realizar la orientación hacia el viento [33].

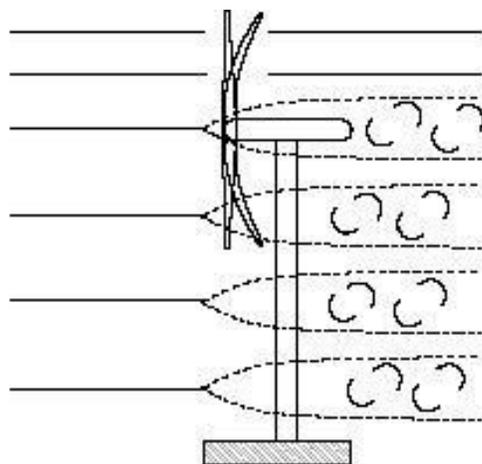


Figura 2.16 Aerogenerador a barlovento.

Fuente: "OPEXenergy, operacion y mantenimiento." [Online]. Available: <http://opex-energy.com/>. [Accessed: 06-Feb-2015].

Orientadas a sotavento: el rotor se encuentra en sentido contrario a la dirección del viento, aunque es menor el aprovechamiento de este que en el caso anterior, el viento orienta con su propia fuerza al aerogenerador [33].

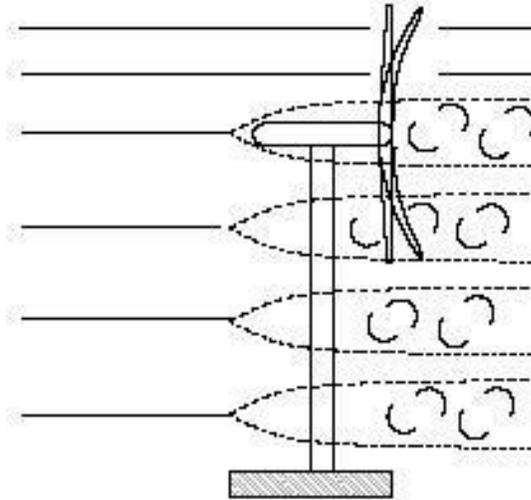


Figura 2.17 Aerogenerador a sotavento.

Fuente: "OPEXenergy, operacion y mantenimiento." [Online]. Available: <http://opex-energy.com/>. [Accessed: 06-Feb-2015].

2.2.1 De acuerdo a la potencia suministrada.

De acuerdo a la potencia suministrada se puede clasificar a los aerogeneradores de la siguiente manera:

Aerogeneradores de alta potencia: se utilizan para la producción de energía a gran escala y para fines comerciales, se conectan a la red formando centrales eólicas-eléctricas. El orden de su potencia es mayor a los 200 kW llegando hasta los gigavatios. Generalmente son aerogeneradores de eje horizontal tripalas [33].

Aerogeneradores de media potencia: proporcionan potencias en el rango mayor de 50 kW llegando hasta los 200 kW. Se utilizan conectados a la red o junto a un sistema de respaldo [33].

Aerogeneradores de baja potencia: proporcionan potencias en el rango igual o menor a 50 kW, aunque se puede aumentar la potencia total suministrada utilizando equipos adicionales en zonas rurales [33].

2.3 Caracterización de los micro aerogeneradores.

Los micro-aerogeneradores son utilizados para la producción de energía en baja escala, con potencias de hasta 20 KW, y generalmente se usan en casas, edificios, y sitios aislados, ya sea conectándose a la red o mediante la utilización de baterías que almacenan la energía producida [34].

A la energía eólica doméstica normalmente se le llama energía micro-eólica, pues se usan aerogeneradores que entrarían dentro del rango de los micro aerogeneradores. Por lo general el límite de producción máximo de energía es inferior a los 20 KW.

Un micro-aerogenerador está compuesto, principalmente del rotor, en el que van las palas; del generador o alternador, y de la parte posterior o cola. Obviamente dispone de un mecanismo de sujeción a la torre. En la figura 2.17 se puede apreciar estos elementos.

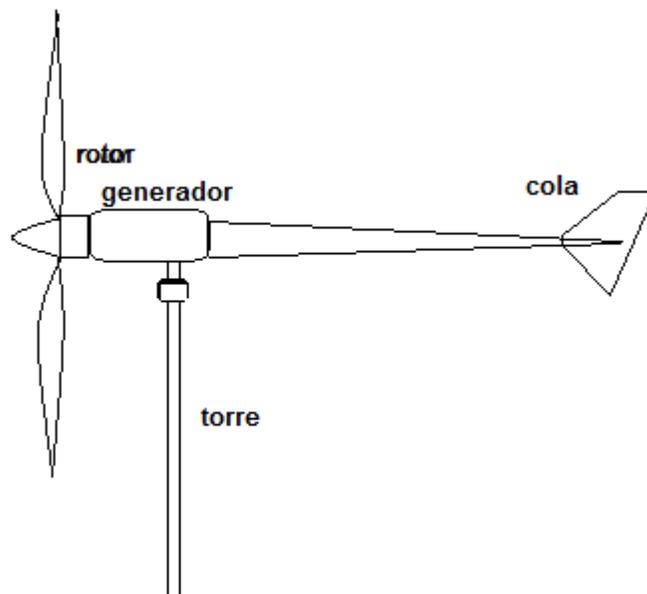


Figura 2.18 Partes del micro-aerogenerador.

Fuente: Propia del autor.

2.4 Eficiencia de los micro aerogeneradores eólicos.

La energía que puede ser obtenida de un aerogenerador de la energía del viento, no tiene una eficiencia del ciento por ciento, siempre tenemos pérdidas mecánicas y también eléctricas, además, como se verá más adelante toda turbina tiene una eficiencia propia, debido a que la energía cinética del viento, no podríamos aprovecharla totalmente, porque tendríamos que parar al viento. Como esto no es posible, solo se logra disminuir la velocidad del viento, tras la turbina, y por lo tanto, hay una energía que no se la puede aprovechar [35].

2.4.1 Efectos como se producen Flickers y armónicos:

Para analizar los efectos que produce en los generadores eólicos se analiza el comportamiento de algunos fenómenos como:

Flicker: Se refieren a las fluctuaciones de corriente y tensión que tiene una determinada máquina en operación continua [36].

Los efectos que se produce en los aerogeneradores por los flickers son provocados por la conexión de una máquina eléctrica en la red, generando sobre corriente a la red de corta duración [37], [38].

Los flickers de régimen permanente presentes en turbinas eólicas, son causados por ráfagas de viento variando la velocidad en los aerogeneradores, por lo tanto este fenómeno no puede ser compensado ni controlado en su totalidad por el sistema de control [39].

En la figura 2.19 consiste en los cambios de amplitud de voltaje periódicos pequeños que se producen en frecuencias entre 0,5 Hz y 25 Hz como turbinas de viento, podría ser perjudicial para equipos electrónicos [39].

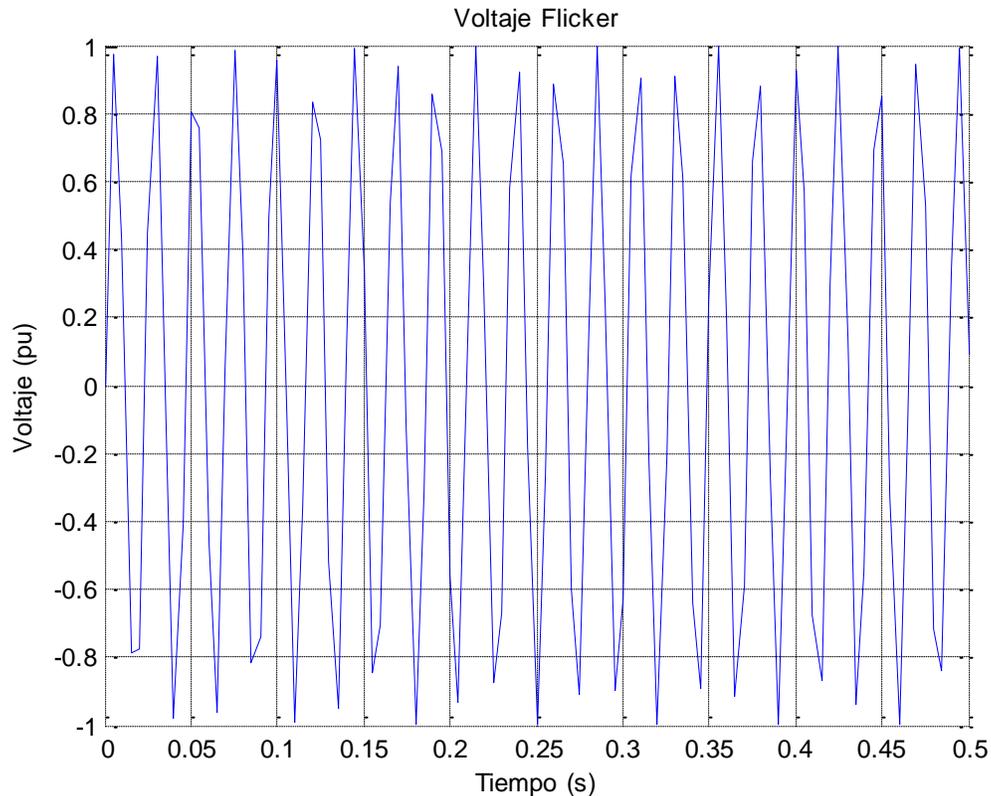


Figura 2.19 Voltaje Flicker

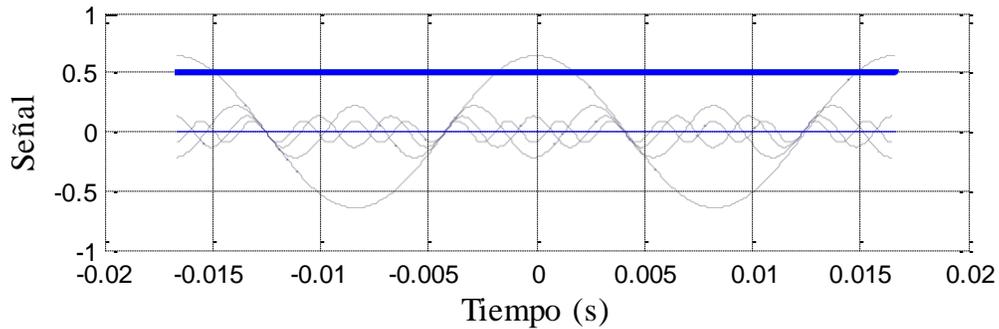
Fuente: H. Ramiro and P. Pila, "ESTUDIO DEL FLICKER EN UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA," 2010.

Armónicos: Hay diversos procedimientos para cuantificar las corrientes armónicas, presentes bajo condiciones de operación estable y operando con potencia reactiva cercana a cero.

Se deben realizar algunas mediciones de series de intervalos de 10 minutos, en las tres fases, por cada tramo de potencia. Se efectúan una serie de mediciones y se reportan los valores máximos.

Los aerogeneradores no están exentos de tener distorsión armónica de voltaje y corriente, en estos dispositivos el fenómeno se presenta por diversos aspectos tales como: saturación en los transformadores, operaciones en la subestaciones, conexiones de cargas no lineales a la red entre otros [40], [41], [42], como se aprecia en la figura 2.20.

Señales Armónicas



Señal reconstruida

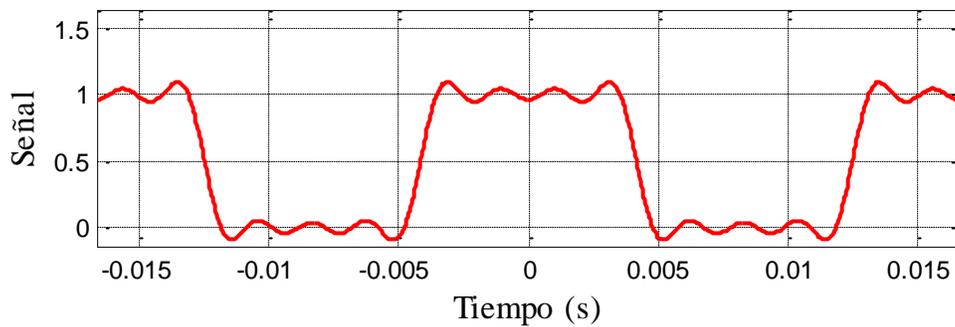


Figura 2. 20 Armónico a la red

Fuente: G. Ahrtz, A. Münnemann, and D. Fernández, “TURBINAS EÓLICAS,” pp. 47–54, 2007.

Límites de distorsión armónica.

Según la norma IEEE 519, existe una limitación normalizada, sobre la calidad de la corriente armónica que un consumidor puede inyectar a la red de distribución eléctrica. Los límites de distorsión se basan al tamaño del consumidor con respecto al sistema de distribución [43].

Estos límites se dan entre corriente de cortocircuito (I_{sc}) y la demanda máxima de corriente de la carga del usuario (I_L), ver tabla 2.3 [43], [44].

$$\text{---} \quad (2.6)$$

Donde :

SCR= Relación de corto circuito.

I_{sc} = Corriente de cortocircuito.

I_L = Corriente de carga

Tabla 2.3 Límites en la Distorsión de la Corriente según IEEE 519.

| Límites de Corriente Armónica para Carga no lineal en el Punto Común de acoplamiento con Otras Cargas, para voltajes entre 120 - 69,000 volts. | | | | | | |
|--|------|---------|---------|---------|------|------|
| Maxima Distorsión Armónica Impar de la Corriente, en % del Armónico fundamental | | | | | | |
| ISC/IL | <11 | 11£h<17 | 17£h<23 | 23£h<35 | 35£h | TDD |
| <20 | 4.0 | 2.0 | 1.5 | 0.6 | 0.3 | 5.0 |
| 20<50 | 7.0 | 3.5 | 2.5 | 1.0 | 0.5 | 8.0 |
| 50<100 | 10.0 | 4.5 | 4.0 | 1.5 | 0.7 | 12.0 |
| 100<1000 | 12.0 | 5.5 | 5.0 | 2.0 | 1.0 | 15.0 |
| >1000 | 15.0 | 7.0 | 6.0 | 2.5 | 1.4 | 20.0 |
| Los armónicos pares se limitan al 25% de los límites de los armónicos impares mostrados anteriormente | | | | | | |
| * Todo equipo de generación se limita a estos valores independientemente del valor de Isc/Il que presente | | | | | | |

Donde:

ISC = corriente Máxima de cortocircuito en el punto de acoplamiento común.

IL = Máxima demanda de la corriente de carga (a frecuencia fundamental) en el punto de acoplamiento común.

TDD = Distorsión total de la demanda (RSS) en % de la demanda máxima.

Los límites armónicos de voltaje recomendados se aprecia en niveles lo suficientemente pequeños como para confirmar que el equipo funcione adecuadamente, ver Tabla 2.4 [43], [44].

Tabla 2.4. Límites de distorsión de Voltaje según IEEE 519

| Voltaje de barra en el punto de acoplamiento común | Distorsión individual de Voltaje (%) | Distorsión total del voltaje THD (%) |
|--|--------------------------------------|---|
| Hasta 69 KV | 3.0 | 5.0 |
| De 69 KV a 137.9 KV | 1.5 | 2.5 |
| 138 KV y mas | 1.0 | 1.5 |
| Nota: Los sistemas de alto voltaje pueden llegar hasta un 2.0% en THD cuando lo que causa es un alto voltaje terminal DC, el cual podría ser atenuado. | | |

2.4.2 Potencia y rendimiento del aerogenerador:

La potencia del viento debe ser considerada, en primer lugar para el cálculo de la potencia de un aerogenerador. Para calcularla se evalúa la energía cinética () de la masa (**m**) de aire que atraviesa, por unidad de tiempo (**t**), la sección (**A**) barrida por las palas del aerogenerador [45].

Entonces, la potencia eólica es:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (2.7)$$

Donde:

P: Potencia eólica [W]

ρ : Densidad del aire [Kg/m³]

A: Área

V: Velocidad del viento [m/s]

2.4.3 Potencia de una turbina.

Una turbina nunca puede extraer toda la potencia del viento, la turbina convierte solo una fracción de esta energía en energía mecánica de rotación. A esta fracción se le llama coeficiente de potencia de la turbina, y se le representará como C_p . Además: [45].

Entonces:

$$P = C_p \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (2.8)$$

Donde:

P: Potencia de una turbina [W]

C_p : Coeficiente de potencia de la turbina [%]

ρ : Densidad del aire [Kg/m³]

A: Área

V: Velocidad del viento [m/s]

Además los micro-aerogeneradores arrancan a partir de una determinada velocidad del viento de 3 m/s y hasta de 5 m/s [45].

2.4.4 Rendimiento real del aerogenerador.

La límite de Betz nos da el rendimiento máximo 59.26% de la potencia de un aerogenerador. El rendimiento real del aerogenerador se puede calcular teniendo en cuenta los rendimientos de los diferentes componentes del aerogenerador[46]:

(2.9)

Donde:

η_h = Rendimiento de la hélice 85%.

η_b = Rendimiento de betz (C_p) 59,3%

η_m = Rendimiento del multiplicador 98%.

η_a = Rendimiento del alternador 95%.

η_t = Rendimiento del transformador 98%.

Obteniéndose un rendimiento real (R) de: 45,96%

CAPÍTULO III

MODELIZACIÓN DEL MICRO AEROGENERADOR

El modelamiento de un sistema físico es muy importante, ya que permite predecir su comportamiento, bajo circunstancias reales.

En este capítulo se realiza la modelización de un micro aerogenerador, para uso en un sistema doméstico a través del recurso eólico disponible, su gestión energética e instalación a la red de distribución.

3.1 Modelización del recurso eólico

La modelización del recurso eólico sobre el sitio en el cual va a ser desarrollado el sistema de aerogeneración, en este caso el sector de Iñaquito, permite identificar la distribución y la circulación de los vientos dominantes.

