



**Universidad de Cuenca
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Eléctrica**

***“Análisis técnico del mini-parque eólico de la Universidad de Cuenca:
comparación de aerogeneradores de eje horizontal y vertical”***

Proyecto de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR:

Silvio Gabriel Méndez Urgiles
C.I. 0105729883

DIRECTOR

Ing. Juan Leonardo Espinoza Abad
C.I. 0102559325

Cuenca–Ecuador

2018



RESUMEN

En la última década, el sector eléctrico en el Ecuador ha venido desarrollándose de manera acelerada debido al crecimiento poblacional y expansión de la demanda eléctrica en el país. Esto llevó al Estado ecuatoriano a plantear un cambio en la matriz de generación energética, impulsando el desarrollo de las energías renovables y particularmente proyectos hidroeléctricos a gran escala, con el fin de dejar de lado el paradigma tradicional que considera a las centrales termoeléctricas basadas en combustibles fósiles. Este nuevo impulso busca también ampliar la cobertura eléctrica y dar acceso a los sectores rurales marginales mediante el uso de energías renovables a pequeña escala, donde la energía eólica es una de las opciones más viables. Sin embargo, esta opción ha sido, en la práctica, muy poco explorada en el país.

En el presente proyecto, se desarrolla un análisis de generación de energía eléctrica al mini-parque eólico de la Universidad de Cuenca ubicado en la granja Irquis, parroquia Tarqui del cantón Cuenca. El parque se compone de 3 aerogeneradores de distinta tecnología (ejes vertical y horizontal), y emplazados a distinta altura (18 y 24 metros). Partiendo de un análisis de evaluación del recurso eólico propio de la zona con los datos obtenidos de una estación meteorológica ubicada en el lugar de instalación de los aerogeneradores, se realizan los estudios y comparaciones requeridas, con el objetivo de determinar el aerogenerador que presente el mejor rendimiento, así como también estimar la producción energética del mini-parque eólico y estimar el porcentaje que cubra la demanda de la granja Irquis. La metodología presentada y los resultados obtenidos, convierten al presente documento en un estudio pionero sobre generación eólica a pequeña escala en el Ecuador.

PALABRAS CLAVE

MINI-PARQUE EÓLICO, GRANJA IRQUIS, GENERACIÓN DE ENERGÍA, ENERGÍA RENOVABLE, ENERGÍA EÓLICA, AEROGENERADORES, COMPARACIÓN, VELOCIDAD DEL VIENTO.



ABSTRACT

In the last decade, electric sector in Ecuador has been developing in a speed-up way because of the population growth and expansion of the electrical demand of the country. This led the Ecuadorian State to propose a change in the energy generation matrix, promoting the development of renewable energies and particularly large-scale hydroelectric projects, in order to set aside the traditional paradigm that considers fossils fuel-based thermoelectric power plants as their main source of generation. This new impulse also seeks to expand electricity coverage and bring access to marginal rural sectors using small-scale renewable energies, where wind energy is one of the most viable options. However, this option has been, in practice, very little explored in the country.

In the present project, an analysis of electric power generation in the mini- wind park farm of the University of Cuenca located in Tarqui parish of Cuenca canton, in the Irquis farm, is developed. The park is composed of three different technology wind turbines (vertical and horizontal axes), and located at different heights (18 and 24 meters). Starting from an evaluation analysis of the wind resource in the area with the data obtained from a meteorological station located at the installation site of the wind turbines, the required studies and comparisons are carried out, in order to determine the wind turbine that presents the best performance, as well as estimating the energy production of the mini-wind park farm, and estimating the percentage that covers the demand of the Irquis farm. The methodology and the results presented, convert this document into a pioneering study on small-scale wind generation in Ecuador.

KEYWORDS:

MINI WIND PARK, IRQUIS FARM, ENERGY GENERATION RENEWABLE ENERGY, WIND ENERGY, WIND TURBINES, COMPARISON, WIND SPEED.



INDICE DE CONTENIDO

1	CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	15
1.1	OBJETIVOS.....	16
1.1.1	OBJETIVO GENERAL	16
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.2	ENERGÍAS RENOVABLES: LA ENERGÍA EÓLICA.....	17
1.2.1	ANTECEDENTES Y PROPIEDADES	17
1.2.1.1	VELOCIDAD DEL VIENTO.....	18
1.2.1.2	DIRECCIÓN DEL VIENTO.....	19
1.2.1.3	PERFIL VERTICAL DEL VIENTO	20
1.2.1.4	DENSIDAD DE AIRE	21
1.2.2	HISTORIA	22
1.2.3	EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA EÓLICA	24
1.2.4	COMPONENTES DE LOS AEROGENERADORES	27
1.2.5	TIPOS DE AEROGENERADORES.....	28
1.2.5.1	AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL	28
1.2.5.1.1	AEROGENERADOR CON ROTOR SAVONIUS.....	28
1.2.5.1.2	AEROGENERADOR CON ROTOR DARRIEUS.....	29
1.2.5.1.3	AEROGENERADOR CON ROTOR GIROMILL.....	30
1.2.5.1.4	AEROGENERADOR CON ROTOR WINDSIDE.....	31
1.2.5.2	AEROGENERADORES DE EJE HORIZONTAL.....	32
1.2.5.2.1	CLASIFICACIÓN DE AEROGENERADORES DE EJE HORIZONTAL POR NÚMERO DE PALAS	32
1.2.5.2.2	CLASIFICACIÓN DE AEROGENERADORES DE EJE HORIZONTAL POR ORIENTACIÓN RESPECTO A LA DIRECCIÓN DOMINANTE DEL VIENTO.	35
1.2.5.2.3	CLASIFICACIÓN DE AEROGENERADORES DE EJE HORIZONTAL POR EL TIPO DE TORRE UTILIZADA.....	36
1.2.6	SITUACIÓN ACTUAL Y TENDENCIAS FUTURAS.....	38
1.2.6.1	AEROGENERADORES VORTEX.....	40
1.2.6.2	AEROGENERADORES WIND TREE.....	41
1.3	PRODUCCIÓN ENERGÉTICA DE AEROGENERADORES	42