La región climática en el territorio ecuatoriano, que se analizará es: la Sierra, donde debido a su gran región montañosa, hace que los vientos sean más bien acelerados. Estos fuertes vientos, que son producidos a gran altura, hacen que la energía del viento disminuya con la densidad del aire.

En el Atlas Eólico se puede apreciar las condiciones mensuales y anuales de viento para todas las regiones del territorio Ecuatoriano, que son de interés en la modelización del sistema eólico [21].

3.1.1 Direcciones de la velocidad del viento

Se Han obtenido los datos de las mediciones realizadas en el mes de marzo de 2014 por el INAMHI. Se escogió este mes porque por ser uno de los menos ventosos del año (el análisis se lo realizará para el menos óptimo de los escenarios).

Se han escogido los datos a 10m de altura, teniendo en cuenta que el proyecto está dirigido al sector residencial de Quito, es decir, a un sector sin mucha

capacidad de inversión económica, y limitada en el aspecto estético – constructivo, por las ordenanzas municipales.

Se escogió el sector de Ñaquito por ser un lugar en el que predominan edificaciones altas, lo que permite instalar un aerogenerador, sin necesidad de inversiones económicas altas en obra civil [47].

En la figura 3.1 se puede apreciar la ubicación del anemómetro.

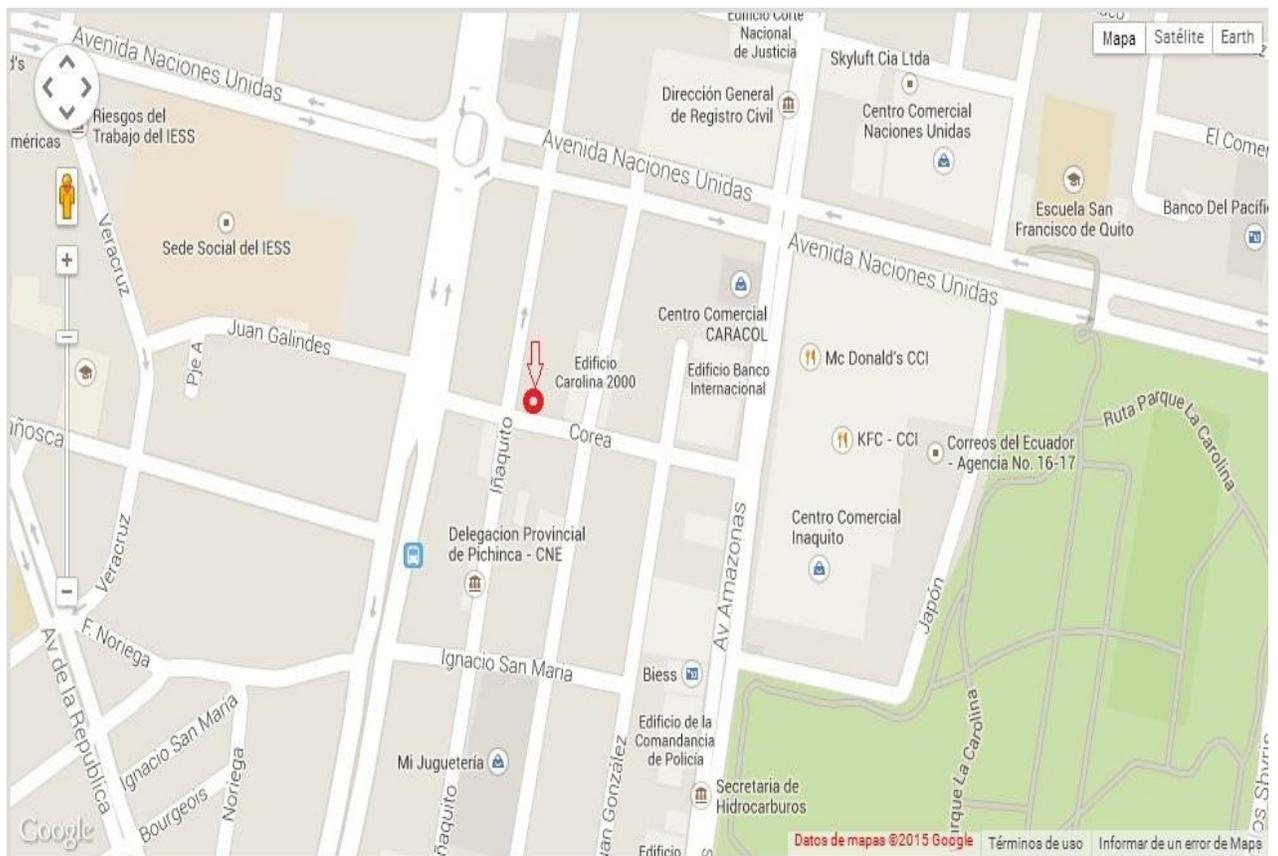


Figura 3.1 Ubicación del anemómetro

Fuente: “Buscar Ñaquito mapa | Karta-Online.com.” [Online]. Available: <http://karta-online.com/es/>. [Accessed: 25-Feb-2015].

Se desea saber la dirección y la velocidad del viento en el lugar escogido, para lo cual se realiza un análisis estadístico de los datos obtenidos por el anemómetro lo cual se aprecia en la figura 3.2.

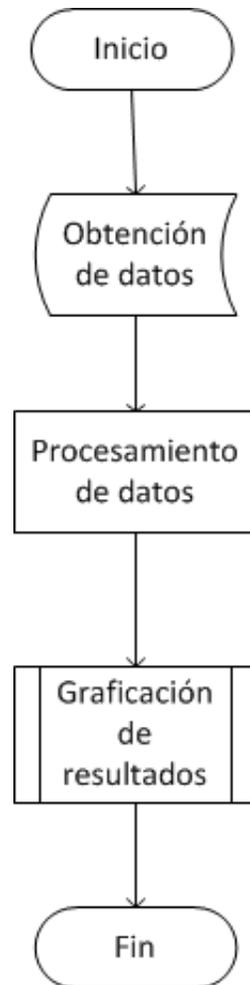


Figura 3.2 Flujo grama para la selección del lugar

Fuente: Propia del autor.

Los resultados de la dirección predominante en que sopla el viento, se muestran en las figuras 3.3, en forma de barras verticales, figura 3.4 muestra por medio de la rosa de los vientos la dirección del viento y la figura 3.5 indica la distribución de frecuencia del viento .

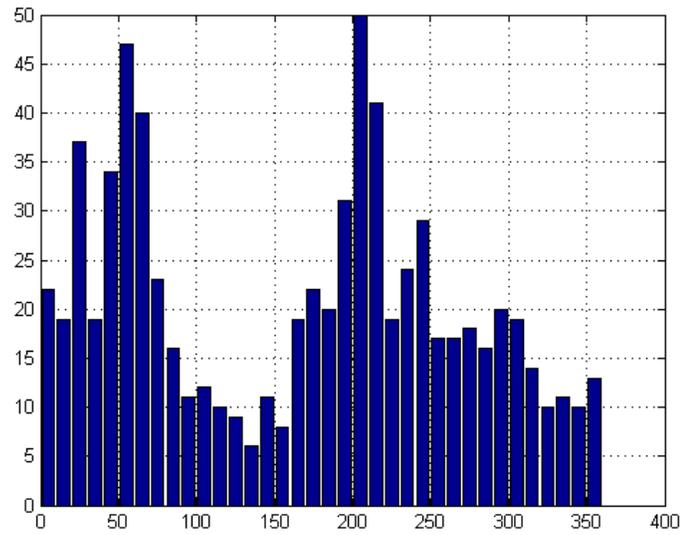


Figura 3.3 Distribución de direcciones del viento

Fuente: Propia del autor.

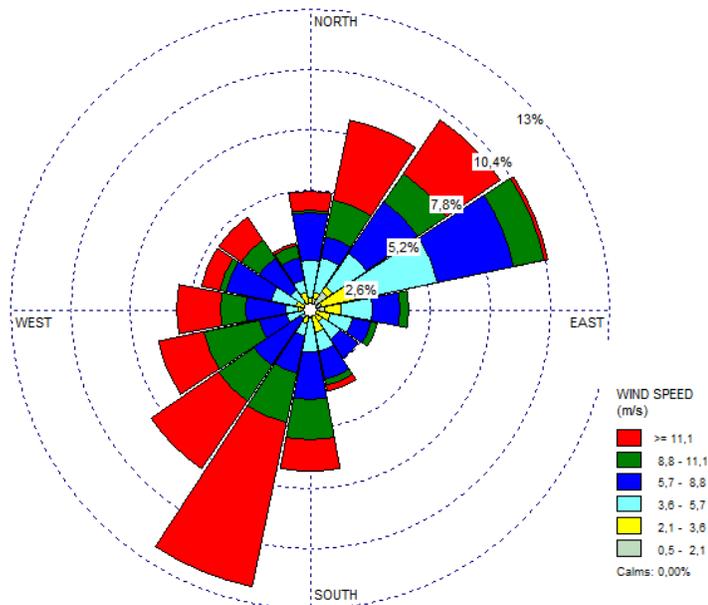


Figura 3.4 Gráfico de las direcciones del viento

Fuente: Propia del autor.

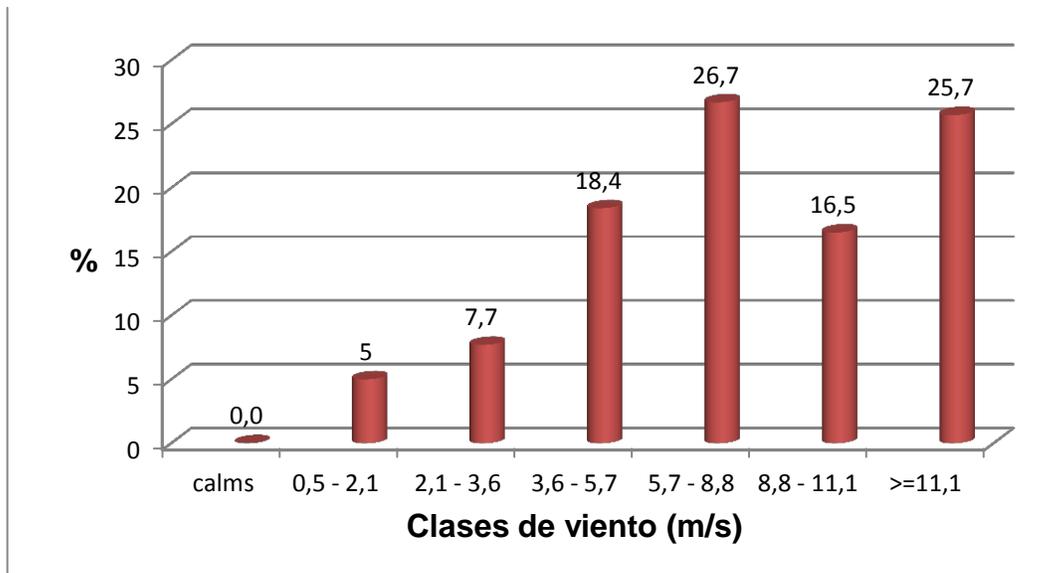


Figura 3.5 Distribución de frecuencia de las clases de viento

Fuente: Propia del autor.

Para evitar colocar aerogeneradores perpendiculares a la dirección predominante del viento, se debe utilizar un aerogenerador con mecanismo de auto-orientación.

3.1.2 Velocidades del viento

La velocidad que alcanza el viento es de suma importancia, ya que la potencia eléctrica generada es proporcional a ella, además, todo aerogenerador tiene un umbral mínimo de velocidad de viento para empezar a generar electricidad (cut-in), y un umbral máximo de velocidad de viento, más allá del cual deja de trabajar, para evitar daños en su estructura (cut-out).

Interesa entonces encontrar las velocidades mínima y máxima del viento, así como la velocidad promedio, para elegir el modelo de aerogenerador adecuado para el proyecto.

Debido a la gran variabilidad de valores en la velocidad de viento, se realizó un análisis estadístico de los datos obtenidos, tomando como base el modelo de distribución de probabilidades de Weibull, del cual se habló en el capítulo 2.

Los resultados de dicho análisis se pueden observar gráficamente en la figura 3.6.

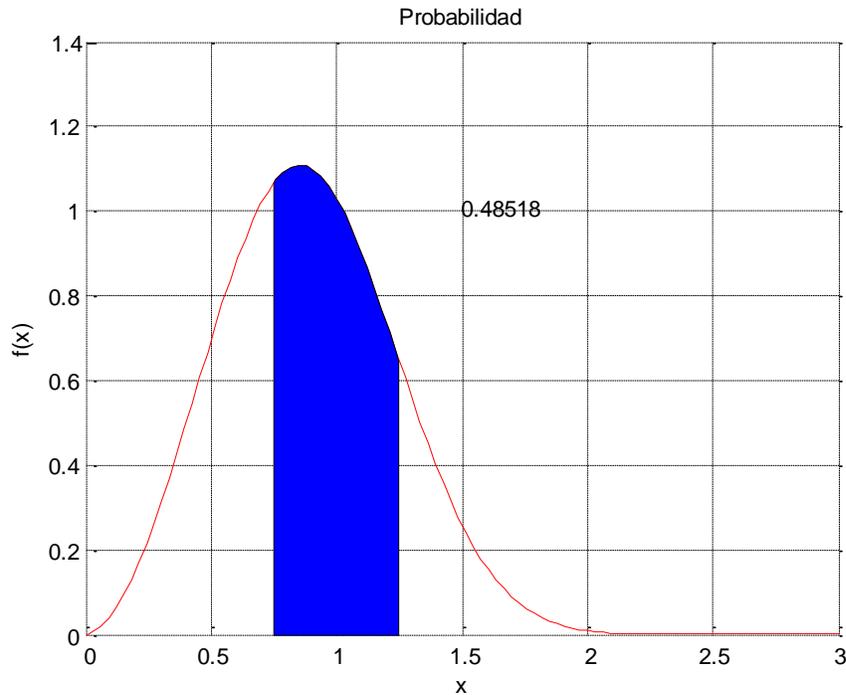


Figura 3.6 Distribución probabilística de la velocidad del viento

Fuente: Propia del autor.

3.1.3 Tiempo de funcionamiento de un aerogenerador

Como ya se dijo antes, un aerogenerador funciona cuando la velocidad del viento es superior a un valor mínimo (cut-in) e inferior a un valor máximo (cut-out). Para la mayoría de aerogeneradores, estas velocidades son 4 m/s y 18 m/s, respectivamente. Se debe entonces calcular el número de horas a lo largo del mes de marzo en las que la velocidad del viento ha estado comprendida entre estos dos márgenes. El script para encontrar este dato, se adjunta en el anexo B.

Aplicando el modelo de Weibull a los datos disponibles, se obtiene el valor de 558,5172 horas, esto es el 77,57% del mes. Es decir que el tiempo diario aproximado de funcionamiento del aerogenerador es de 18,62 horas por día.

3.1.4 Energía suministrada por el aerogenerador

Ahora, se va a calcular la energía suministrada por el viento en la unidad de tiempo y área barrida por las palas del aerogenerador y se va a contrastar con la energía eléctrica por unidad de tiempo y área que produce un aerogenerador conocida su curva de potencia.

Para esto, se va a generar una curva de potencia con los datos recogidos, y se va a comparar con la curva de potencia varios modelos de aerogeneradores, proporcionada por diferentes fabricantes.

3.1.5 Potencia suministrada por el viento

La energía por unidad de tiempo (potencia) del viento cuando pasa a través de un área A perpendicular a la dirección del viento es

(3.1)

Donde:

$A=\pi R^2$ es el área barrida por las palas del aerogenerador de longitud R ,

$\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$ es la densidad del aire

x es la velocidad del viento.

Debido a que la velocidad del viento es variable, otra vez, se utilizan métodos estadísticos para calcular la potencia entregada por el viento

Elaborando el script adecuado (ver Anexo B), se obtiene la potencia del viento por unidad de superficie, que da como resultado 624 kW/m^2 .

3.1.6 Potencia suministrada por el aerogenerador

El valor calculado en el acápite anterior, corresponde a la potencia aprovechable del viento. Este valor se relaciona con la potencia entregada por

el aerogenerador, por el radio de las palas y, obviamente, por el modelo de aerogenerador escogido.

Ya que el proyecto está orientado al sector residencial de Quito, se escoge un micro aerogenerador, con una potencia máxima de 1,2 Kw (ver figura 3.7)



Figura 3.7 Micro aerogenerador Long Bow 1 Kw.

Fuente: “ZYTECH AERODYENE.” [Online]. Available: <http://www.zytechaerodyne.com/En/index.asp>. [Accessed: 25-Feb-2015]

El aerogenerador escogido corresponde al modelo Long Bow [48], de la empresa Zytech, cuyas características técnicas se muestran en la tabla 3.1

Tabla 3.1 Características del micro aerogenerador Long Bow

| Tipo de turbina | Long Bow 1 Kw |
|-----------------------------|---|
| Potencia Nominal | 1000 w |
| Velocidad nominal de viento | 11.2 m/s |
| Velocidad de corte | 3 m/s |
| Potencia máxima | 1200 w |
| Diámetro del rotor | 2.3 m |
| Área de barrido | 4.15 |
| Peso | 21.3 Kg |
| Tensión | 12 – 24 – 48 V |
| Alternador | Trifásico, de imán permanente, sin escobillas |

Se puede realizar el cálculo aproximado de la producción del micro aerogenerador, con los parámetros de Weibull del viento a la altura del aerogenerador y la curva de potencia correspondiente a la densidad a esa altura.

Si $W(V)$ es la potencia en función de la velocidad, la potencia promedio generada por el micro aerogenerador se puede obtener de la siguiente ecuación:

$$\text{---} \int \text{---} \quad (3.2)$$

Donde:

--- = Potencia promedio generada
 --- = Densidad de probabilidad de Weibull.

$W(v)$ = potencia generada en función de la velocidad

La curva de la potencia está dada por una tabla de valores numéricos, de ahí que en el sumatorio se realiza con las contribuciones de los intervalos de velocidad de la curva de potencia.

Se realiza el cálculo considerando una densidad del aire de correspondiente a una altura de 2826 m.s.n.m., que es la altura de Quito, más la altura del buje del aerogenerador; de acuerdo con la siguiente fórmula [49].

$$\text{---} \quad (3.3)$$

Dónde:

ρ = Densidad del aire
 P_o = Presión del aire (101235[Pa])
 R = Constante del aire (286,9[J/Kg * °K])
 T = Temperatura [°K]
 g = Aceleración gravitatoria (9,8[m/s])
 z = Altitud [m]

También se toma en cuenta que la velocidad del viento a esa altura sigue una distribución de Weibull con: y

Tabla 3.2 Curva de potencia del Long Bow 1 Kw utilizada en el cálculo.

| Velocidad (m/s) | Potencia (W) | Velocidad (m/s) | Potencia (W) |
|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| 0 | 0 | 10 | 1200 |
| 1 | 0 | 11 | 1200 |
| 2 | 0 | 12 | 1200 |
| 3 | 145 | 13 | 1200 |
| 4 | 320 | 14 | 1200 |
| 5 | 645 | 15 | 1200 |
| 6 | 910 | 16 | 1200 |
| 7 | 1000 | 17 | 0 |
| 8 | 1200 | 18 | 0 |
| 9 | 1200 | 19 | 0 |

Para hallar el valor de la potencia promedio, se calcula primero la probabilidad de que la velocidad del viento se encuentre en cada uno de los intervalos de cálculo de la curva.

Para cada valor de la velocidad se calcula la probabilidad de que la velocidad del viento esté comprendida entre: $(v - 0,5)$ y $(v + 0,5)$ m/s, por medio de la ecuación de la probabilidad acumulada, que se describió en el capítulo 2.

Entonces:

$$P(v) = \frac{F(v + 0,5) - F(v - 0,5)}{v - (v - 0,5)} \quad (3.4)$$

$$P(v) = F(v + 0,5) - F(v - 0,5) \quad (3.5)$$

$$P(v) = F(v + 0,5) - F(v - 0,5) \quad (3.6)$$

Por ejemplo, para $v = 10$ m/s, se obtiene un valor de probabilidad conjunta de:

$$P(10) = 0,0000 \quad (3.7)$$

Multiplicando cada probabilidad obtenida mediante este cálculo por la potencia de cada intervalo y sumando, se obtiene la potencia media producida por el micro aerogenerador, como se muestra en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Estimación de la potencia media.

| Velocidad (m/s) | Probabilidad | Potencia (W) | |
|-----------------|--------------|--------------------|--------|
| 0 | 0.000 | 0.00 | |
| 1 | 0.035 | 0.00 | |
| 2 | 0.066 | 0.00 | |
| 3 | 0.091 | 145.00 | |
| 4 | 0.107 | 320.00 | |
| 5 | 0.114 | 645.00 | |
| 6 | 0.112 | 910.00 | |
| 7 | 0.104 | 1000.00 | |
| 8 | 0.091 | 1200.00 | |
| 9 | 0.076 | 1200.00 | |
| 10 | 0.060 | 1200.00 | |
| 11 | 0.046 | 1200.00 | |
| 12 | 0.033 | 1200.00 | |
| 13 | 0.023 | 1200.00 | |
| 14 | 0.015 | 1200.00 | |
| 15 | 0.010 | 1200.00 | |
| 16 | 0.006 | 1200.00 | |
| 17 | 0.004 | 0.00 | |
| 18 | 0.002 | 0.00 | |
| 19 | 0.001 | 0.00 | |
| 20 | 0.001 | 0.00 | |
| 21 | 0.000 | 0.00 | |
| 22 | 0.000 | 0.00 | |
| Suma | 99.70% | Potencia Promedio: | 758,89 |

La distribución de velocidades se encuentra en un pequeño rango de ellas.

Se puede calcular el factor de capacidad del micro aerogenerador, que se define como el cociente entre la potencia media y la potencia máxima del micro aerogenerador, es decir que su factor de capacidad es del 63.24% [48].

Una estimación de la producción anual se puede obtener multiplicando la potencia media en kW por 8760 horas que tiene un año.

Esto daría una estimación del valor de la energía anual dada por el aerogenerador de 6647.96 kW.h

3.2 Instalación Tipo

El micro aerogenerador Long Bow 1 Kw dispone de un sistema de control para la conexión a la red de distribución, directamente desde este y a través del inversor del convertidor. Este sistema entrega potencia al sistema de tensión a frecuencia constante, e intercambia potencia reactiva con el mismo, y también estabiliza la tensión en el punto del sistema eléctrico del que está formando parte.

Posee un regulador de resistencia de descarga, un banco de condensadores para asegurar el aislamiento de pulsos y transitorios, medidores de corriente, de carga y de tensión del sistema, protección a sobre-corrientes, disipador de temperatura, y terminales de conexión aislados para evitar cortocircuitos [48].

Además, de forma opcional, se dispone de un conjunto completo para el montaje del micro aerogenerador en una torre de sujeción desde el suelo, de tipo aeroespacial, con posibilidades de alturas de la torre de 7,6 metros (6,4 m. con poste de soporte de la turbina de 1,2 m.) y 14,3 metros (12,8 m. con poste de soporte de la turbina de 1,5 m.), como se muestra en la figura 3.8.

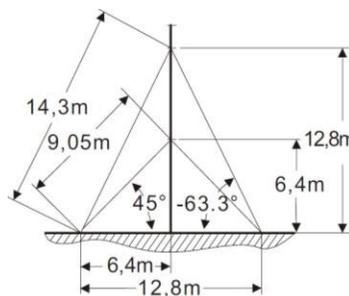


Figura 3.8 Instalación de la torre del micro aerogenerador.

Fuente: "ZYTECH AERODYNE." [Online]. Available: <http://www.zytech aerodyne.com/En/index.asp>. [Accessed: 25-Feb-2015]

El sistema de energía eólica, tiene los siguientes componentes para el correcto funcionamiento y montaje del mismo:

- Un micro aerogenerador: Long Bow 1 Kw de Zytech Aerodyne de características dadas en la tabla 3.1.
- Panel de control Zytech Commander, con modulador de pulsos PWM, para medición, regulación, protección y conexión con inversor sinusoidal de 120 V de corriente alterna,
- Una torre de 6,4 metros con mástil de 1,2 metros para sujeción del micro aerogenerador [48].

Lo cual permite la conexión a las redes de distribución existentes y el control de la energía entre la micro red y la red de distribución.

Los componentes del sistema de control, como el inversor dc/ac, entre otros, son para micro-redes eléctricas de pequeña potencia de carácter doméstico.

La turbina eólica cuenta además con un sistema para controlar la velocidad a altas velocidades del viento. El modelo de la turbina eólica fue tomado por tener una potencia nominal de 1.0 kW a una velocidad aproximada de 6 m/s [26].

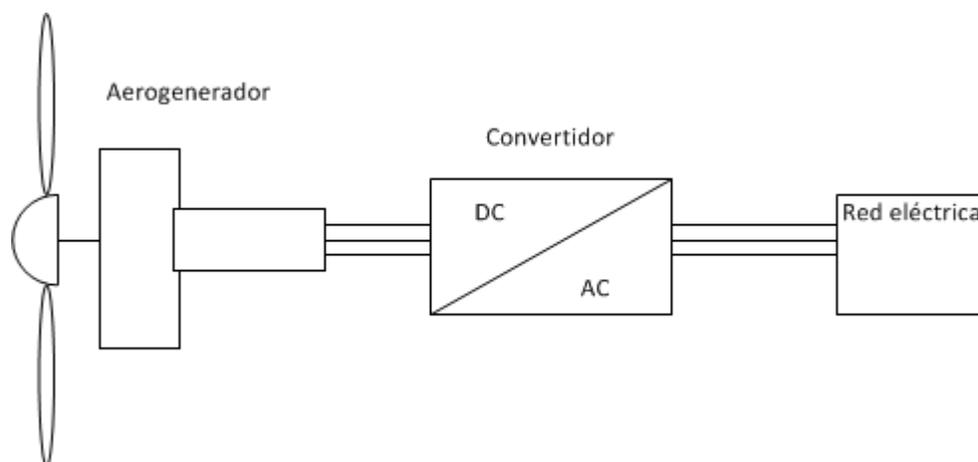


Figura 3.9 Instalación del micro aerogenerador a la red.

Fuente: propia del autor.

En la figura 3.9 se muestra la instalación básica del micro aerogenerador al panel de control (esquemático por el convertidor) y a la red de distribución.

Un aspecto importante considerado al elegir el micro aerogenerador es la utilización de la mejor tipo de tecnología para sistemas de baja potencia, o sea domésticos, ya que el sistema permite una mayor capacidad de generación eólica sin perder una estabilidad por la tensión [50].

Además, la compensación del consumo de reactivos del sistema es un aspecto fundamental, ya que una mejor compensación aumenta la potencia eólica que puede insertarse a la red.

Toda instalación eléctrica residencial o industrial, está constituida por elementos comunes, diferenciándose en la potencia que pueden manejar los mismos [49].

Los elementos comunes son:

Línea de acometida

Provee energía a la instalación domiciliaria o industrial, pertenece a la Empresa Eléctrica. Consta del cable que conecta el medidor con la red pública, y el medidor en sí mismo.

En los actuales momentos, la alimentación que entrega la empresa eléctrica a las instalaciones domiciliarias es bifásica, por lo que la línea de acometida consta de tres conductores, dos para las fases, y uno para el neutro [49].

Cuadro general de protección y mando

Por razones de seguridad, la Empresa Eléctrica exige la presencia de un cuadro general de protección y mando en toda instalación eléctrica; dicho cuadro consiste en un conjunto de interruptores térmicos o magneto-térmicos, que abren los circuitos en caso de sobre-corrientes. Cada interruptor alimenta a un circuito en particular, con lo que se consigue aislar y proteger a toda la instalación eléctrica, en caso de que un circuito tenga problemas [51].

El cuadro de protección y mando se conecta al medidor de energía.

Desde la salida del medidor, hacia la instalación domiciliaria, es propiedad del consumidor.

Puesta a tierra

La puesta a tierra es una medida de seguridad, ya que desvía a tierra toda la electricidad inducida en las maquinarias existentes en la instalación eléctrica, evitando descargas eléctricas accidentales a través del cuerpo humano.

La puesta a tierra provee una trayectoria de baja resistencia a las corrientes inducidas, por lo que se asegura la integridad, tanto de equipos como de personas.

Consiste en una varilla de cobre, enterrada en el suelo, que ha sido modificado químicamente para aumentar su conductividad.

A partir del cuadro general de protección y distribución, se reparten los diferentes circuitos de la vivienda, estos suelen agruparse de acuerdo a la función que van a realizar [52]:

- Puntos de iluminación
- Tomas de corriente de uso general y el frigorífico.
- Cocina y el horno.
- Lavadora, lavavajillas.
- Tomas de corriente de la cocina y baño.

3.2.1 Grados de electrificación y potencia contratada

El grado de electrificación se refiere al demanda de energía eléctrica de un cliente, la misma que debe ser atendida por la Empresa Eléctrica. Por lo general, cuando un cliente solicita el servicio de electricidad, debe informar de la cantidad de energía eléctrica que va a necesitar, y de acuerdo a esta

información, la empresa eléctrica procede a realizar la instalación de la acometida y el medidor.

3.2.2 Tipos de demanda de energía eléctrica

La empresa Eléctrica clasifica a los clientes, de acuerdo al nivel de la demanda que poseen, esto puede verse en la tabla 3.4. [51]:

Tabla 3.4 Estratos de consumo

| Categoría de estrato o consumo | Escalas de consumo (kWh/mes/cliente) sin considerar la influencia de las cocinas de inducción para usuarios tipos C, D y E |
|---------------------------------------|---|
| E | 0 – 100 |
| D | 101 – 150 |
| C | 151 – 250 |
| B | 251 – 350 |
| A | 351 – 500 |
| A1 | 501 – 900 |

De acuerdo a los objetivos plateados, el aerogenerador puede proporcionar energía a los clientes tipo B.

3.2.3 Consumo promedio de un usuario residencial

A continuación se presenta el cálculo de la demanda energética de un usuario residencial promedio. Este cálculo es importante para determinar el porcentaje de uso que tendrá el aerogenerador.

En el anexo C se presenta el cálculo de la potencia requerida por un usuario residencial tipo B.

La información presentada en esta tabla, corresponde a los requerimientos energéticos de un usuario, detallando la potencia nominal de cada elemento instalado en la residencia. Los parámetros más relevantes de la tabla son:

Pn: Potencia nominal en Vatios [W].

FFUn: Factor de frecuencia de uso, en [%].

CIR: Carga instalada del consumidor representativo, en Vatios [W];

FSn: Factor de simultaneidad, en [%].

DMU: Demanda máxima unitaria, en Vatios [W].

También es necesario conocer la demanda diaria de cada uno de los ítems, para lo cual se establece un tiempo aproximado de uso diario para cada uno de ellos. Estos datos se resumen en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Consumo energético diario de una residencia

| Item | Potencia (W) | Cantidad | Consumo al día (h/día) | Consumo Total (W) | Energía Total (KWh/día) |
|---------------------|--------------|----------|------------------------|-------------------|-------------------------|
| Televisión | 100 | 3 | 5 | 300 | 1,5 |
| Refrigeradora | 200 | 2 | 8 | 400 | 3,2 |
| Microondas | 1000 | 1 | 0,3 | 1000 | 0,3 |
| Lavadora | 500 | 1 | 0,8 | 500 | 0,4 |
| Computador | 300 | 1 | 5 | 300 | 1,5 |
| Cocina de inducción | 4000 | 1 | 3 | 4000 | 12 |
| Ducha eléctrica | 3000 | 1 | 1,5 | 3000 | 4,5 |
| Luminarias | 100 | 10 | 5 | 1000 | 5 |
| Licuada | 375 | 1 | 0,5 | 375 | 0,19 |
| Equipo de sonido | 100 | 1 | 6 | 100 | 0,6 |
| TOTAL | | | | 10975 | 29,19 |

Esta información permite conocer el consumo energético diario de un usuario tipo B, para dimensionar el circuito de generación eólica.

3.2.4 Dimensionamiento del sistema de generación eólica

Ya se calculó, en el apartado 3.1.3 que el generador trabaja 18.62 horas por día, y también que entrega una potencia media de 0,7589 kW por hora. Entonces, el aerogenerador entrega una potencia diaria de $(0,7589 \times 24 = 18,21 \text{kWh})$.

Un sistema de electro-generación eólica, básicamente está constituido por:

- Aerogenerador.
- Conversor AC/DC.
- Baterías.
- Conversor DC/AC.

La energía proporcionada por el aerogenerador es AC de frecuencia y amplitud variables. Además, cuando la velocidad del viento caiga por debajo del nivel de cut-out, no producirá energía, en estos momentos, la energía debe ser proporcionada por el conjunto de baterías.

El aerogenerador seleccionado (Long Bow), ya tiene integrado un sistema de rectificación, por lo que está en capacidad de entregar tensiones de salida de 12v, 24v y 48v DC.

En el Ecuador, la tensión nominal de las baterías es de 12v, por lo que se escoge esta tensión de salida del aerogenerador.

En condiciones óptimas de velocidad de viento, el aerogenerador puede entregar 1200W, por lo que la intensidad de corriente es de:

$$— \quad (3.8)$$

Donde:

I es la intensidad de corriente.

P es la potencia.

V es la tensión de salida.

Reemplazando los datos en la ecuación 3.8 se obtiene la corriente de 100 A.

Por lo que, de acuerdo a la tabla AWG presentada en el anexo D, se debe utilizar un conductor nº 1 que soporta una intensidad de 110A.

3.2.4.1 Cálculo del número de baterías

Las baterías tienen la misión de entregar energía a la instalación domiciliaria cuando el generador no esté funcionando, esto es, cuando la velocidad del viento sea menor a la mínima especificada. Para esto empleamos la fórmula [53]:

$$\text{-----} \quad (3.9)$$

Donde:

N = número de baterías

DM= Demanda diaria

TA= Tiempo de autonomía

ALM= Capacidad de almacenamiento de las baterías.

DSC= Valor de descarga de la batería, recomendado por el fabricante

Anteriormente se calculó que el aerogenerador trabajará 18,6 horas al día, es decir, que estará inactivo durante 5,4 horas al día; entonces, la autonomía de las baterías será de 5,4 horas. Para dar holgura al sistema, y no trabajar con valores ajustados, se asume una autonomía de 24 horas.

La demanda debería ser la calculada con anterioridad (29,19kWh/día), sin embargo, resulta evidente que el sistema de aero generación no satisface a la misma, por lo que, en este caso, la demanda sería igual a la potencia entregada por el aerogenerador (18, 21kWh/día).

Se eligieron baterías de 80Ah, lo que 9600Wh

El valor de descarga es de 0,5

Reemplazando estos datos en la ecuación 3.12 se tiene 3,79 por lo tanto el número de baterías necesarias es entonces 4, Las baterías se conectan en paralelo.

3.2.4.2 Cálculo del inversor

El inversor convierte la Corriente DC de las baterías, en AC senoidal que es la que se entrega a la instalación eléctrica domiciliaria [54].

El cálculo del inversor se lo hace a partir de la demanda de potencia, aplicando un margen de seguridad, y tomando en cuenta que las cargas inductivas, en el momento de arranque, consumen de 4 a 5 veces más energía que cuando operan en régimen.

Tomando en cuenta estos factores, el dimensionamiento del inverso quedaría de acuerdo a la fórmula 3.10

(3.10)

Donde:

Q_{AC} = Consumo de las cargas inductivas (electrodomésticos que tienen motores).

Q_{DC} = Consumo de las cargas no inductivas (el total menos Q_{AC}).

4 = Factor de multiplicación de las cargas inductivas, al momento del arranque de los motores.

1,2 = Factor de multiplicación de acuerdo al rendimiento del inversor.

En la ecuación 3.10, se toma en cuenta los picos de arranque de las cargas inductivas del domicilio, que en este caso son 9 kW El factor 1,2 se refiere al

margen del 20% que se consideró, por lo tanto la potencia del inversor sea de 49,75 kW [54].