1.4	ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL ECUADOR	43
1.4.1	ANTECEDENTES	43
1.4.2	ACTUALIDAD	47
1.4.2.1	COBERTURA ELÉCTRICA.....	49
1.5	LA ENERGÍA EÓLICA EN EL ECUADOR	50
1.5.1	ZONA ORIENTAL O AMAZÓNICA.....	50
1.5.2	ZONA SIERRA	50
1.5.3	ZONA COSTA.....	50
1.5.4	ISLAS GALÁPAGOS	51
2	CAPÍTULO 2. ENERGÍA EÓLICA A PEQUEÑA ESCALA	55
2.1	LA ENERGÍA EÓLICA A PEQUEÑA ESCALA	55
2.1.1	RANGOS DE LA ENERGÍA EÓLICA A PEQUEÑA ESCALA.....	55
2.2	GENERACIÓN DISTRIBUIDA	56
2.2.1	SISTEMAS EÓLICOS EN GENERACIÓN DISTRIBUIDA	57
2.3	APLICACIONES DE LA ENERGÍA EÓLICA A PEQUEÑA ESCALA	58
2.3.1	CONEXIÓN A LA RED ELÉCTRICA	59
2.3.2	CONEXIÓN AISLADA.....	59
2.3.3	BOMBEO DE AGUA	60
2.3.4	CONEXIÓN A ANTENA DE TELEFONÍA.....	61
2.3.5	APLICACIONES ESPECIALES EN EDIFICACIONES	63
2.3.5.1	BAHRAIN WORLD TRADE CENTER	63
2.3.5.2	TORRE SACYR VALLEHERMOSO, ESPAÑA.....	64
2.3.5.3	PSE-MINIEÓLICA, ESPAÑA.....	64
2.4	LA ENERGÍA EÓLICA A PEQUEÑA ESCALA EN EL MUNDO	65
2.5	LA ENERGÍA EÓLICA A PEQUEÑA ESCALA EN ECUADOR	66
2.5.1	PROYECTOS DE ENERGÍA MINI-EÓLICA EN EL ECUADOR ..	67
2.5.1.1	PROYECTO DE ESTACIÓN METEOROLÓGICA.....	68
2.5.1.2	ESTUDIO EXPLORATORIO DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA Y FOTOVOLTAICA EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO	69
2.5.1.3	SISTEMA HÍBRIDO DEL PULULAHUA.....	70
2.5.1.4	ENERGÍA PARA GARUPAMBA (CUENCA)	70
2.5.1.5	ANÁLISIS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA DE UN MINI- PARQUE EÓLICO	71
2.5.1.6	MINI-PARQUE EÓLICO EN LA GRANJA IRQUIS DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA.....	71



3	CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	72
3.1	MINI-PARQUE EÓLICO EN LA GRANJA IRQUIS DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA	72
3.2	ANEMÓMETRO NRG 40C	73
3.3	VELETA NRG 200P.....	74
3.4	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS AEROGENERADORES .	75
3.4.1	TURBINA EÓLICA ENAIR E70 PRO	75
3.4.2	TURBINA EÓLICA TYD-WT-5000	78
3.5	COMPORTAMIENTO Y POTENCIAL DEL RECURSO EÓLICO EN EL MINI-PARQUE EÓLICO DE LA GRANJA IRQUIS DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA.....	80
4	CAPÍTULO 4. RESULTADOS	85
4.1	PRODUCCIÓN ENERGÉTICA DE AEROGENERADOR ENAIR E70PRO	85
4.1.1	ESTIMACIÓN DE ENERGÍA DE LA TURBINA EÓLICA ENAIR 70PRO UBICADA A 18 METROS DE ALTURA	87
4.1.2	ESTIMACIÓN DE ENERGÍA DE LA TURBINA EÓLICA ENAIR 70PRO UBICADA A 24 METROS DE ALTURA	90
4.2	ESTIMACIÓN ENERGÉTICA DE LA TURBINA EÓLICA TOYODA TYD-WT-5000 UBICADA A 18 METROS DE ALTURA	92
4.3	PRODUCCIÓN TOTAL ESTIMADA DE ENERGÍA DEL MINI-PARQUE EÓLICO DE LA GRANJA IRQUIS DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA....	96
4.4	COBERTURA DEL CONSUMO DE ENERGÍA DE LA GRANJA IRQUIS MEDIANTE LA ENERGÍA PRODUCIDA POR EL MINI-PARQUE EÓLICO	98
5	CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
5.1	CONCLUSIONES GENERALES	102
5.2	RECOMENDACIONES	104
6	ANEXO 1: FICHA TÉCNICA DEL AEROGENERADOR ENAIR 70PRO	104
7	ANEXO 2: FICHA TÉCNICA DEL AEROGENERADOR TOYODA TYD- WT-5000.....	108
8	ANEXO 3: TABLAS DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO MEDIDOS EN LA GRANJA IRQUIS DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA	114
9	ANEXO 4. CURVAS DE LA VELOCIDAD DE VIENTO DE LA GRANJA IRQUIS DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA	126
10	BIBLIOGRAFÍA.....	133



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Altura y rugosidad del terreno	21
Tabla 1.2: Rendimiento global de una instalación eólica	39
Tabla 1.3: Potencia nominal de centrales de generación con fuentes de energía renovable.....	46
Tabla 1.4: Potencia nominal y efectiva por tipo de fuente	48
Tabla 1.5: Centrales eólicas en el Ecuador	51
Tabla 1.6: Potencial eólico - eléctrico estimado para la provincia del Azuay, Ecuador.....	53
Tabla 2.1: Sub-categorías de aerogeneradores a pequeña escala	56
Tabla 4.1: Promedio de energía estimada por el aerogenerador Enair 70PRO a 18m de altura (abril, 2017)	88
Tabla 4.2: Promedio de energía estimada por el aerogenerador Enair 70PRO a 18m de altura (julio, 2017).....	89
Tabla 4.3: Promedio de energía estimada por el aerogenerador Enair 70PRO a 18m de altura (enero, 2018).....	90
Tabla 4.4: Promedio de energía estimada por el aerogenerador Enair 70PRO a 24m de altura (abril, 2017)	91
Tabla 4.5: Promedio de energía estimada por el aerogenerador Enair 70PRO a 24m de altura (julio, 2017).....	91
Tabla 4.6: Promedio de energía estimada por el aerogenerador Enair 70PRO a 24m de altura (enero, 2018)	92
Tabla 4.7: Promedio de energía estimada por el aerogenerador Toyoda TYD-WT-5000 a 18m de altura (abril, 2017).....	94
Tabla 4.8: Promedio de energía estimada por el aerogenerador Toyoda TYD-WT-5000 a 18m de altura (julio, 2017)	95
Tabla 4.9: Promedio de energía estimada por el aerogenerador Toyoda TYD-WT-5000 a 18m de altura (enero, 2018)	96
Tabla 4.10: Resumen energía producida estimada para los diferentes meses	97
Tabla 4.11: Resumen de cargas existentes en la Granja Irquis de la Universidad de Cuenca	99



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Comportamiento del viento debido a la radiación solar en conjunto con el efecto de la fuerza de Coriolis en la circulación atmosférica general. ...	18
Figura 1.2: Anemómetro.....	19
Figura 1.3: Veleta.....	19
Figura 1.4: Influencia del relieve propio de la zona en la velocidad del viento	20
Figura 1.5: Embarcaciones egipcias antiguas para transporte.....	22
Figura 1.6: Máquina eólica persa de bombeo de agua	23
Figura 1.7: Molino de viento de poste (grabado de la época).....	24
Figura 1.8: Bomba hidráulica eólica americana de rotor multipala	25
Figura 1.9: (A): Aerogenerador de Poul la Cour. (B): Turbina eólica de Charles Brush. (C): Aerogenerador Savonius	26
Figura 1.10: Partes principales de un aerogenerador	27
Figura 1.11: Aerogenerador Savonius.....	29
Figura 1.12: Izquierda: Aerogenerador con rotor Darrieus. Derecha: Aplicación de aerogenerador con rotor Darrieus	30
Figura 1.13: Aerogenerador tipo Giromill	31
Figura 1.14: Aerogeneradores con rotor Windside.....	31
Figura 1.15: Aerogenerador monopala.....	32
Figura 1.16: Aerogenerador Bipala	33
Figura 1.17: Aerogenerador Tripala	34
Figura 1.18: Aerogenerador multipala	35
Figura 1.19: Izquierda: Aerogenerador ubicado a barlovento. Derecha: Aerogenerador ubicado a sotavento	36
Figura 1.20: Aerogenerador sobre torre de celosía	37
Figura 1.21: Aerogeneradores sobre torres tubulares.....	38
Figura 1.22: Evolución del tamaño de aerogeneradores.....	39
Figura 1.23: Capacidad total global instalada.....	40
Figura 1.24: Aerogenerador sin hélices Vortex	41
Figura 1.25: Aerogeneradores Wind Tree	41
Figura 1.26: Rendimientos de las principales turbinas eólicas.....	43