Es recomendable utilizar un inversor de señal senoidal pura, ya que esto evita el problema de los armónicos, que se presentan en los inversores de señal senoidal modificada.

3.2.4.3 Protecciones

El sistema de protección del aerogenerador, implica, además del factor eléctrico, las condiciones mecánicas de los dispositivos de conexión y desconexión de circuitos [55].

Como existen diversos enfoques y criterios de diseño y prioridad, según el diseñador y el fabricante de aerogeneradores, la selección de componentes puede variar. Algunos criterios importantes a tener en cuenta son [52]:

- Protección del circuito
- Conexión segura
- Número de maniobras de conexión – desconexión

En función de estos criterios, las soluciones existentes son:

En el lado de la red del convertidor:

- Sólo interruptor automático.
- Interruptor automático coordinado con contactor.

En el lado del generador del convertidor:

- Sólo interruptor automático
- Interruptor automático coordinado con contactor

En la tabla 3.6 se presentan las principales características a tener en cuenta en la elección de interruptores automáticos y contactores para en circuito principal de potencia, el circuito de excitación principal y el circuito de puesta en marcha.

En la figura 3.10, se muestra la disposición general de los dispositivos de protección del aerogenerador.

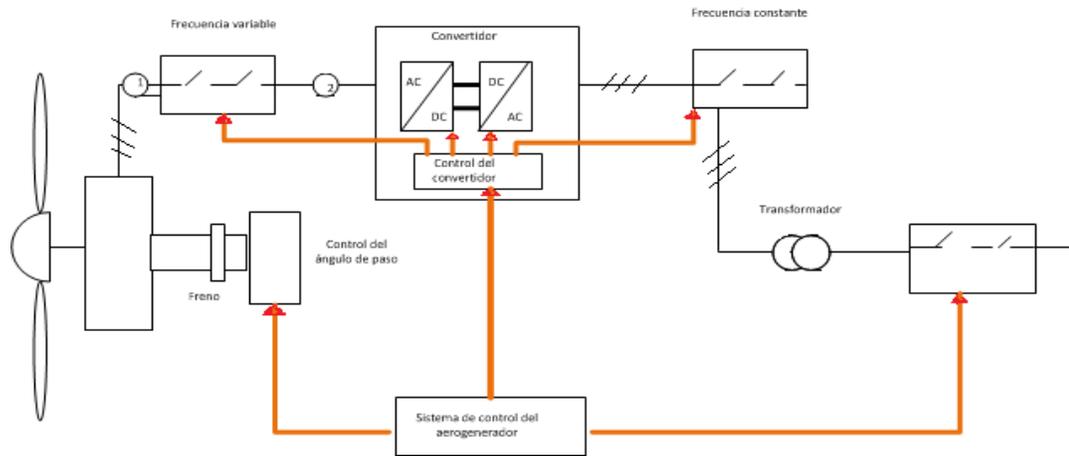


Figura 3.10 Elementos de protección del aerogenerador

Fuente: Propi del autor

Dado que ya se conoce la potencia del aerogenerador, y el voltaje de línea, se puede calcular la corriente que deben soportar los elementos de protección.

En el caso de un cortocircuito en el punto 1, el valor de la corriente I_{cc1} se limitará aproximadamente al doble del valor nominal de la corriente del inversor.

En el caso de un cortocircuito en el punto 2, la corriente de cortocircuito I_{cc2} , detectada por el interruptor automático, la proporcionará el generador. Como primera aproximación, esta corriente para un generador con potencia nominal S_g funcionando a una tensión nominal V_n es:

$$\text{-----} \tag{3.11}$$

Donde:

X^n es la reactancia transitoria del alternador, expresada en porcentaje.

I_G es la corriente nominal del generador.

Tabla 3.6 Principales características para elegir elementos de protección

| Características | Circuito principal de potencia lado el generador | Circuito principal de potencia lado de la red | Circuito auxiliar principal |
|---|---|---|---|
| Corriente carga [A] | <= 5000 | <= 5000 | < 250 |
| Tensión [V] | <= 1000 | <= 690 | <= 690 |
| Frecuencia [Hz] | 1...16 | 50 – 60 | 50 – 60 |
| | 30...80 | | |
| | 40...140 | | |
| Corriente de cortocircuito prevista [KA] | <=15 a 1000V | 35 a 690 V | |
| Presencia de corriente de entrada | No | No | Si |
| Tipo de carga | AC | AC | AC |
| Vida útil [años] | 20 | 20 | 20 |
| Nº de maniobras mecánicas (o eléctricas de poca corriente) de desconexión del sistema (mantenimiento o fuera de servicio) | 100.....1000 | <1000 | < 1000 |
| Nº de maniobras mecánicas (o eléctricas de poca corriente) de conexión/desconexión de la red o de reconfiguración (control de producción) | No disponible (generalmente el generador permanece conectado al convertidor) | 1000....100000 (en función de la estrategia de control) | No aplicable |
| Nº de maniobras eléctricas | < 500 (disparo de las protecciones o parada de emergencia) | < 500 (disparo de las protecciones o parada de emergencia) | <500 (disparo de las protecciones o parada de emergencia) |
| Protección contra sobrecargas | Si | Si | Sir |
| Solución óptima | Interruptor automático (si se requiere la protección del cable de conexión o de la entrada del convertidor) | Interruptor automático + contactor (más de una maniobra al día) | Interrupto automático |
| | Interruptor seccionador (si existe un sistema de protección externo) | Interruptor automático (menos de una maniobra al día) | |

3.2.4.4 Puesta a tierra

La misión de la puesta a tierra en toda instalación eléctrica, es proteger a los equipos, contra la acción de voltajes inducidos en la carcasa metálica.

Como en esta instalación, se manejan voltajes alternos y directos, se debe hacer sendas puestas a tierra para cada uno de los circuitos (AC y DC), e independientes entre sí [56].

En la figura 3.11 se muestra el diagrama de las puestas a tierra para el sistema de aerogeneración.

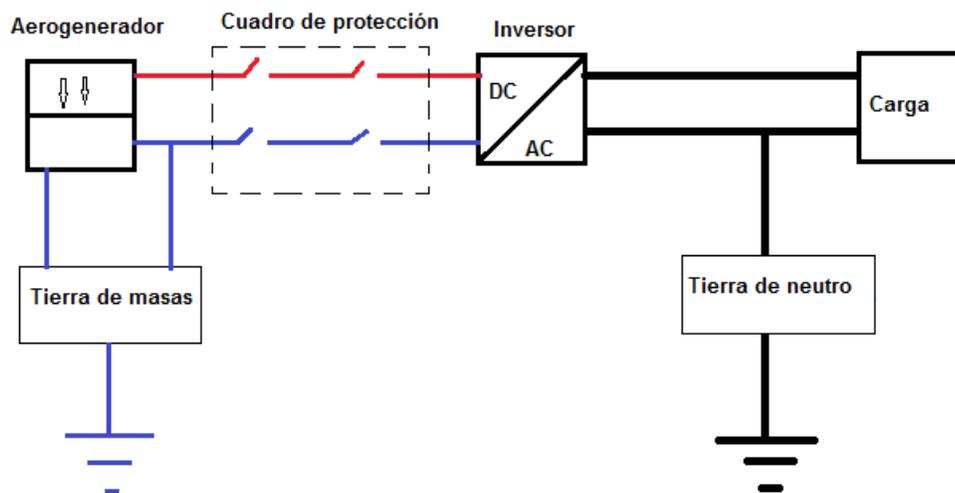


Figura 3.11 Diagrama de puesta a tierra

Fuente: C.Vázquez, "Análisis modelamiento y gestión de una microred eléctrica para edificaciones residenciales usando paneles fotovoltaicos" 2014

3.3 Modelo de gestión energética

La situación energética y ambiental actual, hace imperativo la toma de acciones para reducir el consumo energético y así el impacto que el uso irracional de la energía tiene sobre el medio ambiente; estas acciones corresponden tanto al sector privado como al gubernamental.

Para lograr el uso eficiente y racional de la energía, los usuarios tienen que realizar cambios en la forma en que utilizan la energía. Esto implica relacionar

adecuadamente la estructura organizacional y los sistemas de control que le permitan manejar eficientemente sus recursos energéticos.

3.3.1 Importancia del modelo

El modelo de gestión energética es el fundamento que hace posible detectar desviaciones en el consumo energético, respecto de aquel estadísticamente necesario.

El consumo energético varía con ciertos parámetros, por los que en primera instancia, la observación de gráficos de control, lleva a determinar alguna anomalía en el uso de la energía.

El modelo de gestión energética, encuentra las relaciones entre el consumo energético y cada uno de los parámetros que lo rigen. Este proceso se muestra conceptualmente en la figura 3.12

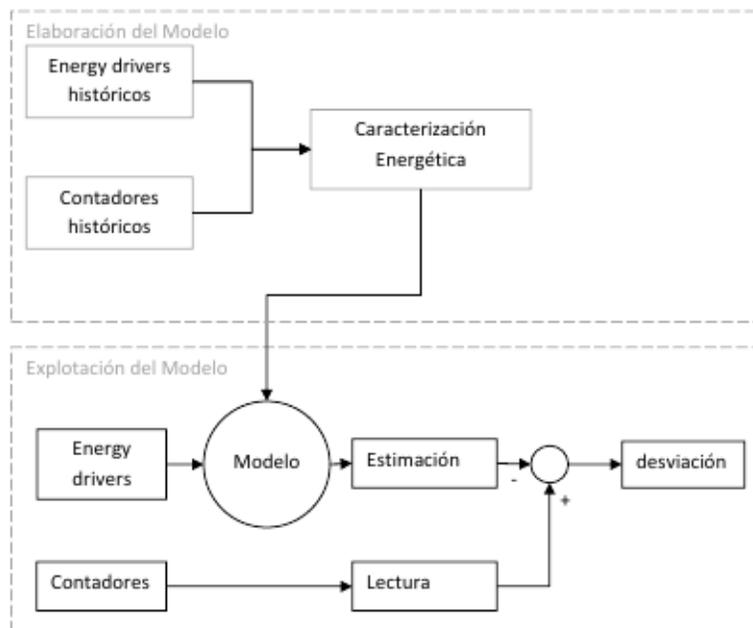


Figura 3. 12 Planificación de un modelo de gestión energética

Fuente: J. Carlos, C. Avella, E. Daniel, L. Figueroa, I. T. Ospino, O. Fredy, P. Caicedo, E. Ciro, Q. Oqueña, J. Ricardo, and V. Medina, "Modelo de gestión energética para el sector productivo nacional," vol. 6, no. 1, pp. 2–6, 2008.

3.3.2 Requerimientos de un sistema de gestión energética

Los elementos esenciales de un sistema de gestión energética son:

- Registro. Medición y registro de los recursos energéticos
- Análisis. Correlación del consumo energético con los registros históricos
- Comparación. Comparación del consumo energético con estándares apropiados (Benchmarking)
- Objetivos. Fijación de objetivos para reducir o controlar el consumo energético
- Monitorización. Comparación periódica del consumo energético con el objetivo
- Control. Implementación de medidas de control para corregir desviaciones

Particularmente, para el uso de aerogeneradores, un sistema así implicará:

- Comprobar la reducción de las facturas por consumo de electricidad.
- Determinar el rendimiento energético.
- Destacar problemas de rendimiento en equipos o sistemas.

3.3.3 Metodología

Un proyecto de implementación de un sistema de gestión energética, puede seguir los pasos que se enumeran en la figura 3.13.

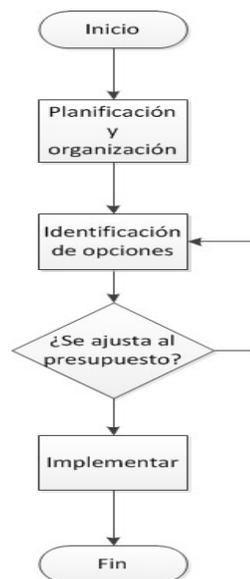


Figura 3.13 Metodología para desarrollar un sistema de gestión de la energía

Fuente: Propia del autor

Llevando estos pasos a una instalación eléctrica con aerogenerador, se tendría que el principal objetivo del sistema de gestión energética será la verificación de la reducción en las planillas por energía eléctrica, y la correlación con los costos de operación y mantenimiento de la instalación, así como el impacto ambiental que provoca el uso del aerogenerador.

Un modelo de gestión energética, debe estar centrado en alcanzar los siguientes objetivos [57]:

- Control del consumo energético.
- Buenas prácticas para el uso racional de la energía.
- Mejora continua de la eficiencia energética.
- Gestión integral de la eficiencia energética en ambientes competitivos.

Un sistema nacional de gestión energética, debe contemplar el uso de tecnologías alternativas para la generación de electricidad.

3.3.4 Correlación entre la potencia entregada por el aerogenerador y el consumo de la vivienda

De acuerdo a los calculado en el en el apartado 3.2.3, un usuario tipo B requiere de 29,19 kW/h al día para satisfacer sus necesidades energéticas, en tanto que el sistema de aerogenerador propuesto proporciona 18,21 kW/h al día. Resulta claro que el aerogenerador no cubre las necesidades energéticas del sistema, pero aporta con más del 50% de esas necesidades.

Para realizar un análisis más detallado, se requiere un cálculo diario mensual y anual de la energía aerogenerada, para correlacionar con los requerimientos del usuario.

En la tabla 3.7, se detalla la potencia mensual proporcionada por el aerogenerador, y en la tabla 3.8 se detalla los requerimientos mensuales del usuario.

Tabla 3.7 Energía mensual proporcionada por el aerogenerador

| Meses del año | kWh/día | número de días | kWh/mes |
|----------------------|----------------|-----------------------|----------------|
| Enero | 17,56 | 31 | 544,36 |
| Febrero | 16,45 | 28 | 460,6 |
| Marzo | 18,21 | 31 | 564,51 |
| Abril | 17,36 | 30 | 520,8 |
| Mayo | 18,12 | 31 | 561,72 |
| Junio | 19,67 | 30 | 590,1 |
| Julio | 20,54 | 31 | 636,74 |
| Agosto | 21,76 | 31 | 674,56 |
| Septiembre | 20,45 | 30 | 613,5 |
| Octubre | 19,8 | 31 | 613,8 |
| Noviembre | 18,34 | 30 | 550,2 |
| Diciembre | 17,45 | 31 | 540,95 |

Tabla 3.8 Requerimientos mensuales de energía del usuario

| Meses del año | kWh/día | número de días | kWh/mes |
|----------------------|----------------|-----------------------|----------------|
| Enero | 29,4 | 31 | 911,4 |
| Febrero | 29,3 | 28 | 820,4 |
| Marzo | 29,19 | 31 | 904,89 |
| Abril | 29,78 | 30 | 893,4 |
| Mayo | 29,15 | 31 | 903,65 |
| Junio | 29,3 | 30 | 879 |
| Julio | 29,7 | 31 | 920,7 |
| Agosto | 29,8 | 31 | 923,8 |
| Septiembre | 29,89 | 30 | 896,7 |
| Octubre | 29,17 | 31 | 904,27 |
| Noviembre | 29,5 | 30 | 885 |
| Diciembre | 32,34 | 31 | 1002,54 |

En la tabla 3.9 se resume la información de la potencia proporcionada por el aerogenerador frente a la demanda del usuario, y en la tercera columna se consigna el porcentaje de contribución del generador a la demanda energética del usuario.

Tabla 3.9 Porcentaje de contribución del aerogenerador

| Meses | Generador | Demanda | % Generador |
|--------------|------------------|----------------|------------------------|
| Enero | 544,36 | 911,4 | 59,73 |
| Febrero | 460,6 | 820,4 | 56,14 |
| Marzo | 564,51 | 904,89 | 62,38 |
| Abril | 520,8 | 893,4 | 58,29 |
| Mayo | 561,72 | 903,65 | 62,16 |
| Junio | 590,1 | 879 | 67,13 |
| Julio | 636,74 | 920,7 | 69,16 |
| Agosto | 674,56 | 923,8 | 73,02 |
| Septiembre | 613,15 | 896,7 | 68,38 |
| Octubre | 613,8 | 904,27 | 67,88 |
| Noviembre | 550,2 | 885 | 62,17 |
| Diciembre | 540,95 | 1002,54 | 53,96 |

Puede apreciarse que la contribución del aerogenerador sobrepasa el 50% de los requerimientos energéticos del usuario, lo que implica un ahorro económico de más del 50%.

Para una mejor comprensión del aporte energético del aerogenerador, se ha establecido la producción de un día, 24 horas, y se lo ha comparado con la demanda energética de una instalación tipo, durante el mismo periodo de tiempo. El resultado puede apreciarse en la figura 3.14.