Figura 1.27: (A): Producción de energía primaria en Ecuador, 2006. (B):
 Generación de energía eléctrica durante año 2007 44

Figura 1.28: Demanda de potencia en el periodo 2007 -2016 48

Figura 1.29: Evolución de la cobertura eléctrica nacional 49

Figura 1.30: Potencial eólico del Ecuador. 52

Figura 1.31: (A): Proyecto eólico Bartra – Santa Cruz. (B): Proyecto eólico San
 Cristóbal. (C): Proyecto eólico Villonaco. 54

Figura 2.1: Definición de rangos de energía eólica 55

Figura 2.2: Esquema de generación distribuida 57

Figura 2.3: Ejemplo de un sistema híbrido para generación distribuida 58

Figura 2.4: Diagrama básico de un aerogenerador conectado a la red..... 59

Figura 2.5: Diagrama básico de un aerogenerador de conexión aislada 60

Figura 2.6: Diagrama básico de un aerogenerador para bomba de agua 61

Figura 2.7: Diagrama básico de un aerogenerador para conexión con antena62

Figura 2.8: Aerogenerador para alimentación de antena de telefonía..... 62

Figura 2.9: (A): Vista de los tres aerogeneradores que forman parte de la
 edificación. (B): Vista panorámica del edificio 63

Figura 2.10: Instalación micro-parque eólico en la Torre Sacyr 64

Figura 2.11: PSE-Minieólica, España 65

Figura 2.12: Arriba izquierda: Porcentaje del total de unidades instaladas.
 Arriba Derecha: Porcentaje del total de la capacidad instalada. Abajo:
 Capacidad total acumulada instalada por país..... 66

Figura 2.13: Estación WS-1090..... 68

Figura 2.14: Aerogenerador del sistema Pululahua 70

Figura 2.15: Aerogenerador en Garupamba..... 71

Figura 3.1: Aerogeneradores de la Granja Irquis de la Universidad de Cuenca
 73

Figura 3.2: Anemómetro NRG 40C 74

Figura 3.3: Veleta NRG 200P..... 75

Figura 3.4: Turbina eólica ENAIR 70 PRO ubicada en la granja Irquis 76

Figura 3.5: Curva de potencia del Aerogenerador ENAIR E70 PRO..... 77

Figura 3.6: Curva de Energía del Aerogenerador ENAIR E70 PRO..... 77

Figura 3.7: Aerogenerador de eje vertical TYD-WT-5000 en la granja Irquis.. 78

Figura 3.8: Curva de potencia del Aerogenerador Toyoda TYD-Wt-5000..... 79



Figura 3.9: Curva de energía del Aerogenerador Toyoda TYD-Wt-5000	79
Figura 3.10: Curva de velocidad del viento en el mes de abril, 2017	81
Figura 3.11: Curva de velocidad del viento en el mes de julio, 2017	81
Figura 3.12: Curva de velocidad del viento en el mes de enero, 2018.....	82
Figura 3.13: Distribución horaria de la irradiancia solar sin nubes	83
Figura 4.1: Coordenadas de longitud y latitud de la Granja Irquis de la Universidad de Cuenca	86
Figura 4.2: Ubicación de la Granja Irquis de la Universidad de Cuenca en el atlas eólico	86
Figura 4.3: Interfaz de la aplicación de caculo de producción eólica de la empresa Enair.....	87
Figura 4.4: Curva de energía de aerogeneradores de eje horizontal bajo las condiciones de la zona.....	88
Figura 4.5: Curva de energía de aerogenerador de eje vertical bajo las condiciones de la zona.....	94
Figura 4.6: Detalles de consumo de la factura eléctrica (2016).....	100
Figura 4.7: Cobertura de consumo mensual de la granja Irquis.....	101

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Silvio Gabriel Méndez Urgiles en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Análisis técnico del mini-parque eólico de la Universidad de Cuenca: comparación de aerogeneradores de eje horizontal y vertical", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 4 de abril de 2018



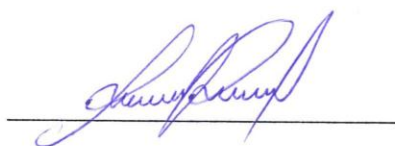
Silvio Gabriel Méndez Urgiles

C.I: 0105729883

Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Silvio Gabriel Méndez Urgiles, autor del trabajo de titulación "Análisis técnico del mini-parque eólico de la Universidad de Cuenca: comparación de aerogeneradores de eje horizontal y vertical", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 4 de abril de 2018



Silvio Gabriel Méndez Urgiles

C.I: 0105729883



AGRADECIMIENTO

Gracias primeramente a Dios, por sus infinitas bendiciones sobre mí.

Gracias de todo corazón a mis padres Silvio y Sonia, por no dejar que la adversidad y las dificultades fueran más grandes que su amor y apoyo, desde el inicio hasta el final de este sueño a punto de convertirse en realidad, por arroparme con su amor, sus consejos, su paciencia, y por ser esos dos pilares que nunca me dejaron caer. Gracias a mi hermano Xavier, por estar ahí siempre, por enseñarme a seguir adelante, por permitir que la tristeza me diera respiros en los momentos más difíciles. A mi hermano (+), que siempre me espera allí donde los sueños son la realidad. A mi hermana Marcia, por enseñarme que la vida necesita esa chispa que nos hace ser feliz, por compartirla conmigo, por darme siempre la calidez de toda esa bondad que lleva dentro, gracias por hacerme sentir como en casa. Gracias muy especiales al integrante más nuevo de la familia, Christian Gabriel, que no ha hecho más que enseñarme la sencillez de la vida, el amor incondicional, y que cada sonrisa suya sea una dosis de amor y fortaleza que llena el alma y alimenta el corazón. Gracias a ti amor, por ser mi apoyo, mi compañera, por brindarme tu cariño, por no dejarme caer, por confiar en mí y enseñarme que los objetivos están para cumplirlos, con amor y determinación.

Gracias a todos mis docentes que han estado presentes en el camino de mi formación académica hasta ahora, pues con cada una de sus enseñanzas han construyendo el camino del conocimiento, pero un agradecimiento especial a mi director, Ing. Juan Leonardo Espinoza, por responder siempre a cada duda, y siempre compartirme sus saberes y consejos, pues sin ellos, no habría podido llegar hasta aquí.



DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado con mucho cariño y especialmente a mis padres Silvio y Sonia, a mis hermanos Xavier y Christian, a mi hermana Marcia, a mi pequeño Christian G., y a Belén P, gracias a cada uno de ustedes, hoy puedo sonreír y ser feliz, y ver como un sueño es más bonito cuando se convierte en realidad.

A todos quienes nunca perdieron su fe en mí, mi familia, mis amigos, a quienes me dieron su apoyo y su consejo, aunque no estén aquí. Este proyecto es dedicado a todos quienes han formado parte de mi vida, y me han ayudado durante todo este camino, pues todos me han dado la fortaleza para seguir adelante y ser una persona de bien.

A mi director, mis docentes, y demás personas que he conocido y me han transmitido su sabiduría, sus consejos, este trabajo es dedicado también a ustedes, por todo ese apoyo brindado.



1 CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La generación de energía eléctrica hoy en día es un aporte fundamental para el desarrollo económico y sustentable de los países. Existen diferentes fuentes de generación de energía, que de manera general se las puede dividir en dos grandes grupos que son: “Energías No Renovables” y “Energías Renovables”. Del segundo conjunto se puede realizar una subdivisión, y decir que dentro de las energías renovables se tienen fuentes convencionales y no convencionales.

En el Ecuador, las dos mayores fuentes de generación de energía eléctrica han sido la hidroelectricidad a gran escala y las energías no renovables, específicamente las centrales de energía térmica a diésel, bunker y, últimamente y en menor medida, gas natural. Sin embargo, con el pasar de los años este panorama ha venido sufriendo cambios, siendo así que el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) desarrolló en el año 2007 y en Mayo del 2008 (Montesdeoca, 2011), los estudios conocidos como “Plan de Soberanía Energética del Ecuador” y “Políticas y Estrategias para el cambio de la Matriz Energética en el Ecuador” respectivamente, siendo éste un punto de partida para que exista una verdadera política de promoción de energías renovables y la eficiencia energética, lo cual supondría un avance importante en los temas de competitividad en el abastecimiento energético, sin dejar de lado los aspectos sociales y medioambientales. Sin embargo, para el país, dichos avances han enfrentado importantes barreras tales como la gran inversión inicial, falta de información, limitación en los aspectos tecnológicos, políticas, leyes, tarifas, entre otros aspectos.

Entre las energías renovables no convencionales que han merecido atención del estado ecuatoriano, se destacan la solar fotovoltaica, la biomasa/biogás, geotermia y la energía eólica, misma que ya cuenta desde hace algunos años con proyectos operativos tanto en la provincia insular de Galápagos como en el continente.

La energía renovable, tanto convencional (hidroelectricidad a gran escala) como no convencional, adquiere importancia por la necesidad de suministrar la energía necesaria para cubrir la creciente demanda de electricidad en el país. No obstante, cualquier tipo de energía presenta sus complicaciones, y una de las dificultades más importantes de las energías convencionales no renovables, donde el suministro de combustible para la central termoeléctrica puede ser totalmente controlado. Adicionalmente, se debe tomar en cuenta que dentro de una región específica, los cambios del comportamiento del recurso eólico presentan variaciones cada vez en menor escala debido a las condiciones geográficas propias del lugar, es decir, vendrán determinados por factores tales



como cercanías al mar, la extensión del terreno, presencia de montañas, vegetación, construcciones y demás (Rudnick, 2010). Estas pequeñas variaciones específicas demuestran que la intensidad del viento puede variar dentro de ciertos rangos de tiempo, motivo por el cual es difícil predecir con seguridad y precisión el desempeño del recurso a largo plazo. Por ejemplo, en un estudio realizado en Dinamarca en el año 2003, los datos revelan que este tipo de variación está en torno al 9 o 10% (Danish Wind Industry Association, n.d.).

En el presente trabajo, se busca realizar un estudio de los tres aerogeneradores ubicados la Granja Irquis de la Universidad de Cuenca, donde a partir de la ubicación y características propias de cada uno de ellos (altura, tipo de eje), así como de las mediciones a ser realizadas, se busca determinar cuál de los aerogeneradores instalados presenta el mejor rendimiento, sometido a las características propias del recurso de la zona, es decir el viento del lugar. Dicha información acerca de los perfiles de viento ha sido obtenidos de manera directa de la zona donde los aerogeneradores están instalados, con lo cual, se tiene la ventaja de trabajar con una fuente de información primaria y específica del lugar. Esto dará una mayor certeza de los estudios que se van a realizar para cumplir el objetivo final del proyecto, y principalmente trabajar sobre un escenario que no ha sido considerado en investigaciones anteriores, esto es en la zona andina ecuatoriana a más de 2500 m.s.n.m. (metros sobre el nivel del mar), sabiendo que el proyecto más emblemático en el Ecuador de energía eólica (Villonaco), ubicado en Loja tiene una elevación de 2060 m.s.n.m. Los resultados obtenidos pueden servir de base para la comparación con estudios que se realicen en el futuro tanto en Ecuador como en otros países.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GENERAL

Comparar la producción de energía y el rendimiento de los tres aerogeneradores que conforman el mini-parque eólico de la Universidad de Cuenca (campus Irquis).

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Evaluar el potencial eólico existente en la zona.
2. Evaluar las principales características técnicas de los aerogeneradores.
3. Determinar las variables que afectan el comportamiento del mini-parque eólico.
4. Estimar la producción energética de cada aerogenerador, bajo las condiciones existentes en el sitio.



1.2 ENERGÍAS RENOVABLES: LA ENERGÍA EÓLICA

1.2.1 ANTECEDENTES Y PROPIEDADES

Al hablar de energía eólica, es necesario comprender que la misma es un derivado de la energía solar. Esto es debido a que su origen se presenta en el calentamiento que la tierra recibe del sol, la misma que no se distribuye de una manera similar a lo largo del planeta, pues en ciertos puntos los rayos solares incidirán de manera perpendicular en el planeta produciendo un efecto de insolación, mientras que en otros los rayos incidirán de manera oblicua (como en los polos), produciendo un calentamiento mucho menor. La Tierra recibe $1,74 \times 10^{14}$ kW de potencia del sol (Uclm, 2011), sin embargo solo alrededor del 1 al 2% de esta energía es convertida en energía eólica. Al producirse el calentamiento desigual de la superficie, la energía térmica se convierte en energía cinética, la cual posteriormente producirá una transferencia de calor entre las zonas más calientes hacia las más frías. Con lo dicho, algunos autores enuncian que “la energía eólica es la energía cinética del viento”, (González, Pérez, Santos, & Gil, 2009) o en el aire en movimiento.

Estas diferencias en las zonas térmicas, provoca la aparición de diferentes densidades en las masas de aire. Así, las zonas ubicadas en el ecuador al calentarse mayormente, el aire tiene una característica más ligera, lo cual significa un aire menos denso, el cual al ascender a las capas altas de la atmósfera deja tras su paso una zona de baja presión. En los polos donde el calentamiento es mucho menor, el aire tiene mayor densidad, o más pesado; el cual desciende aumentando la presión, y como cualquier gas que se encuentra en la tierra, el aire se mueve entre las zonas de mayor presión atmosférica, es decir de mayor densidad hacia las de menos presión o densidad.