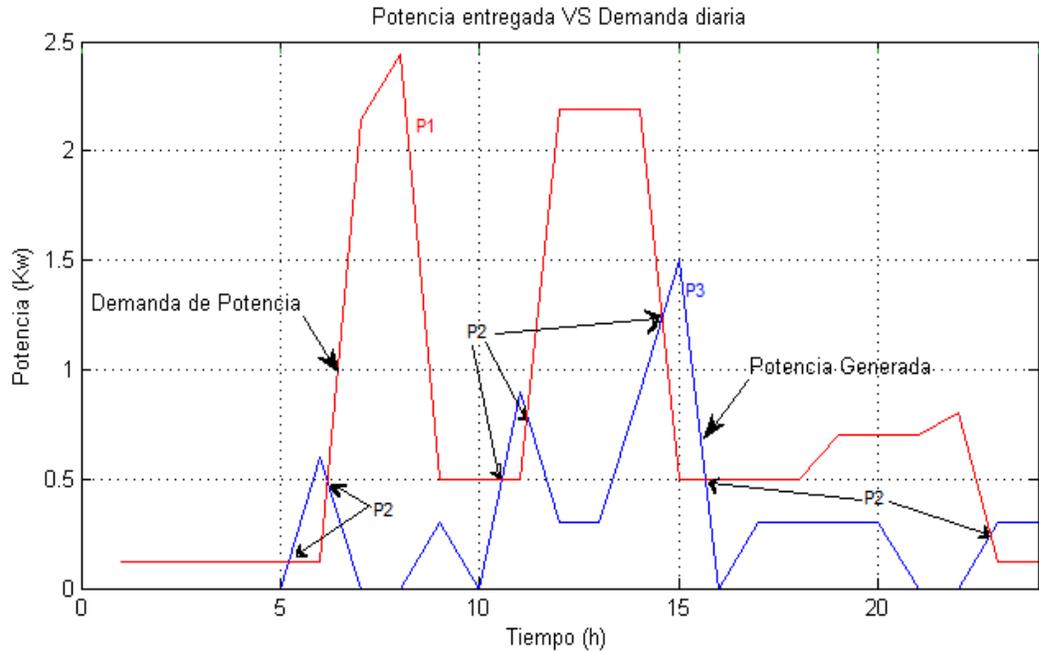


Figura 3.14 Comparativa entre la potencia generada y la demanda energética de un día

Fuente: Propia del autor

Como puede apreciarse, la demanda supera a la producción, sin embargo, existen breves periodos durante el día, en que el aerogenerador proporciona más energía que la demandada; y en la noche, este periodo es mucho mayor, ya que en ese periodo no existe demanda de energía de la vivienda, existiendo la posibilidad de comercializar este excedente.

Una explicación más detallada se puede apreciar en el flujograma de la figura 3.15.

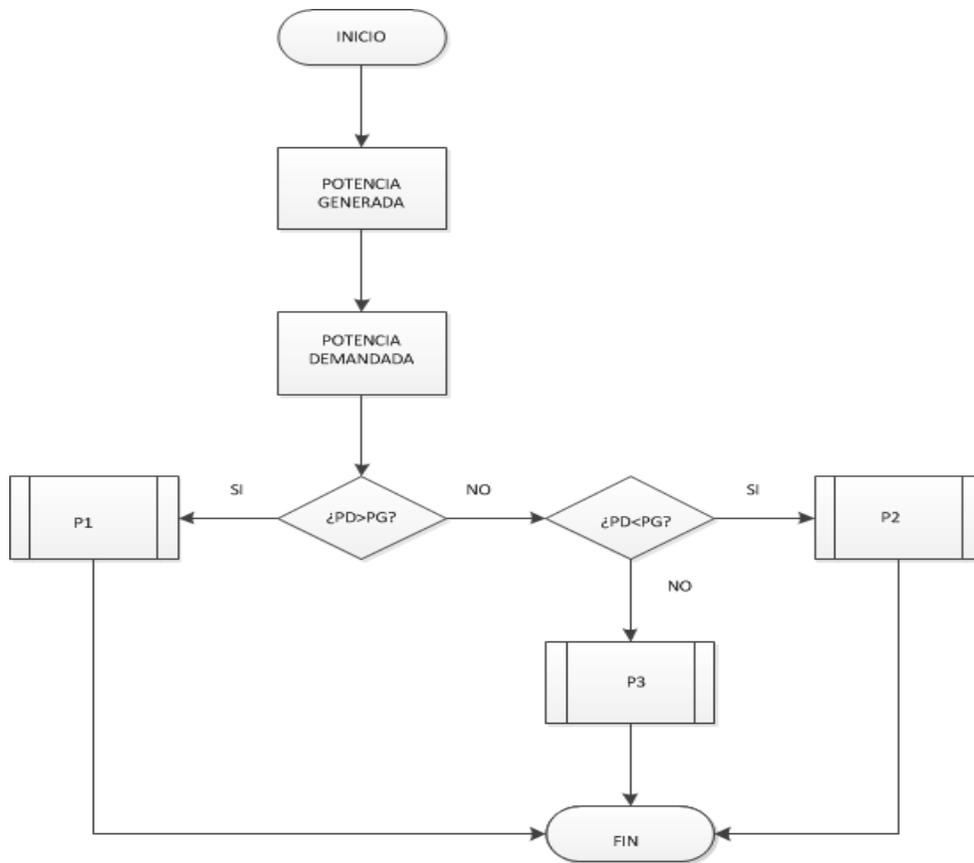


Figura 3.15 Flujograma de conmutación de potencias del sistema acoplado a la red pública.

Fuente: Propia del autor

Cuando la potencia que demanda la instalación supera a la potencia proporcionada por el aerogenerador, la potencia faltante es proporcionada por la red pública, esta situación se ha marcado como P1.

Cuando la potencia del generador supera a la demanda, entonces, a más de abastecer a la instalación, se puede vender energía a la red pública, esto se ha marcado como P3.

Finalmente, cuando la potencia del generador es igual a la potencia requerida por la instalación, no se vende ni se compra energía, ya que los requerimientos energéticos son proporcionados por la instalación eólica, lo que se ha marcado como P2 en el flujograma, pero esta situación no se da en el modelo realizado.

La curva de descarga del banco de baterías aparece como una línea horizontal, ya que 24 horas no es tiempo suficiente para que la batería se descargue.

3.4 Acoplamiento a la red de distribución

Como se explicó en el apartado 3.2, los primeros elementos de una instalación eléctrica domiciliar son la línea de acometida y el medidor de energía. La energía proveniente del aerogenerador, debe estar situada detrás de estos elementos. Obviamente existirá una línea de acometida al domicilio, pero proveniente del aerogenerador.

3.4.1 Elementos constitutivos de un sistema de generación eólico

A más del aerogenerador, son necesarios elementos de conducción, protección y control de la energía eléctrica.

La energía AC proveniente del aerogenerador, debe convertirse a DC y almacenarse en un conjunto de baterías, generalmente de plomo-ácido, para luego ser convertida nuevamente en AC, pero de amplitud y frecuencia estándar, y finalmente ser utilizada.

Como se vio en el apartado 3.3.5, el aerogenerador puede producir energía en momentos en que esta no es directamente utilizada en el domicilio, principalmente en la noche, por lo cual podría ser enviada a la red pública; de ser el caso, podría ser comercializada. Una conexión eléctrica que posibilite la comercialización de la energía producida por el aerogenerador, se detalla en la figura 3.16, el medidor sirve para contabilizar tanto la energía que el domicilio compra a la empresa pública eléctrica, como para contabilizar la energía que el domicilio entrega a la red pública. En este tipo de conexión, no es necesario el banco de baterías, ya que el sistema de almacenamiento lo constituye la red eléctrica pública.

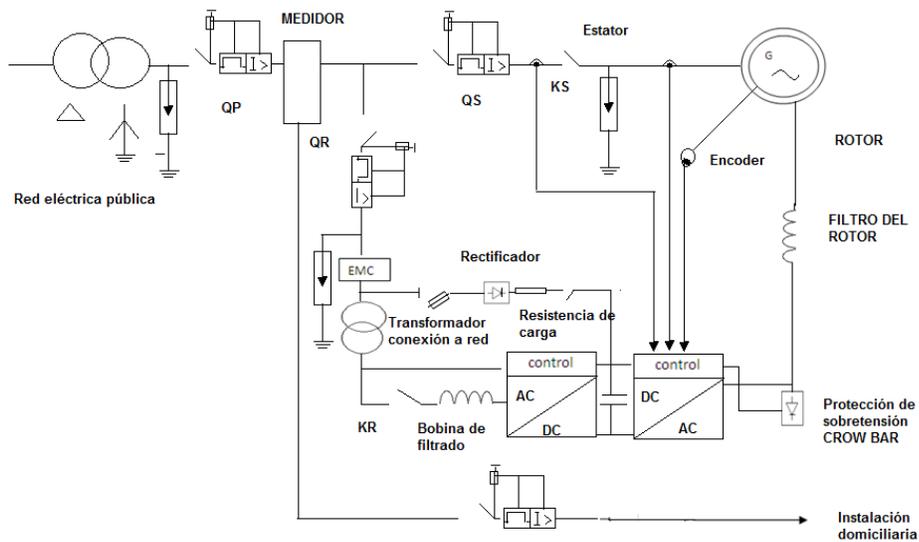


Figura 3.16 Diagrama unifilar de la conexión del aerogenerador a la red

Fuente: Propia del autor.

Si se decide a no comercializar la energía producida por el aerogenerador, entonces tanto el aerogenerador como la red pública cargan al banco de baterías a través de un regulador de carga, por lo que ambos sistemas contribuyen simultáneamente a la electrificación del domicilio. Esta conexión puede apreciarse en la figura 3.17.

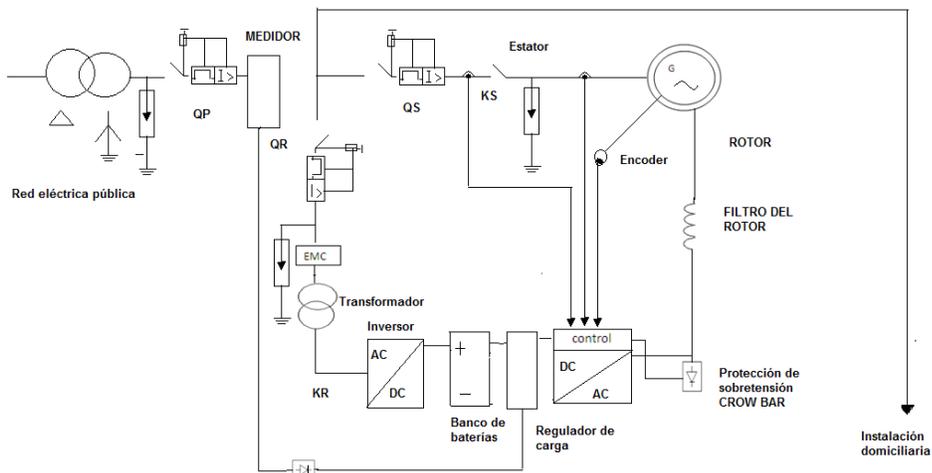


Figura 3.17 Conexión simultánea de aerogenerador y red pública

Fuente: Propia del autor.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA

Por generación distribuida se va a entender: “cualquier tecnología de generación a pequeña escala que proporciona electricidad en puntos más cercanos al consumidor, que la generación centralizada, y que se puede conectar directamente al consumidor o a la red de distribución.”¹

En este capítulo se realizará un análisis del sistema de generación distribuida como una opción para el sistema eléctrico residencial, así como el análisis técnico, económico y social, que viene inmerso en la utilización de la micro aerogeneración eólica como medio alternativo en la producción de energía eléctrica [59].

4.1 Análisis del sistema de generación distribuida como una opción para el sistema eléctrico residencial.

El fundamento clave para promover la Generación Distribuida renovable en el país, es reducir el costo de la energía eléctrica, lo que también contribuye directamente a la competitividad y al crecimiento económico. Además, la generación distribuida renovable proporciona muchos otros beneficios que pueden representar fundamentos viables para su promoción por parte del gobierno, como la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, la reducción de los impactos ambientales y sociales, el apoyo al desarrollo de una nueva industria verde, el aumento de la seguridad energética, la reducción de pérdidas del sistema y de la capacidad de generación innecesaria, y el desarrollo de un marca verde. En ciertas circunstancias, estos otros fundamentos pueden generar beneficios económicos netos para el país y justificar el pago de costos de electricidad más elevados [58].

En el Ecuador, de acuerdo a los objetivos propuestos en el Plan Nacional del Buen Vivir, se persigue “promover investigaciones para el uso y la generación de

¹ Fundación de la energía de la comunidad de Madrid, «Guía Básica de la Generación Distribuida,» Geáficas Elisa, Madrid, 2007.

energías alternativas renovables, bajo parámetros de sustentabilidad en su aprovechamiento”².Y “reducir gradualmente el uso de combustibles fósiles en el transporte y sustituir los vehículos convencionales, fomentando la movilidad sustentable”³.

En base a lo anteriormente expuesto, la generación de electricidad mediante instalaciones residenciales de micro aerogeneradores, se presenta como una alternativa válida para disminuir costos en energía eléctrica.

La provincia de Pichincha, en el Ecuador, y su capital Quito, cuentan con un elevado potencial de recurso eólico para instalaciones domiciliarias, cuyas demandas energéticas van de 1,5 KW a 2 KW, en la mayoría de los meses del año.

El acelerado crecimiento de la población, y el consumo de energía por parte de ella, es una de las principales razones de preocupación en los actuales momentos, sabiendo de la limitación de los recursos energéticos utilizados por medios tradicionales. De ahí que, un sistema de generación eólica representa una de las alternativas viables para mejorar notablemente el aprovechamiento de los recursos energéticos.

El apoyo de los gobiernos a nivel mundial, a la energía renovable, en los últimos años, ha sido decisivo para la creación de una nueva industria, con grandes inversiones de empresas del sector de la energía, creando a su vez, una conciencia sobre la innovación energética para futuras generaciones.

Una alternativa, aunque esta representa una contribución muy pequeña al respecto, sería la de generación eléctrica, a nivel residencial por medio del aprovechamiento de la energía eólica. Aunque esta, podría ser para el consumo doméstico a nivel residencial, se puede pensar que muchos de estos sistemas podrían totalizar grandes cantidades de energía producidas[61].

² Banco Intamericano de Desarrollo, «Perspectivas sobre generación distribuida mediante energías renovables en América Latina y el Caribe,» de *V Foro de competitividad de las Américas para el Banco Interamericano de Desarrollo y el Compete Caribbean*, Santo Domingo, 2011.

³ Idem

En el capítulo anterior, en la tabla 3.3 se puede ver el cálculo de la potencia media para el micro aerogenerador Long Bow 1 Kw, obteniéndose un valor medio de 758,89 w. Si se considera que el micro aerogenerador trabaja a esa potencia media las 24 horas al día, con una eficiencia del 40 %, podría proporcionar diariamente una energía de 7.285,34 W.h/día.

Que podría ser utilizada en el consumo de los principales aparatos eléctricos de uso doméstico en el hogar, como se puede apreciar en la tabla 4.1, y que representaría un consumo mensual de 218,56kW.h/mes

Tabla 4.1 Consumo diario de los principales aparatos de uso residencial.

| Item | Potencia (W) | Cantidad | Consumo al día (h/día) | Consumo Total (W) | Energía Total (KWh/día) |
|---------------------|--------------|----------|------------------------|-------------------|-------------------------|
| Televisión | 100 | 3 | 5 | 300 | 1,5 |
| Refrigeradora | 200 | 2 | 8 | 400 | 3,2 |
| Microondas | 1000 | 1 | 0,3 | 1000 | 0,3 |
| Lavadora | 500 | 1 | 0,8 | 500 | 0,4 |
| Computador | 300 | 1 | 5 | 300 | 1,5 |
| Cocina de inducción | 4000 | 1 | 3 | 4000 | 12 |
| Ducha eléctrica | 3000 | 1 | 1,5 | 3000 | 4,5 |
| Luminarias | 100 | 10 | 5 | 1000 | 5 |
| Licuadaora | 375 | 1 | 0,5 | 375 | 0,19 |
| Equipo de sonido | 100 | 1 | 6 | 100 | 0,6 |
| TOTAL | | | | 10975 | 29,19 |

4.2 Análisis Técnico

En la actualidad, la integración a la red eléctrica de sistemas de generación eólica se ha vuelto la aplicación más importante en magnitud entre las tecnologías de energías renovables. Esta tendencia está incrementándose debido a los múltiples beneficios de los incentivos económicos que impactan directamente en los costos de estos sistemas [62]. El uso óptimo del recurso eólico impone el requerimiento de operar el aerogenerador cerca del punto de máxima potencia independientemente de las condiciones de velocidad del viento [63]

Del estudio técnico realizado en el capítulo 3, se determinó que existen dos posibilidades de conexión de la energía aerogenerada a la instalación domiciliaria: aislada de la red pública, con un banco de baterías para almacenamiento temporal; o conectado a la red pública, en cuyo caso es innecesario el banco de baterías.

4.2.1 Instalación aislada de la red pública

El esquema básico de una instalación eólica aislada de la red pública, se muestra en la figura 4.1.

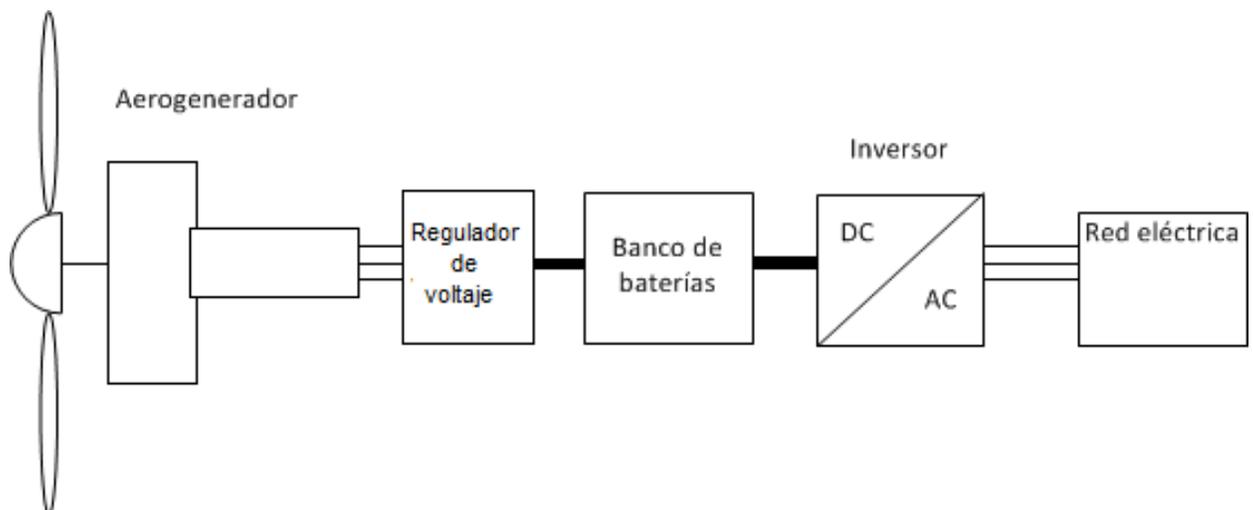


Figura 4.1 Esquema de una instalación eólica aislada de la red

Fuente: Propia del autor.