Junto al calentamiento terrestre y el movimiento del aire hacia las diferentes zonas de presión, es importante tener en cuenta que siempre durante el proceso está involucrado también la rotación de la Tierra, la cual es constante y ayuda a mantener la fluctuación del aire en el planeta. Este movimiento rotacional produce fuerzas a las cuales se las ha denominado como las fuerzas de Coriolis. Dichas fuerzas son las responsables de que, al actuar sobre la masa de aire en movimiento, las desvían hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur. Adicionalmente, dan lugar a la creación de los denominados vientos de poniente (del oeste) y alisios (del este). Siendo así, el ciclo de movimiento de aire en cada hemisferio se descompone en tres ciclos independientes, como se observa en la Figura 1.1; teniendo en cuenta que dichos movimientos son en un escenario donde no existe los continentes o estaciones del año.

Otra definición, desde la perspectiva de la meteorología, definen al viento como el movimiento vertical, horizontal o paralelo a la superficie del terreno de una masa de aire producida en la atmósfera por causas naturales. Una vez presentada la definición de lo que es el viento, es necesario conocer algunas de sus propiedades; algunas de las cuales, y las más importantes para la generación de energía son:

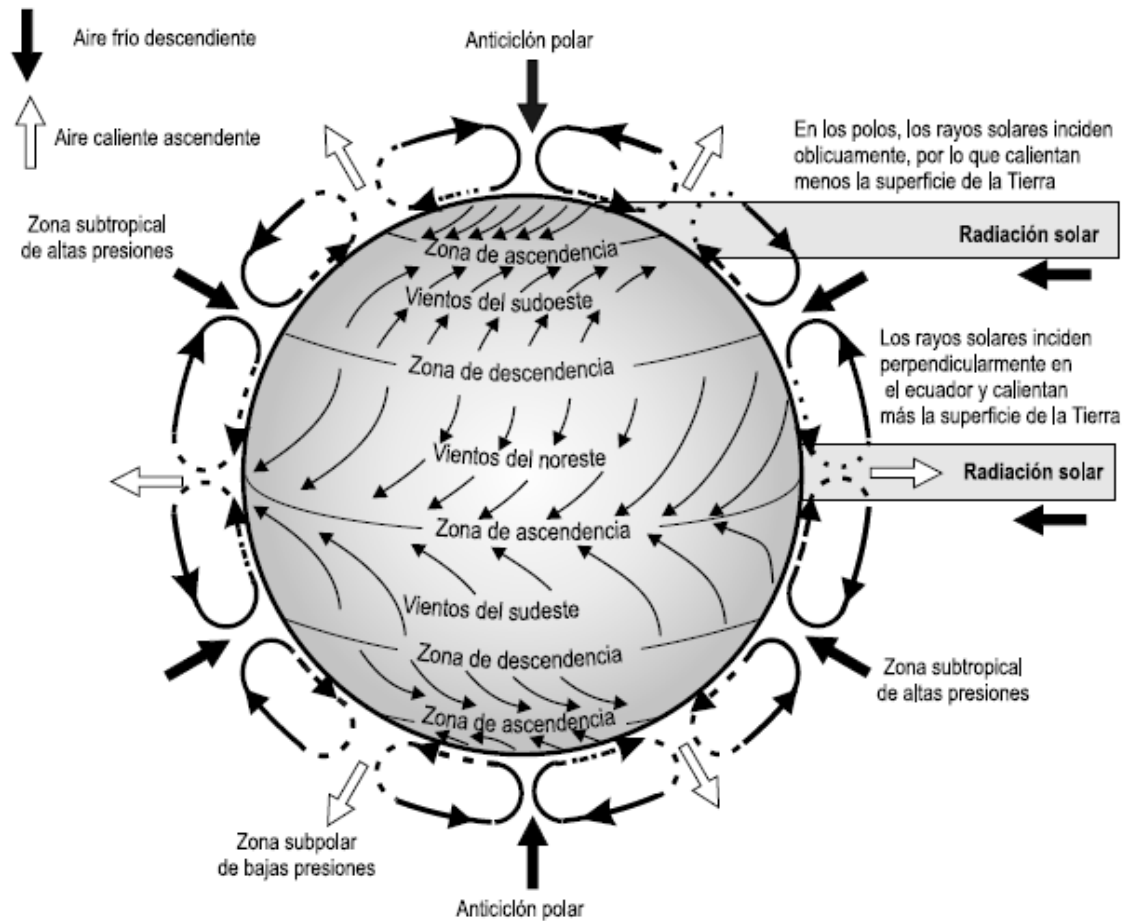


Figura 1.1: Comportamiento del viento debido a la radiación solar en conjunto con el efecto de la fuerza de Coriolis en la circulación atmosférica general.

Fuente: Centrales de energías renovables (González et al., 2009)

1.2.1.1 VELOCIDAD DEL VIENTO

Medida de movimiento del aire con respecto a la superficie de la Tierra que cubre una unidad de distancia sobre una unidad de tiempo. Sus unidades de medida son: *m/s* (metros por segundo), *km/h* (kilómetros por hora) los pertenecientes al sistema internacional de medida (SI); mientras que en el sistema anglosajón se presentan los *ft/s* (pies por segundo), *mi/h* (millas por hora). El instrumento de medición para velocidad del viento se lo denomina anemómetro (ver Figura 1.2). El anemómetro está formado por cazoletas unidas a un eje central cuyo giro, proporcional a la velocidad del viento, es registrado convenientemente en señales de pulso, para ser registrados.



Figura 1.2: Anemómetro

Fuente: www.pce-instruments.com

1.2.1.2 DIRECCIÓN DEL VIENTO

Es el indicador sobre la orientación de la proveniencia del viento. Su referencia se la realiza mediante el uso de sistemas cartesianos (polares o rectangulares), o en función de la circunferencia en grados. Sin embargo, para los propósitos de uso del viento para la generación de energía eólica, se prefiere el uso de instrumentos de medición, mismos que son conocidos como veletas (Figura 1.3). Las veletas dan lectura de la dirección del viento mediante la posición de un potenciómetro, el cual al ser almacenado se lo convierte en una medida en grados normalmente.



Figura 1.3: Veleta

Fuente: Stefan Kühn

1.2.1.3 PERFIL VERTICAL DEL VIENTO

Esta característica se refiere a la velocidad de viento en relación con la altura sobre el suelo y se puede visualizar en un gráfico cartesiano. Esta característica puede dar información importante acerca de cómo la velocidad del viento puede crecer o decrecer dependiendo de la altura a la que se realice la medición. Sin embargo, un vistazo general del tema demuestra que, a bajas alturas, el comportamiento del viento es muy irregular debido a la influencia de todo lo existente en el terreno, es decir su orografía, con la presencia de árboles, montañas, construcciones, y demás que influyen en el viento consiguiendo con ello que la velocidad disminuya. Se considera como bajas alturas a aquellas menores de doscientos metros (<200m) (Vaca S. & Jara J., 2015) en tanto que, para alturas superiores los porcentajes son mayores y de mejor porcentaje en su perfil. La Figura 1.4 muestra la influencia del relieve en una zona donde existe viento.