El aerogenerador seleccionado, proporciona energía eléctrica DC, por lo que se conecta al banco de baterías mediante un regulador de voltaje. Como ya se calculó anteriormente, el banco de baterías consta de 4 unidades. La salida del banco de baterías se conecta a un inversor DC/AC, que proporciona los 220v AC que necesita la instalación eléctrica domiciliaria.

La función del banco de baterías es proporcionar corriente alterna de frecuencia y amplitud estable a través del inversor, a la instalación. Además, es un elemento de almacenamiento de energía, que continúa entregando energía cuando el aerogenerador no está en funcionamiento.

Este tipo de conexión, proporciona completa independencia de la red eléctrica pública, pero tiene el inconveniente de necesitar un aerogenerador de mucha potencia, y por lo mismo más costosa, para suplir todos los requerimientos energéticos de la instalación. Además, requiere de un programa de mantenimiento y reparación más intenso y delicado, ya que al estar funcionando permanentemente las baterías, estas sufren un desgaste natural debido a los procesos electroquímicos de carga y descarga, con el consecuente impacto al medio ambiente.

4.2.2 Instalación simultánea con la red pública

Para una instalación simultánea con la red pública, no se necesita el banco de baterías, ya que la red pública hace las funciones de banco de baterías, es decir, proporciona energía a la instalación cuando el aerogenerador no está funcionando; y absorbe energía del aerogenerador, cuando esta sobrepasa la demanda de la instalación.

El diagrama esquemático de este tipo de conexión, se muestra en la figura 4.2.

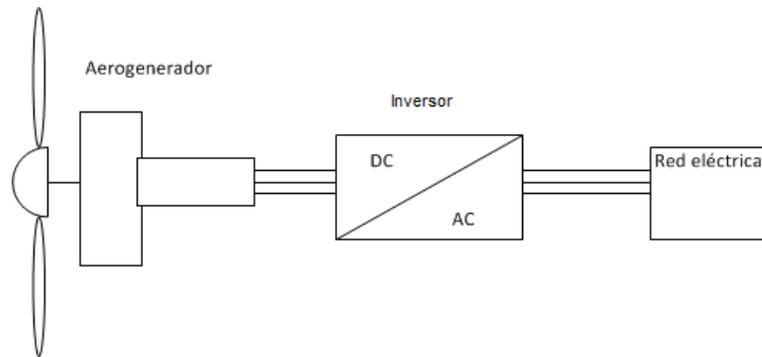


Figura 4.2 Conexión simultánea con la red pública

Fuente: Propia del autor.

Este tipo de instalación permite que el usuario pueda comercializar el excedente de energía proveniente del aerogenerador, o comercializarla cuando él no la esté utilizando, pasada cierta hora de la noche por ejemplo, o en las horas del día en que no se utilice la electricidad. Además, resulta más económico, tanto en la implementación como en el mantenimiento, ya que se evita la compra del banco de baterías y su posterior mantenimiento y reemplazo.

Para este proyecto, esta es la opción que se utilizará

La energía almacenada en el viento es muy elevada, pero no se puede extraer toda esta energía. En 1919 Albert Betz demostró, que para extraer esta energía se debe reducir la velocidad del viento.

Teóricamente se podría extraer el 100 % de la energía el viento que es transportada en forma de energía cinética, pero solo se lograría esto, si se detiene completamente el aire en movimiento, pero al hacerlo, no llegaría más aire a la turbina, impidiendo obtener más energía. Una solución a este inconveniente, es dejar pasar el viento por la turbina, dejando que este escape a cierta velocidad, pero reduciendo el rendimiento del aerogenerador[64].

Como se vio en la sección 2.4.5 este rendimiento máximo es del 59 %, según el teóricarema de Betz, e incluso de hasta el 45 % en los aerogeneradores reales, como se muestra en la figura 4.3.

Además, cuando las hélices giran a gran velocidad, experimentan un frenado producido por la fricción con el aire, esto hace que se consuma también algo de energía.

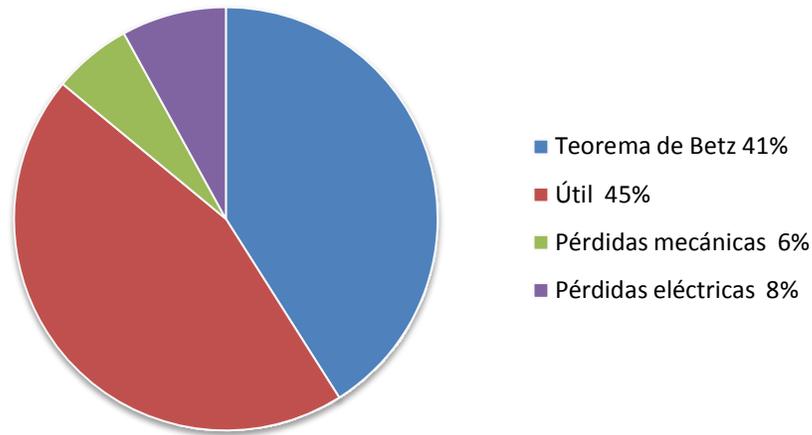


Figura 4.3 Diagrama de pérdidas de un aerogenerador real.

Fuente: Propia del autor.

Toda máquina tiene pérdidas mecánicas, como rodamientos, multiplicadores, etc. y pérdidas eléctricas, como calor, cableado, etc. Los componentes electrónicos, como rectificadores, inversores, etc. también causan pérdidas, aunque no son tan elevadas como las anteriores [65].

La producción media del micro aerogenerador Long Bow 1 kW, se estimó en la sección 3.1.7 en la tabla 3.4, con los datos de la velocidad media del viento en la zona norte de Quito, con la fórmula correspondiente de la potencia. El valor que dio fue 758.89W.

Debido a que es de interés la potencia instantánea entregada por el aerogenerador, se procede a graficar la repuesta del aerogenerador en función de la velocidad del viento, lo que se puede apreciar en la figura 4.4

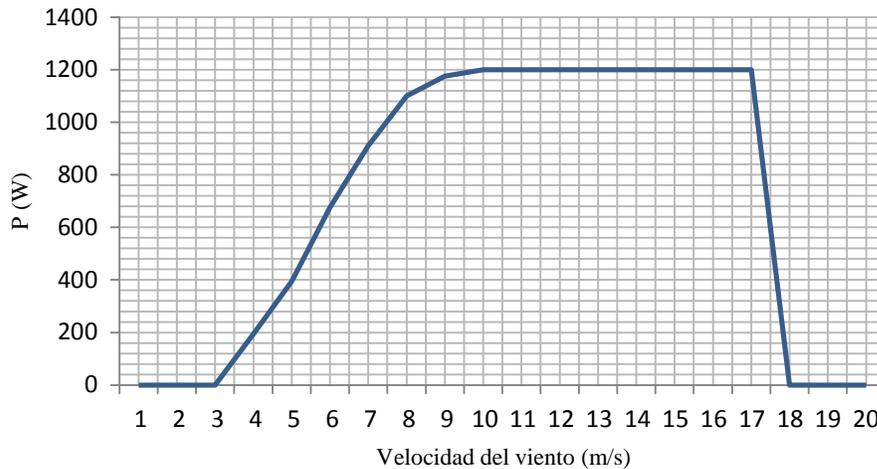


Figura 4.4 Curva de potencia del aerogenerador en función de la velocidad del viento

Fuente: Propia del autor.

Se puede notar que los factores que más influyen para la determinación de la potencia son el diámetro del rotor y la velocidad del viento, como era de esperarse de una turbina eólica [66], [67].

Un aerogenerador de muy altas características, instalado en un lugar inapropiado, no ofrecerá buenos resultados. Por eso es necesario estudiar la presencia de obstáculos y turbulencias para evitarlos.

Se puede pensar que para tener el aerogenerador a una buena altura y cerca del sitio de consumo, la solución sería instalarlo en la parte superior de la vivienda, además que se podría ahorrar el costo de la torre para el aerogenerador. Sin embargo, hay algunas razones que no hacen factible esta solución. La construcción de la vivienda no está diseñada para soportar esfuerzos adicionales producidos por la instalación del aerogenerador en el tejado, además que la estructura de la casa absorbería las vibraciones, amplificándolas.

Tanto que el riesgo y las molestias que se ocasionan, terminarían perjudicando. La mejor opción es instalar el aerogenerador sobre una torre propia.

La mejor opción, dada la arquitectura general de la ciudad, es instalar el aerogenerador sobre la terraza del domicilio [68].

La energía eólica posee varias características que la hace muy llamativa: es barata, en comparación con la termo generación y la solar fotovoltaica [69]; limpia, renovable, produce suficiente electricidad y es accesible a cualquier persona, pero también presenta ciertos inconvenientes, para instalaciones eólicas pequeñas. Por ejemplo, no se podría abastecer la calefacción, el aire acondicionado, hornos eléctricos, electrodomésticos, duchas eléctricas e iluminación, al mismo tiempo. Habría que adaptarse a una nueva forma de vida, siendo más cuidadosos con el consumo eléctrico, si solo dependemos de la energía eólica [70].

4.2.3 Almacenamiento de la energía producida.

Por múltiples motivos se requiere cierto margen de almacenamiento en las redes eléctricas, ya sea para proveer una reserva ante contingencias en el sistema eléctrico, ya sea para compensación de perturbaciones transitorias o permanentes o para asegurar un nivel de estabilidad y seguridad en los sistemas. El tipo de almacenamiento deberá ser analizado en función de las necesidades.

Para respuestas muy rápidas se recomienda los supercapacitores o superconductores, en compensación de perturbaciones y para respuestas más lentas, pero de mayor capacidad, los volantes inerciales o baterías. Cada uno de estos sistemas tiene requisitos propios que deben ser atendidos [65].

Con sistemas de generación renovables, es posible incluir almacenamiento. Este almacenamiento se debe incluir en el sistema de acondicionamiento de potencia, es decir en la etapa de conversión de la energía. Según el sistema de generación de que se trate, sea FV, EO o híbrido, existe una etapa de CC a la entrada del inversor, donde es posible acoplar el almacenamiento previsto. El problema surge en los niveles de tensión que puede manejar cada almacenador y el nivel de tensión que se está utilizando en el sistema de generación. Este

inconveniente se soluciona con un convertidor de CC-CC entre el almacenamiento y la barra de CC del generador.

Como ya se mencionó, al elegir una conexión simultánea con la red pública, el medio de almacenamiento de la energía proporcionada por el aerogenerador, será la misma red pública; ya que al entregar el excedente de energía aerogenerada a la red, y tomar energía de la red cuando el aerogenerador no abastece la demanda, puede verse a la red pública como un sistema de almacenamiento de energía.

4.2.4 Elección del inversor.

El inversor depende de la potencia de la instalación y de la calidad de la onda senoidal que se precise. En la actualidad, la electrónica que disponen los inversores hacen de estos, de excelente calidad para todas las necesidades de potencia. Los inversores ofrecen un rendimiento superior al 97%.

Para el caso del Long Bow 1 kW, está disponible el inversor diseñado especialmente para este micro aerogenerador, y que se halla incorporado en el panel de control “panel converter” de la Zytech Aerodyne [71].

4.2.5 Elección e instalación de la torre.

La torre permite colocar al aerogenerador a una cierta altura del suelo, a un viento más constante y fuerte. Para el Long Bow 1 kW, existen dos alternativas de torres ya diseñadas para el efecto, de aproximadamente 7 y 14 metros de altura, que contienen todos los componentes necesarios para la instalación de las mismas.

Hay que tener en cuenta que el izado de la torre, es muy tedioso, por ejemplo, para el micro aerogenerador Long Bow de 23,1 Kg de peso, la fuerza que se debe hacer para elevar la torre junto con el aerogenerador es de aproximadamente de 150 Kg. Por eso es conveniente contar con ayuda para realizar este trabajo [72].

4.2.6 Conexiones e instalación del panel de control.

Las conexiones eléctricas al micro aerogenerador es mejor hacerlo antes de realizar su montaje en la torre. Si bien, es posible hacerlo después es más laborioso y se corre ciertos peligros de botar la torre o dañar los componentes.

La conexión del aerogenerador al panel de control debe tener la menor distancia posible, a fin de minimizar las pérdidas eléctricas. El panel de control debe estar colocado en un punto cercano al lugar de consumo [73].

El panel de control, debe ser colocado sobre una pared, a una altura recomendable de 1,5 metros del suelo y alejado de por lo menos 0,5 metros del banco de baterías, en caso de que estas sean necesarias, al no disponer de conexión a la red.

Cuando el micro aerogenerador entrega tensión suficiente, el convertidor del panel de control conecta automáticamente a la red eléctrica, de tal forma que la electricidad es proporcionada por la turbina. En caso de requerir una mayor energía, es obtenida de la red de distribución, caso contrario, la energía sobrante es entregada a la red.

El convertidor de conexión a la red, del panel de control, mantiene en todo momento el equilibrio entre la energía eléctrica producida por el aerogenerador y la de la red eléctrica. De existir algún tipo de fallo, este se encarga de desconectar el sistema del aerogenerador a la red [74].

4.3 Análisis económico.

El costo actual de inversión de un sistema de generación eólica, si bien es alto, ofrece una rápida recuperación del capital invertido, y un ahorro importante de los costos del consumo de energía eléctrica, por más pequeño que sea este sistema.

La tecnología eólica actual, permite conseguir generación eléctrica a condiciones de bajo consumo y ahorro de energía, durante las horas de producción eólica [62],[64].

4.3.1 Estimación de la producción de la energía eólica

La ley de distribución de probabilidad de Weibull permite calcular, del total de horas de un año, cuántas tendrán vientos de una velocidad determinada.

Se realiza una tabla con las velocidades del viento en intervalos de 1m/s, a las que se multiplica por la probabilidad asociada y por las 8760 horas que tiene el año, obteniéndose el histograma de la figura 4.5.

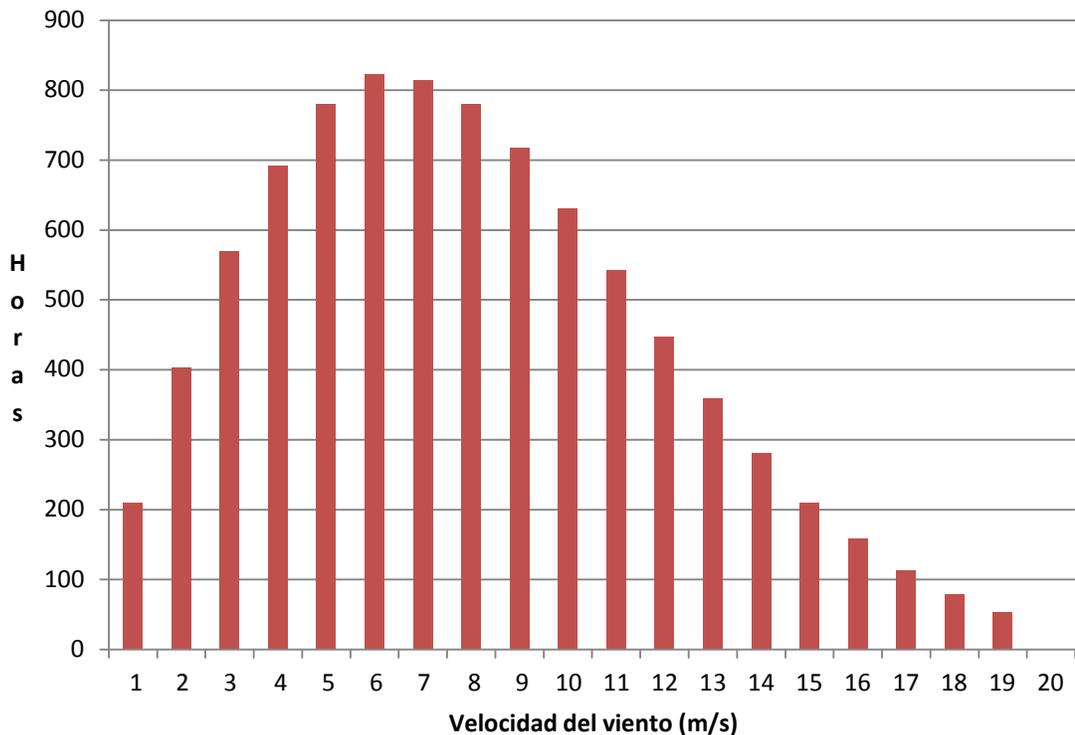


Figura 4.5 Histograma de la velocidad anual del viento.

Fuente: Propia del autor.

Se puede observar que habrá más de 800 horas al año en que la velocidad del viento esté entre 5,5 y 6,5 m/s.

Contrastando esta información con la curva de potencia del aerogenerador seleccionado, tal como se hizo en el capítulo 3 para un día de operación, se puede

obtener la energía proporcionada por la instalación eólica durante un año. Lo que se muestra en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Producción anual del aerogenerador.

| v (m/s) | Potencia aerogenerador (w) | Horas año | Producción (w) |
|-------------------------|---|----------------------|---------------------------|
| 1 | 0 | 248,5 | 0 |
| 2 | 0 | 475,9 | 0 |
| 3 | 21,3 | 664,4 | 14151,72 |
| 4 | 84,9 | 800,9 | 67996,41 |
| 5 | 197,3 | 879,6 | 173545,08 |
| 6 | 363,8 | 901 | 327783,8 |
| 7 | 594,9 | 871,9 | 518693,31 |
| 8 | 900,8 | 803 | 723342,4 |
| 9 | 1000 | 707,4 | 707400 |
| 10 | 1100 | 598 | 657800 |
| 11 | 1200 | 486,2 | 583440 |
| 12 | 1200 | 381 | 457200 |
| 13 | 1200 | 288,1 | 345720 |
| 14 | 1200 | 210,4 | 252480 |
| 15 | 1200 | 148,5 | 178200 |
| 16 | 1200 | 101,4 | 121680 |
| 17 | 0 | 67 | 0 |
| 18 | 0 | 42,9 | 0 |
| 19 | 0 | 26,6 | 0 |
| Producción anual | | | 5129432,72 |

Como se ve, la energía proporcionada por el aerogenerador en un año, es de 5,12 MWh.

Tomando como referencia el costo oficial de energía eléctrica en Ecuador de USD 0,0933 el kWh, el aerogenerador producirá USD 478,58

Con el objeto de tener una idea de los costos y beneficios económicos que la instalación de un sistema eólico puede proporcionar en una residencia, en la zona norte de Quito, para el caso del micro aerogenerador Long Bow, se ha elaborado una tabla que resumen los costos relativos.

Tabla 4.3 Ejemplo de los costos de los componentes de energía eólica.

| Componentes | Valor en de dólares |
|-----------------------|----------------------------|
| Micro aerogenerador | 3850 |
| Torre y accesorios | 2100 |
| Panel de control | 1700 |
| Montaje e instalación | 850 |
| Total | 8500 |

En la tabla 4.3 se puede apreciar los costos de inversión de los componentes necesarios para la instalación del sistema eólico.

La financiación de la instalación se lo realizaría mediante crédito de la Corporación Financiera Nacional, para un plazo de 3 años. La tabla de amortización del crédito se lo presenta en la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Tabla de amortización.

| TABLA DE AMORTIZACION | | | | | |
|-----------------------|-------------|------------|------------------------|-------------|-----------|
| BENEFICIARIO | | CFN | | | |
| INSTIT. FINANCIERA | | 8.500,00 | | | |
| MONTO EN USD | | 10,50% | | T. EFECTIVA | 11,0203% |
| TASA DE INTERES | | 3 | años | | |
| PLAZO | | 0 | años | | |
| GRACIA | | 07/03/2015 | | | |
| FECHA DE INICIO | | DOLARES | | | |
| MONEDA | | 30 | días | | |
| AMORTIZACION | | 36 | para amortizar capital | | |
| CADA | | | | | |
| Número de períodos | | | | | |
| No. | VENCIMIENTO | SALDO | INTERES | PRINCIPAL | DIVIDENDO |
| 0 | | 8.500,00 | | | |
| 1 | 06-abr-2015 | 8.298,10 | 74,38 | 201,90 | 276,27 |
| 2 | 06-may-2015 | 8.094,44 | 72,61 | 203,66 | 276,27 |
| 3 | 05-jun-2015 | 7.889,00 | 70,83 | 205,44 | 276,27 |
| 4 | 05-jul-2015 | 7.681,76 | 69,03 | 207,24 | 276,27 |
| 5 | 04-ago-2015 | 7.472,70 | 67,22 | 209,06 | 276,27 |
| 6 | 03-sep-2015 | 7.261,82 | 65,39 | 210,88 | 276,27 |
| 7 | 03-oct-2015 | 7.049,09 | 63,54 | 212,73 | 276,27 |
| 8 | 02-nov-2015 | 6.834,49 | 61,68 | 214,59 | 276,27 |
| 9 | 02-dic-2015 | 6.618,03 | 59,80 | 216,47 | 276,27 |
| 10 | 01-ene-2016 | 6.399,66 | 57,91 | 218,36 | 276,27 |
| 11 | 31-ene-2016 | 6.179,39 | 56,00 | 220,27 | 276,27 |
| 12 | 01-mar-2016 | 5.957,19 | 54,07 | 222,20 | 276,27 |
| 13 | 31-mar-2016 | 5.733,04 | 52,13 | 224,15 | 276,27 |
| 14 | 30-abr-2016 | 5.506,94 | 50,16 | 226,11 | 276,27 |
| 15 | 30-may-2016 | 5.278,85 | 48,19 | 228,09 | 276,27 |
| 16 | 29-jun-2016 | 5.048,77 | 46,19 | 230,08 | 276,27 |
| 17 | 29-jul-2016 | 4.816,68 | 44,18 | 232,09 | 276,27 |
| 18 | 28-ago-2016 | 4.582,55 | 42,15 | 234,12 | 276,27 |
| 19 | 27-sep-2016 | 4.346,38 | 40,10 | 236,17 | 276,27 |
| 20 | 27-oct-2016 | 4.108,14 | 38,03 | 238,24 | 276,27 |
| 21 | 26-nov-2016 | 3.867,81 | 35,95 | 240,32 | 276,27 |
| 22 | 26-dic-2016 | 3.625,39 | 33,84 | 242,43 | 276,27 |
| 23 | 25-ene-2017 | 3.380,84 | 31,72 | 244,55 | 276,27 |
| 24 | 24-feb-2017 | 3.134,15 | 29,58 | 246,69 | 276,27 |
| 25 | 26-mar-2017 | 2.885,30 | 27,42 | 248,85 | 276,27 |
| 26 | 25-abr-2017 | 2.634,28 | 25,25 | 251,02 | 276,27 |
| 27 | 25-may-2017 | 2.381,06 | 23,05 | 253,22 | 276,27 |
| 28 | 24-jun-2017 | 2.125,62 | 20,83 | 255,44 | 276,27 |
| 29 | 24-jul-2017 | 1.867,95 | 18,60 | 257,67 | 276,27 |
| 30 | 23-ago-2017 | 1.608,02 | 16,34 | 259,93 | 276,27 |
| 31 | 22-sep-2017 | 1.345,82 | 14,07 | 262,20 | 276,27 |
| 32 | 22-oct-2017 | 1.081,33 | 11,78 | 264,49 | 276,27 |
| 33 | 21-nov-2017 | 814,52 | 9,46 | 266,81 | 276,27 |
| 34 | 21-dic-2017 | 545,37 | 7,13 | 269,14 | 276,27 |
| 35 | 20-ene-2018 | 273,87 | 4,77 | 271,50 | 276,27 |
| 36 | 19-feb-2018 | 0,00 | 2,40 | 273,87 | 276,27 |
| | | | 1.445,75 | 8.500,00 | 9.945,75 |

La viabilidad económica del proyecto se analiza utilizando las herramientas financieras VAN, TIR y PRI. El VAN, Valor Actual Neto, permite calcular el valor actual de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión [75].

La expresión matemática que permite calcular el VAN es la siguiente:

$$\sum \quad (4.1)$$

Donde:

V_t representa los flujos de caja en el periodo t

I_0 es el valor de la inversión inicial

N es el número de periodos considerados

K es el tipo de interés aplicado

La TIR, Tasa Interna de Retorno en cambio mide la rentabilidad de los pagos y cobros actualizados, generados por una inversión, en términos relativos, es decir, en porcentaje [76]

Matemáticamente, la TIR representa el tipo de interés que convierte en cero el VAN. La expresión matemática queda así:

$$\sum \quad (4.2)$$

De esta ecuación se despeja k.

El Periodo de Retorno de la Inversión (PRI), es el tiempo que tarda el proyecto en generar utilidades económicas, es decir, el tiempo en que se recupera la inversión realizada, y a partir del cual el proyecto empieza a generar ganancias.

Para obtener el PRI, se suma el flujo de caja de cada periodo, con el histórico de flujo de caja del periodo anterior. El periodo en que el resultado es cero o positivo, es que se ha logrado la recuperación del capital invertido.

Dado que estas herramientas financieras se basan en flujos de caja futuros, se debe realizar un balance de ingresos y egresos a futuro, durante el tiempo que se estime conveniente. En el caso de la aerogeneración, se considera un plazo de 20 años, que es el tiempo de vida útil del equipo.

Aunque es posible aplicar las expresiones matemáticas de forma recursiva, hasta completar el número de periodos considerado, se ha preferido utilizar las fórmulas financieras que proveen las hojas de cálculo.

La única fuente de ingresos para el proyecto, es la energía eléctrica producida por el aerogenerador, en cambio en los egresos, se tienen los gastos de mantenimiento de la instalación.

Las operaciones de mantenimiento se refieren principalmente a las de mantenimiento preventivo, que durante los dos primeros años de operación se realizan:

- A los 3 meses.
- A los 6 meses.
- A los 12 meses.
- A los 18 meses.
- A los 24 meses.

A partir de los dos primeros años, las revisiones son semestrales.

Las operaciones de mantenimiento se realizan tanto al sistema mecánico, como al sistema eléctrico [77].

El mantenimiento mecánico consiste en:

- Detección de fisuras o grietas en el buje o las palas.
- Revisión de uniones atornilladas.
- Lubricación de partes móviles.
- Sonido del sistema de orientación.
- Medición del nivel de aceite de la caja multiplicadora.
- Revisión de los noveles del sistema hidráulico.

El mantenimiento del sistema eléctrico consiste en:

- Verificación del voltaje de salida.
- Medición de intensidad de armadura.
- Revisión de cables y conectores.

Los costos de mantenimiento se detallan en la tabla 4.6 como costo de producción.

En la tabla 4.5 se muestra un resumen de los flujos de caja proyectados, así como los valores de VAN, TIR y PRI obtenidos mediante cálculo en hoja electrónica.

Tabla 4.5 Flujos de caja proyectados a 20 años.

| Periodo | Producción aerogenerador [USD] | Costo de Producción [USD] | Flujo de Caja [USD] | Flujo de caja Histórico |
|---------|--------------------------------|---------------------------|---------------------|-------------------------|
| Año 0 | | | -8500,00 | -8500 |
| Año 1 | 5129,43 | 4.137,60 | 991,83 | -7508,17 |
| Año 2 | 5129,43 | 4.051,69 | 1077,74 | -6430,42 |
| Año 3 | 5129,43 | 3.026,72 | 2102,71 | -4327,71 |
| Año 4 | 5129,43 | 3.241,10 | 1888,33 | -2439,38 |
| Año 5 | 5129,43 | 2.813,78 | 2315,65 | -123,73 |
| Año 6 | 5129,43 | 2.802,20 | 2327,23 | 2203,50 |
| Año 7 | 5129,43 | 2.606,35 | 2523,08 | 4726,59 |
| Año 8 | 5129,43 | 2.242,67 | 2886,76 | 7613,35 |
| Año 9 | 5129,43 | 2.256,11 | 2873,32 | 10486,67 |
| Año 10 | 5129,43 | 2.099,70 | 3029,73 | 13516,40 |
| Año 11 | 5129,43 | 1.954,53 | 3174,90 | 16691,31 |
| Año 12 | 5129,43 | 1.819,78 | 3309,65 | 20000,96 |
| Año 13 | 5129,43 | 1.694,67 | 3434,76 | 23435,72 |
| Año 14 | 5129,43 | 1.578,49 | 3550,94 | 26986,67 |
| Año 15 | 5129,43 | 1.470,59 | 3658,84 | 30645,51 |
| Año 16 | 5129,43 | 1.370,55 | 3758,88 | 34404,39 |
| Año 17 | 5129,43 | 1.277,22 | 3852,21 | 38256,60 |
| Año 18 | 5129,43 | 1.190,67 | 3938,76 | 42195,37 |
| Año 19 | 5129,43 | 1.110,23 | 4019,20 | 46214,57 |
| Año 20 | 5129,43 | 1.035,46 | 4093,97 | 50308,54 |
| | | | VAN | 29.469,08 |
| | | | TIR | 23% |
| | | | PRI | 6 años |

El cálculo del VAN arroja un resultado positivo, lo que indica que el proyecto es viable económicamente.

La TIR es del 23%, que es más alto que el interés pagado por cualquier banco, es decir, que es más rentable realizar la inversión que guardar el dinero en el banco.

El PRI se ubica en el sexto año, cuando el histórico de los flujos de caja se hace positivo, esto quiere decir que el dinero invertido se recupera en 6 años, desde el año 7 al año 20, el proyecto genera ganancias.

En la figura 4.6 se puede apreciar el tiempo en que se recupera el capital y a partir del cual se obtienen ganancias con el proyecto.

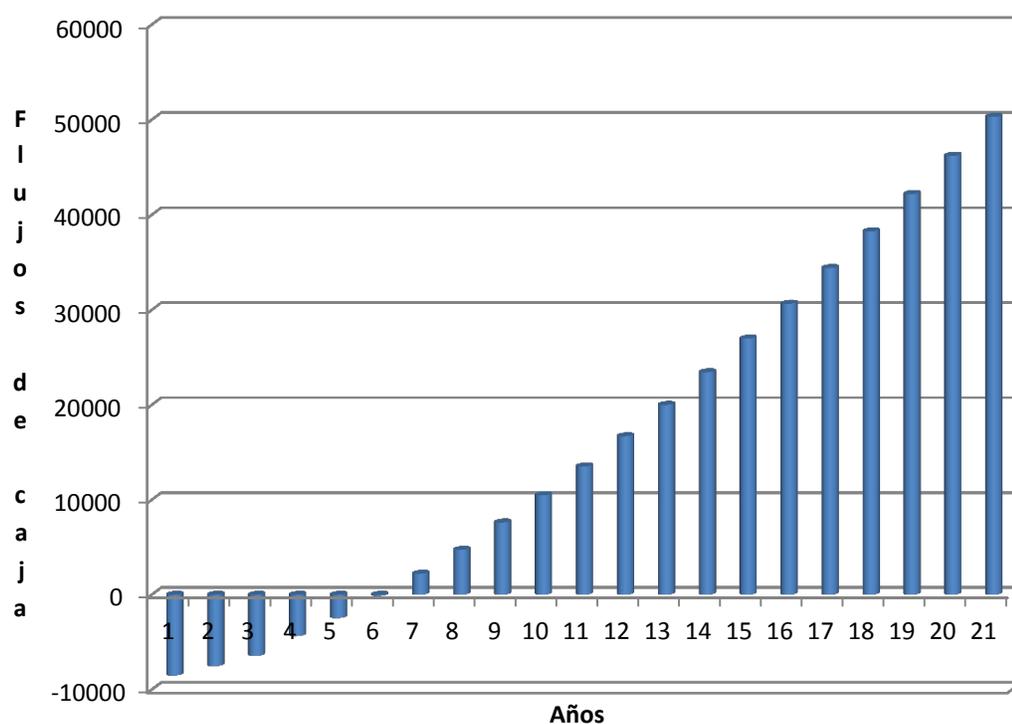


Figura 4.6 Representación gráfica del Periodo de Recuperación de la Inversión.

Fuente: Propia del autor.

4.4 Análisis social.

El sistema de aero-generación eléctrica posee grandes ventajas para los colectivos sociales, así, desde el punto de vista del cuidado del medio ambiente, la generación eólica presenta las siguientes ventajas:

- Disminución de contaminación térmica.
- Disminución de energías contaminantes [65].
- Disminución de contaminación por la combustión de combustibles.

Esto debido a que con los aerogeneradores, se disminuye el uso de centrales térmicas, que utilizan combustible fósil y contaminan el medio ambiente.

Un aspecto no tan amigable con el entorno de los aerogeneradores, es el ruido que producen, el cual puede resultar molesto a las personas y animales, por lo que se debe tener cuidado de incluir el estudio del ruido del aerogenerador, en cualquier proyecto de instalación eólica en una zona residencial.

Las micro redes eólicas son diseñadas para dar suministro energético a aquellas lugares donde la red eléctrica no llega o el costo de electricidad es un gran problema, con lo que se puede dar servicio eléctrico a todos los sectores sociales, sin incurrir en grandes gastos.

También sirven para atender a diferentes necesidades del mercado de electrificación rural, donde las redes de energía eléctrica aún no se encuentran instaladas o están en proceso.

El modelo sirve esencialmente para instalar micro aerogeneradores eólicos, que permitan proporcionar energía eléctrica en zonas donde no se dispone de red eléctrica o con el objetivo de conseguir un ahorro en los costos, permitiendo también la conexión a redes de distribución existentes y el control de energía entre la micro red y la red de distribución. Este sistema también facilita el funcionar de forma autónoma incluso en condiciones de fallo de suministro de la red de distribución [65].

Aunque la energía eólica no es tan determinista desde el punto de vista de planificación y generación asociada al sitio o lugar donde se instala, en muchos casos es un complemento a otras formas de generación, como solar o fotovoltaica.

Además, algunas aplicaciones típicas de mini eólica que ofrecen una solución perfecta son [78]:

- Instalaciones aisladas de casas y granjas.
- Alumbrado de carreteras y señalización.
- Complementación con paneles solares.
- Bombeo de agua.
- Monitorización de instalaciones remotas de telecomunicaciones [79],[80].

Estos últimos sistemas están equipados con un potente sistema de mantenimiento remoto basado en tecnología web server con interfaces de usuario muy amigables y fáciles de utilizar, que permite a los usuarios y responsables de mantenimiento, el control en tiempo real de los equipos[79].

Otro aspecto a considerar es la generación de nuevas plazas de trabajo. Según un informe de The European Wind Energy Association, el sector de la energía eólica ha generado 33 nuevas plazas de trabajo, cada día, durante los últimos cinco años en Europa [81] Con el impulso adecuado, esta tendencia podría continuar en el Ecuador, lo que daría un gran impulso a la economía.

CONCLUSIONES

Las ventajas más importantes al usar la energía eólica como medio alternativo en la generación de energía eléctrica son: el ahorro en el costo de la energía, la mejora en el aspecto ambiental y además el uso en lugares aislados donde no llega la electricidad.

La energía a bajo costo ha sido una de las razones más importante para impulsar el desarrollo de nuevas tecnologías de generación distribuida de formas renovables de energía eólica.

El agotamiento de los recursos de los combustibles fósiles hace pensar seriamente en la utilización de estas nuevas alternativas para la producción de la energía, además del crecimiento acelerado de la población y de la limitación de los recursos energéticos utilizados por medios tradicionales. Un sistema de generación eólica representa una alternativa viable para mejorar notablemente el aprovechamiento de los recursos energéticos.

Es necesario escoger el micro aerogenerador para el sistema eólico a instalar considerando las características de potencia que se necesite, que sea de uso doméstico, si este es el caso, para una vivienda pequeña, que sea liviano, y que posea un precio relativamente cómodo.