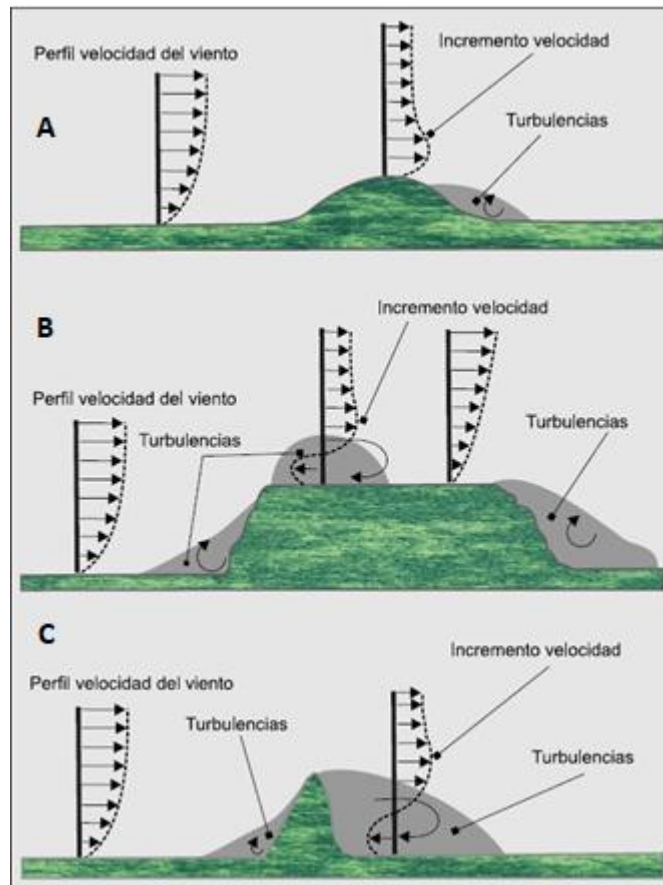


Figura 1.4: Influencia del relieve propio de la zona en la velocidad del viento

Fuente: (González et al., 2009)

El caso A presenta el relieve más beneficioso, pues la característica redondeada con pendientes suaves tiene efectos aceleradores en la velocidad del viento, y aunque existe cambios de dirección del viento ocasionados por las turbulencias, en el caso A, es menor que en los demás. El caso B y C presentan los relieves más desfavorables para, pues siendo bruscos y con



pendientes mayores a los 30, producen grandes turbulencias que terminan en cambios de dirección del viento, lo que conlleva una reducción de energía capturada por los aerogeneradores, que adicionalmente la presencia de éstas daña a las máquinas aerogeneradoras.

Expresado de manera matemática, la influencia del relieve en una zona se ve expresada en la ecuación (1):

$$V_2 = V_1 \frac{\ln(h_2/z_0)}{\ln(h_1/z_0)} \quad (1)$$

Donde:

h_1 : Altura inicial (m)

h_2 : Altura final (m)

V_1 : Velocidad de aire para una altura h_1 (m/s)

V_2 : Velocidad de aire para una altura h_2 (m/s)

z_0 : Coeficiente que depende de la altura y rugosidad del terreno. Dado por la Tabla 1.1. (m)

Tabla 1.1: Altura y rugosidad del terreno

Fuente: Apuntes de clase – Energías Renovables No Convencionales (2017)

CLASE	DESCRIPCIÓN DEL TERRENO	z_0 [m]
1	Agua, un alcance de 5km mínimo	0,0002
2	Planos de lodo, nieve, sin vegetación, sin obstáculos	0,005
3	Abiertos y planos, hierba, algunos obstáculos aislados	0,03
4	Cultivos bajos, obstáculos grandes ocasionales, $x/h > 20$	0,10
5	Cultivos altos, obstáculos muy dispersos, $15 < x/h < 20$	0,25
6	Área de parques, arbustos, muchos obstáculos, $x/h = 10$	0,5
7	Cobertura regular de grandes obstáculos (suburbios, busques)	1
8	Centro de la ciudad con construcciones altas y bajas	>1
x = dimensión horizontal del obstáculo (largo/ancho)		
h = altura del obstáculo (m)		

1.2.1.4 DENSIDAD DE AIRE

La densidad del aire depende de algunas características como temperatura y presión. Este parámetro es uno de los más importantes para los propósitos de uso de la energía eólica, puesto que, a mayor densidad, mayor energía del viento.

Se observa como el viento tiene varias características especiales lo que hace complicado entender su comportamiento, pues no presenta una conducta continua o similar en todo momento. Otro factor importante a tomar en cuenta es la escala y ubicación del proyecto eólico, que para el presente estudio se

trata de un mini-parque (15 kW de potencia) ubicado en la región andina del sur del Ecuador, en donde todas las medidas requeridas serán extraídas directamente del lugar. Esta investigación es pionera en el uso y comparación de generación de energía eólica a pequeña escala pues, hasta lo que conoce el autor, no se han realizado estudios de este tipo en la región andina.

1.2.2 HISTORIA

La historia sobre el uso del viento se remonta hasta alrededor de 5000 años de antigüedad, donde se ha podido observar dibujos que muestran naves (barcos) con velas utilizadas por los egipcios para trasladarse por el Nilo (Moragues & Rapallini, 2003), razón por la cual, se presume que el primer uso que se le dio al viento fue para la locomoción (Figura 1.5).



Figura 1.5: Embarcaciones egipcias antiguas para transporte.

Fuente: barcelonaworldrace.org

Sin embargo, en países como China, Grecia y Egipto se suponen los primeros usos de la energía eólica para actividades agrícolas. Otras teorías dicen que fueron los persas (territorio actualmente ocupado por Irán), los primeros que le dieron uso a la energía eólica en forma masiva, usándolos en molinos destinados a la molienda de granos y al regadío de agua en sus tierras. Al pasar del tiempo, la producción agrícola iba creciendo, y con ello la necesidad de mayor potencia de trabajo de las máquinas; sin embargo, a mayor necesidad de potencia no se construían unas de mayor tamaño, en lugar de ello se creaban mayor número de unidades (Figura 1.6).

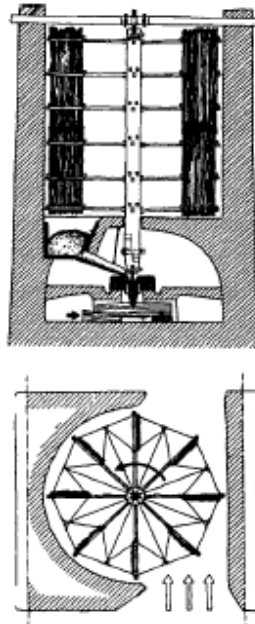


Figura 1.6: Máquina eólica persa de bombeo de agua

Fuente Lecuona Neumann, 2002

Posteriormente, los molinos de viento ayudaron a Holanda a convertirse en uno de los países más industrializados en el siglo XVI (Raja & Dwivedi, n.d.). Siendo ese el hito que marca el inicio de uso de los molinos y el aprovechamiento del viento para impulsar el trabajo, el análisis para la evolución reciente de la energía eólica, se remonta a la época de la revolución industrial. Sin embargo, cuándo se presenta realmente el interés por los gobiernos, de manera primordial los europeos, por desarrollar la energía eólica a gran escala y fue gracias a la crisis de la energía convencional en la década de los 1970s (González et al., 2009), con el embargo petrolero a occidente por parte de los países productores árabes. Adicionalmente, luego de la segunda guerra mundial hubo un salto notable en los precios del combustible, y un avance notable en la eficiencia y accesibilidad a turbinas eólicas. Por ejemplo la baja en el costo por kWh en las turbinas eólicas con relación a la de los combustibles fósiles, de 13¢/kWh a 5¢/kWh (Barnett & Bjornsgaard, 2000).