El costo de inversión de un sistema de generación eólica ofrece una rápida recuperación del capital invertido, y un ahorro importante de los costos del consumo de energía eléctrica, por más pequeño que sea este sistema.

Para el modelo escogido en el presente trabajo, la inversión inicial es recuperable en alrededor de 2 años y medio, lo cual justificaría su utilización.

El sistema eólico posee grandes ventajas sociales, desde el punto de vista del cuidado del medio ambiente, por ejemplo: en la disminución de contaminación térmica, y en la reducción en la contaminación por la combustión de combustibles, entre otras.

El modelo sirve esencialmente para micro aerogeneradores eólicos, que permitan proporcionar energía eléctrica en zonas donde no se dispone de red eléctrica o con el objetivo de conseguir un ahorro en los costos, permitiendo también la conexión a redes de distribución existentes. Este sistema también facilita el funcionar de forma autónoma incluso en condiciones de fallo de suministro de la red de distribución.

Se puede realizar una extensión del sistema de generación distribuida, para tener además de la energía eólica, otras formas de generación de energía, como pueden ser de la energía fotovoltaica, energía solar, entre otras.

El análisis estadístico del viento ha permitido establecer que la generación de electricidad a partir del viento es posible, y que incluso puede producir excedentes.

La altura de la torre de aerogeneración, 10 m, no resulta prohibitiva ni genera impacto visual negativo, en el entorno de la ciudad.

La conexión del sistema aerogenerado a la red eléctrica pública no supone una tarea difícil de realizar.

Se puede prescindir del sistema de almacenamiento, si se vende la energía sobrante a la Empresa Eléctrica.

La generación distribuida se presenta como una alternativa viable, técnica y económicamente, para aumentar el parque eléctrico nacional, ya que aliviaría la carga de las hidroeléctricas, y disminuiría la termo generación.

Como proyecto de inversión, resulta altamente rentable, aun con el precio oficial de comercialización de la energía eléctrica, ya que el periodo de recuperación de la inversión es corto y la rentabilidad es muy alta, en comparación con la tasa de interés del sistema financiero nacional.

Ofrece la posibilidad de generar nuevas fuentes de trabajo, directas e indirectas, por lo que sería un agente de activación de la economía, reduciendo el desempleo.

Reduciría la emisión de contaminantes a la atmósfera, debido a la eliminación de centrales térmicas.

RECOMENDACIONES

Como recomendaciones, que se sugieren para mejorar los sistemas de generación distribuida, de energías renovables, se establecen los siguientes:

Realizar un estudio actual del potencial eólico en zonas de interés con el propósito de implementar sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos-solares en las regiones de la costa, sierra y oriental del territorio ecuatoriano.

Estudiar el campo de vientos en las islas Galápagos, mediante la instalación de una estación anemométrica, con mediciones de viento a 10 metros, 20 metros, 40 metros y 60 metros de altura.

También realizar la medición de la dirección del viento en al menos cuatro alturas, para levantar un perfil vertical de la velocidad del viento, con el objetivo de analizar las posibilidades de instalar sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos-solares, con fines de ahorro de energía eléctrica.

Otro proyecto de investigación es el de desarrollar modelos de optimización para sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos-solares y crear un mapa de ahorro energético en diferentes zonas del Ecuador.

Realizar nuevos diseños de micro aerogeneradores, bajo consideraciones de carga, teniendo en cuenta la resistencia, el comportamiento dinámico y las propiedades de fatiga de los materiales y de todo el conjunto.

Realizar un estudio detallado sobre las turbulencias en determinadas zonas, ya que estas disminuyen la posibilidad en un aerogenerador, de utilizar la energía del viento de forma efectiva, también provocan roturas y desgaste en las turbinas eólicas.

Realizar nuevos diseños de las torres de aerogeneradores, a fin de que puedan

ser construidas lo suficientemente cercanas del nivel del suelo y que además puedan evitar las turbulencias del viento.

Realizar nuevos modelos de planificación óptima que introduzca el efecto de los mercados eléctricos, la no linealidad de los elementos, la consideración de la fiabilidad y algunas restricciones técnicas como la estabilidad de tensiones.

Realizar mejores algoritmos de resolución de modelos matemáticos, más rápidos, sobre todo de los modelos probabilísticos.

Ampliar las metodologías, para considerar sistemas de distribución donde se incluyan las redes primarias y secundarias.

Realizar un estudio detallado de los niveles de ruido, involucrados en los diferentes sistemas de generación de energía, tanto eólicos, como de nuevos sistemas de energía renovables.

Realizar un estudio comparativo entre diversos modelos y fabricantes de aerogeneradores, para establecer con mayor precisión el modelo adecuado al entorno de la ciudad.

Determinar modelos menos contaminantes de baterías, para su posible uso como elementos de almacenamiento de energía.

Establecer costos de medidores bidireccionales, para la posible venta de energía eléctrica a la red pública.

Revisar las normativas legales para la comercialización de energía eléctrica, por parte de una persona natural.

Revisar la normativa vigente respecto a construcciones en el perímetro urbano,

ya las torres de aerogeneración tienen un fuerte impacto visual.

Realizar un estudio más amplio, tomando en cuenta las dimensiones geográficas de la ciudad, así como su morfología.

Realizar un estudio de factibilidad para los sectores periféricos de la ciudad, para identificar posibles puntos de generación eólica.

Analizar con más profundidad el impacto estético de las torres de generación eólica en los habitantes de la ciudad.

REFERENCIAS

- [1] A. Borbely, J. Kreide, "Distributed Generation", CRC Press, 2001, Florida, USA.
- [2] M. Garcia, "*Energía Eólica*," Ed. Prom. Madrid, España, 2009.
- [3] F. Hickok, "*Handbook of Solar and Wind Energy*." Boston, Cahners Book, 2009.
- [4] S. Mocárquer and G. Hugh, "Recursos Renovables como Generación Distribuida en los Sistemas Eléctricos," pp. 1–11, 2004.
- [5] W. Jara, "*Introducción a las Energías Renovables no Convencionales*," Leaders SA. Chile, 2008.
- [6] J. Machiavello, A. Pardo, "Generación distribuida", Instituto de Ingeniería Eléctrica , 2011, Montevideo, Uruguay.
- [7] "Guía básica de la generación distribuida", Comunidad de Madrid, 2010, Madrid, España.
- [8] "Asociación Empresarial Eólica - Spanish Wind Energy Association - Energía Eólica." [Online]. Available: <http://www.aeeolica.org/>. [Accessed: 06-Feb-2015].
- [9] J. Álvarez, J. López, "Estudio De Diferentes Topologías De Generación", Upna, Pamplona, 2012, España.
- [10] T. Ackermann, "*Wind Power in Power Systems*," John Wiley. 2011.
- [11] R. Lijteroff, "Evaluaciones de impacto ambiental", Servicios Ambientales, 2013.
- [12] R. Cárdenas, "Control Primario y Secundario", Ingeniería Eléctrica, 2013, México.
- [13] C. Zapata, "Confiabilidad de los sistemas eléctricos", Tecnológico de Pereira, 2011, Colomba.
- [14] T. D. E. Graduaci and P. P. La, "Análisis de sistemas aislados existentes en el salvador y propuesta de normativa de calidad de servicio en sistemas aislados de distribución de energía eléctrica.," 2011.
- [15] "APPA - Asociación de Productores de Energías Renovables." [Online]. Available: <http://www.appa.es/>. [Accessed: 07-Feb-2015].
- [16] B. A. O. Flores, "Universidad de chile facultad de ciencias físicas y matemáticas departamento de ingeniería eléctrica," 2010.
- [17] J. Gómez, J. Amatti "Generación Distribuida", *IEEE*, 2010, Argentina.
- [18] J. Mann, J. Sorensen, P. Morthorst, "Wind Energy", IOP publishing, Energy, Denmark, 2008
- [19] "Energías Renovables." [Online]. Available: http://www.anes.org/anes/index.php?option=com_wrapper&Itemid=11. [Accessed: 06-Feb-2015].
- [20] "NASA - Spanish Language NASA Sites." [Online]. Available: http://www.nasa.gov/about/highlights/En_Espanol.html[Accessed: 06-Feb-2015].
- [21] "Atlas eólico del Ecuador con fines de generación eléctrica", 2013, Ecuador.
- [22] "Medioambiente.org - influencia." [Online]. Available: <http://es.labs.teads.tv/top-blogs/source/www.medioambiente.org-E5Kg3>. [Accessed: 06-Feb-2015].

- [23] G. Guerrón, E. García, and A. Montero, "Influencia de las ráfagas de viento en la calidad de la energía de los parques eólicos (Influence of wind gusts in power quality on wind farms)," pp. 25–44, 2014.
- [24] R. M. Silva, *Estudio del comportamiento de la velocidad del viento y su energía eólica disponible en la estación minas de Huascachaca, provincia del Azuay*. 2003, p. 26.
- [25] E. V. D. E. L. O. S. R. Eólicos, "INFORMACIÓN GENERAL SOBRE ENERGÍA EÓLICA," 2013.
- [26] M. José, L. López, M. Carlos, G. García, M. Eduardo, Z. De León, A. Enrique, M. Otero, A. Jesús, and P. Martínez, "Estadística Preliminar de los Vientos para la Zona Urbana de Aguascalientes," no. 940, pp. 20–27, 2008.
- [27] G. Guerrón, E. García, and A. Montero, "Influencia de las ráfagas de viento en la calidad de la energía de los parques eólicos (Influence of wind gusts in power quality on wind farms)," pp. 25–44, 2014.
- [28] "Secretaría de ambiente." [Online]. Available: <http://190.152.144.75/reportes/Reporte10MinutoGraph.aspx>. [Accessed: 06-Feb-2015].
- [29] C. D. E. I. Mecánica, L. A. P. D. E. Loja-ecuador, H. Gabriel, and O. Armijos, "Estudio y evaluación de los parámetros de operación del proyecto eólico Villonaco de la provincia de Loja-Ecuador," 2014.
- [30] O. Comprender, W. View, D. Climaticos, D. Clim, and V. E. R. Datos, "Curso: Caracterización de Fenómenos Meteorológicos Guía de la Actividad 3: Trabajo Colaborativo 2," 2013.
- [31] J. López, "Energía Renovables", 2011, Madrid, España.
- [32] L. A. Veritat, *Introducción a la teoría de las turbinas eólicas*. 2009, pp. 1–172.
- [33] "OPEXenergy, operacion y mantenimiento." [Online]. Available: <http://opex-energy.com/>. [Accessed: 06-Feb-2015].
- [34] S. Moquárter, H. Rudnick, "Recursos renovables como generación distribuida en los sistemas eléctricos ", Pontificia Universidad Católica, 2011, Chile.
- [35] V. Lombardo, E. Fiordilino, "Wind Energy", IOP journals, 2013, Italia.
- [36] A. Arriagada, "Confiabilidad en sistemas eléctricos de distribución", Universidad Católica, 2010, Chile.
- [37] H. Ramiro and P. Pila, "ESTUDIO DEL FLICKER EN UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA," 2010.
- [38] W. A. V. Guerrero, "Modelación, simulación y control de aerogeneradores con generador de inducción doblemente alimentado utilizando matlab," 2014.
- [39] C. O. Ectados, A. L. A. Red, and E. Uruguay, "Evaluació de la emisió de flicker causada por aerogeneradores conectados a la red eléctrica uruguaya de 150kv."
- [40] A. Tejada and A. Llamas, "EFECTOS DE LAS ARMÓNICAS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS A. Tejada, A. Llamas 1."

- [41] T. M. Blooming, N. Carolina, and D. J. Carnovale, "Eaton Electrical," pp. 1–9, 1992.
- [42] G. Ahrtz, A. Münnemann, and D. Fernández, "TURBINAS EÓLICAS," pp. 47–54, 2007.
- [43] "Capítulo iii análisis de armónicos y factor de potencia 31," pp. 31–54.
- [44] A. C. Normativa, "ANEXO C. Normativa y legislación," pp. 33–42, 1998.
- [45] "Generating a cleaner." [Online]. Available: <http://www.windpower.com/>. [Accessed: 06-Feb-2015].
- [46] "Asociación Empresarial Eólica - Spanish Wind Energy Association - Energía Eólica." [Online]. Available: <http://www.aeeolica.org/>. [Accessed: 06-Feb-2015].
- [47] "Buscar Ñaquito mapa | Karta-Online.com." [Online]. Available: <http://karta-online.com/es/>. [Accessed: 25-Feb-2015].
- [48] "ZYTECH AERODYNE." [Online]. Available: <http://www.zytechaerodyne.com/En/index.asp>. [Accessed: 25-Feb-2015].
- [49] J. Vicente, "Instalaciones en viviendas", Bogotá, 2013.
- [50] J. López, "Energía Renovables", 2011, Vol.3, Madrid, España.
- [51] Empresa Eléctrica Quito, "Normas para Sistemas de Distribución Parte A", EEQSA, Quito, 2014.
- [52] J. M. Escudero López, Manual de energía eólica: Investigación, diseño, promoción, construcción y explotación de distintos tipos de instalaciones, Madrid: Mundi - Prensa, 2004.
- [53] J. Manwell, J. McGowan y A. Rogers, Wind energy explained: Theory, design and application, Wiley and Sons, 2009.
- [54] ABB, Cuaderno de aplicaciones técnicas Nº12. Plantas Eólicas, Barcelona: ABB, 2012.
- [55] J. Carlos, C. Avella, E. Daniel, L. Figueroa, I. T. Ospino, O. Fredy, P. Caicedo, E. Ciro, Q. Oqueña, J. Ricardo, and V. Medina, "Modelo de gestión energética para el sector productivo nacional," vol. 6, no. 1, pp. 2–6, 2008.
- [56] C. Váquez, "Análisis modelamiento y gestión de una microred eléctrica para edificaciones residenciales usando paneles fotovoltaicos" 2014
- [57] J. e. a. Rodríguez Amenedo, Sistemas Eólicos de Producción de Energía, Madrid: Rueda, 2003.
- [58] Fundación de la energía de la comunidad de Madrid, "Guía Básica de la Generación Distribuida", Geáficas Elisa, Madrid, 2007.
- [59] S. J. Watson, D. G. Infield, J. P. Barton, and S. J. Wylie, "Modelling of the Performance of a Building-Mounted Ducted Wind Turbine," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 75, p. 012001, Jul. 2007.
- [60] Banco Interamericano de Desarrollo, "Perspectivas sobre generación distribuida mediante energías renovables en América Latina y el Caribe", de *V Foro de competitividad de las Américas para el Banco Interamericano de Desarrollo y el Compete Caribbean*, Santo Domingo, 2011.
- [61] G. Stabros and A. Nikos, "Power Limitations and Energy Yield Evaluation for Wind Farm Operating System." *Renewable Energy*, Elsevier, p. 1-23.

- [62] LOGITEK, "La gestión de la eficiencia energética", Barcelona, 2013.
- [63] M. M. M. P. Pontoriero P., "Evaluación técnica y económica de generación híbrida solar-eólica en al provinciade San Juan - Argentina", de *XIII Encuentro regional iberoamerocano de Cigré*, Puerto Iguazú, 2009.
- [64] Empresa Eléctrica de Godoy Cruz, «Tipos de gtarifas: La Cooperativa,» Belatrix Software Factory, 2015. [En línea]. Available: <http://www.cegc.com.ar/index.php/tarifas>. [Último acceso: 16 Febrero 2015].
- [65] J. Imamura, H. Tsumamuna, and T. Kurokawa, "*Study on the Wind Measurements and Performance Evaluation*". Vol. 70, Society of Mechanical Engineers, Tokyo, Japan, 2010, p. 1230-1236.
- [66] S. J. Watson, D. G. Infield, J. P. Barton, and S. J. Wylie, "Modelling of the Performance of a Building-Mounted Ducted Wind Turbine," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 75, p. 012001, Jul. 2007.
- [67] G. Stabros and A. Nikos, "*Power Limitations and Energy Yield Evaluation for Wind Farm Operating System*." *Renowable Energy*, Elsevier, p. 1-23.
- [68] C. Wang and R. G. Prinn, "Potential climatic impacts and reliability of large-scale offshore wind farms," *Environ. Res. Lett.*, vol. 6, no. 2, p. 025101, Apr. 2011.
- [69] LOGITEK, "La gestión de la eficiencia energética", Barcelona, 2013.
- [70] A. Sánchez and A. Viedma, "*Energía Eólica*." Editorial Escarabajal, España, 2010.
- [71] R. Pollabazzer, "*Estimation of the Energy Output of Windgenerators*." *Renowable Energy*, Vol. 29, p. 410-420.
- [72] F. Hongwei, Z. Xuanfu, and L. Yuzhao, "*Optimun Operation of Large Scale Wind Generation System*". *Renowable Energy* 16, p. 851-854.
- [73] S. Murakami, S. Mochidu, and A. Kato, "*Development of Local Area Wind Prediction System*". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 91, Elsevier Ltd., p. 1759-1776.
- [74] "*IEEE Application Guide for IEEE Std 1547TM*." IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, pp. 53-57.
- [75] C. A. J. e. a. al, "Modelo de gestión energética para el sector productivo nacional", Bogotá, 2008.
- [76] J J. Campos, R. Gómez y L. Santos, *Eficiencia energética y competitividad de empresas*, La Habana: UCF.80, 1998.
- [77] J. M. Escudero López, *Manual de energía eólica: Investigación, diseño, promoción, construcción y explotación de distintos tipos de instalaciones*, Madrid: Mundi - Prensa, 2004.
- [78] Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, *Plan Nacional del Buen Vivir 2013 - 2017*, Quito: El Telégrafo, 2013.
- [79] E. Castillo and J. Flowers, "*The Regional Replication of Hybrid Power System in Proceeding Rural*." Chile, 2010.
- [80] R. L. Busby, *Wind Power: The Industry Grows Up*. PennWell Books, 2012.

- [81] J. e. a. Rodríguez Amenedo, Sistemas Eólicos de Producción de Energía, Madrid: Rueda, 2003.