Aunque la mayoría de la historia se refiere a que los primeros molinos fueron de eje vertical, los cuales se remontan al siglo XIII, los molinos de eje horizontal tienen referencias que ubican sus inicios en el siglo XII. Si bien su origen histórico no es del todo conocido, hay quienes los relacionan como un derivado de los molinos persas (Lecuona Neumann, 2002). Con este tipo de molinos (eje horizontal), vienen nuevas complicaciones a resolver, pues requieren un mecanismo de orientación para encarar el rotor o turbina al viento, lo cual hace que la fabricación de estos sea más complicada en comparación con los de eje vertical. En contraste, se presentaba una gran ventaja con los ejes horizontales y es que se podía obtener de ellos mayor potencia que con la otra tecnología, esto debido a una interacción continua con la presión de la corriente del aire sobre las aspas. Un vistazo a este tipo de molino se presenta en la Figura 1.7.



Figura 1.7: Molino de viento de poste (grabado de la época)

Fuente: Lecuona Neumann, 2002

1.2.3 EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA EÓLICA

Las mejoras de los molinos se han venido dando periódicamente desde la antigüedad. Así, durante el siglo XIV, se consiguió que el molino girara solo su parte superior, y dicho movimiento incluía también al rotor, por lo que lo demás de la construcción era fija en forma de torre hecha de piedras o ladrillos. Dicha innovación supondría un avance muy grande puesto a que gracias a ello las aspas del molino se las podía colocar de tal manera que siempre estén del lado barlovento, que sería el primer sistema de orientación aunque de manera manual (Lecuona Neumann, 2002). Partiendo de este hito, se innovó y se hizo uso del denominado molino de cola, el cual en la antigüedad resultó ser el mecanismo más efectivo en ese tiempo; el diseño se lo atribuye a Daniel Halladay en el año de 1854. Se trataba de un eje horizontal provisto de aspas de tamaño menor y a las cuales se les orientaba de manera perpendicular a las aspas principales, con esto se lograba que el rotor de potencia esté encarado al viento, y el rotor de direccionamiento permanecería estacionario al recibir el viento lateralmente. No obstante, ante un cambio de dirección del viento el molino giraría transmitiendo la rotación por medio de un sistema de engranajes al eje vertical de la orientación, logrando con ello el correcto encaramiento al viento, y dejando de girar en ese momento. Este sería uno de los sistemas que inspirarían a la tecnología usada en la actualidad (Lecuona Neumann, 2002).

Durante la revolución industrial (siglo XIX), se dio la aparición de los motores térmicos, que se los encontraba en las máquinas de vapor, y en los motores de combustión interna, lo que hizo que la tecnología basada en la energía eólica se viera desplazada de gran manera, por lo que se restringió solo a zonas rurales, en lugares muy remotos o en los que existía cierto nivel de pobreza, donde su principal aplicación continuó siendo la de sus inicios, la molienda y el regadío (Lecuona Neumann, 2002). Frente a dicho alejamiento de la tecnología

eólica, se vio la necesidad de innovaciones de los modelos y la tecnología, y dentro de ello uno de los aspectos más importantes a destacar es la aparición de las turbinas multipala americana (Figura 1.8), la cual causó un impacto positivo por lo que se propagó rápidamente por todo el país estadounidense (Lecuona Neumann, 2002).

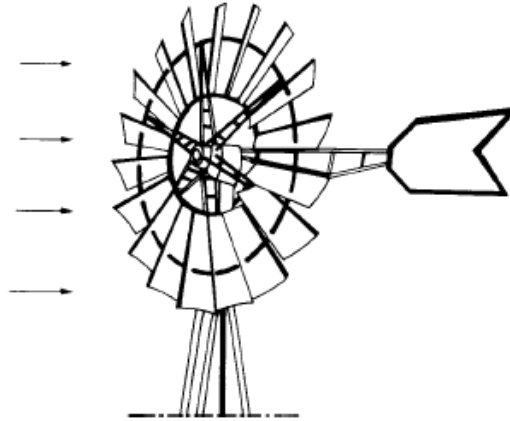


Figura 1.8: Bomba hidráulica eólica americana de rotor multipala

Fuente: Lecuona Neumann, 2002

Otros años que marcaron acontecimientos importantes relacionados al desarrollo de la tecnología eólica son:

1888: Charle F. Brush construye lo que hoy en día se considera la primera turbina eólica de funcionamiento automático destinada a la generación de energía; es decir, el denominado aerogenerador. Era de gran tamaño (17m con 144 palas en cedro) con una capacidad de 12kW (Ammonit, 2017).

1892: En Dinamarca, considerado uno de los países con grandes recursos eólicos, en dicho país el profesor Poul la Cour más diseñó el primer aerogenerador eléctrico bajo los auspicios de un programa estatal. Se rompe la ligadura entre las turbinas eólicas con la molienda y el regadío. Se instalan 120 aerogeneradores de 25kW de potencia. (Lecuona Neumann, 2002)

1918: Alrededor de 120 empresas públicas locales en Dinamarca poseen un aerogenerador entre 20 a 35kW basados en el diseño de Poul la Cour. (Uclm, 2011)

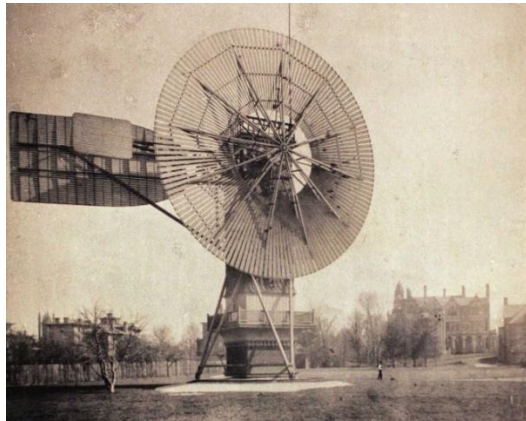
1919: El físico Alemán Albert Betz publica la denominada ley de Betz (o límite de Betz), el cual expresa que existe una potencia máxima de extracción de energía del viento, sin importar el diseño que pudiera tener el aerogenerador. Dicho límite es el 16/27 (59,3%) de la energía cinética del viento.

1924: Savonius desarrolla una aeroturbina de eje vertical que consistía en dos semicilindros huecos. Sus características eran bajo par de arranque, pero con un bajo porcentaje de rendimiento. (Torroglosa, 2013)

1927: Adrianus. J Dekker construye el primer rotor con palas de sección aerodinámica el cual mejora notablemente la velocidad que tradicionalmente era de 2 a 3 hasta conseguir de 4 a 5 veces la velocidad del viento incidente.

A raíz de estas innovaciones se tuvieron que ir mejorando y solucionando problemas referentes a vibraciones mecánicas en la estructura como en las palas, corrosión y otros.

En general, como se mencionó previamente, el desarrollo de la energía eólica y su aprovechamiento están ligados de manera muy estrecha a la década de los 1970s al presentarse la crisis de energía convencional y despertarse el interés de distintos gobiernos especialmente europeos. (González et al., 2009).



A



B



C

Figura 1.9: (A): Aerogenerador de Poul la Cour. (B): Turbina eólica de Charles Brush. (C): Aerogenerador Savonius

Fuente: Danish Wind Industry Association, 2013; Western Reserve Historical Society; Torroglosa, 2013

1.2.4 COMPONENTES DE LOS AEROGENERADORES

El siglo XX representa, de cierta manera, una línea que marca el avance en las evoluciones del diseño de los aerogeneradores, puesto que a partir de la segunda mitad de este siglo los cambios que presentan son muy pequeños, siendo así que se sienta un tipo fijo en cuanto a los componentes que forman parte de un aerogenerador. Dichos componentes son denominados subsistemas, los cuales se han separado con el objetivo de analizar paso a paso el aprovechamiento y el funcionamiento de los aerogeneradores. Una clasificación general de los subsistemas son los siguientes (González et al., 2009):

- Subsistema de captación.
- Subsistema de transmisión mecánica.
- Subsistema de generación eléctrica.
- Subsistema de orientación.
- Subsistema de regulación y control.
- Subsistema de soporte.

Cada una de las partes unidas forman el sistema aerogenerador, y el análisis individual de cada subsistema representará y denotará la eficiencia y la calidad de la máquina.

Una vez que se los subsistemas se vuelven un solo conjunto, este sistema puede llegar a tener alturas de hasta 200 metros con un peso hasta de 20 toneladas (Portillo, 2017). En general, las partes principales de un aerogenerador se las puede ver en la Figura 1.10:

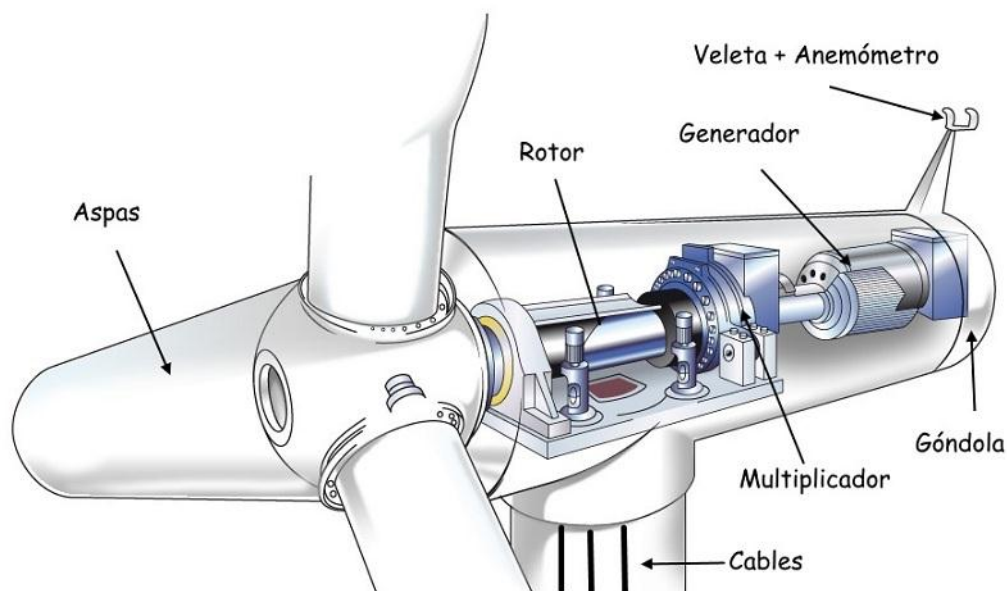


Figura 1.10: Partes principales de un aerogenerador

Fuente: www.renovablesverdes.com



En la Figura 1.10, las aspas son también conocidas como “palas”, las mismas representan una parte muy importante dentro de los aerogeneradores puesto a que, con ellas, se puede realizar la clasificación o tipos de aerogeneradores que se verá a continuación.

1.2.5 TIPOS DE AEROGENERADORES

Dentro de los subsistemas pertenecientes a los aerogeneradores, y específicamente en el subsistema de captación, básicamente se encuentra el rotor, mismo que está constituido por las palas (aspas) y el buje. En función de la posición del eje de giro del rotor se puede realizar una primera clasificación de las máquinas aerogeneradoras, siendo estas las de eje vertical y las de eje horizontal. Dentro de las segundas, se puede realizar otra clasificación adicional, dependiendo del número de palas.

1.2.5.1 AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL

Los aerogeneradores (o denominados comúnmente molinos) de eje vertical, son aquellos cuyos ejes principales están ubicados de forma perpendicular al suelo. Este tipo de aerogeneradores han presentado desde el inicio ciertas ventajas, entre ellas se puede mencionar el hecho de la no dependencia de un sistema de orientación, esto debido a que es omnidireccional, y adicionalmente algunas de sus partes (generador, multiplicador, etc.) son o pueden ser instalados a ras del suelo, representando un ahorro económico en lo que refiere a costos de montaje de la máquina, al mismo tiempo que se facilita el mantenimiento de la misma. Sin embargo, pues dentro de las tareas de mantenimiento, cuando son requeridas, es necesario realizar un desmontaje total del aerogenerador. Otro punto en contra, y el más grande está dentro del tema de la generación eléctrica en sí mismo, es su menor producción energética, y con ello, su baja eficiencia. En otras palabras, para una misma potencia instalada, la energía que produce un aerogenerador de eje vertical es menor a la que produce uno de eje horizontal bajo las mismas condiciones. Otra desventaja necesaria de mencionar es la necesidad de la instalación de un motor para el arranque de la máquina.

Una vez visto de manera general lo referente a los aerogeneradores de eje vertical, se los puede subdividir en los siguientes tipos:

1.2.5.1.1 AEROGENERADOR CON ROTOR SAVONIUS

Consiste en dos cilindros huecos desplazados respecto a su eje, a través de los cuales se desplaza el aire (Figura 1.11). No son muy usados para fines de generación eléctrica debido a que presentan elevada resistencia al aire. Sin embargo, son económicos y de fácil de construcción por lo que son mayormente usados para fines de aplicaciones mecánicas.



Figura 1.11: Aerogenerador Savonius

Fuente: <https://patribeacora.wordpress.com/energia-eolica/aerogeneradores/tipos-de-aerogeneradores/>

1.2.5.1.2 AEROGENERADOR CON ROTOR DARRIEUS

Este tipo de aerogenerador de eje vertical es el más utilizado y el que más éxito ha tenido en el marco comercial. Su estructura consta de un eje vertical asentado sobre el rotor, con dos o más palas en curva, normalmente finas, que se unen al eje por los dos extremos de manera simétrica (Figura 1.12). Una de las ventajas de este tipo de aerogenerador es que evita la complejidad en el diseño para las palas, y con lo cual se consigue mayores velocidades que con las Savonius, pero sigue necesitando de un sistema externo para su arranque. Adicionalmente a pesar de las ventajas presentadas, no logra alcanzar la eficiencia de generación que presentan los aerogeneradores de eje horizontal (Opex Energy, 2017).



Figura 1.12: Izquierda: Aerogenerador con rotor Darrieus. Derecha: Aplicación de aerogenerador con rotor Darrieus

Fuente: REUK.co.uk; Los Aerogeneradores y el Medio Ambiente – ecovive.com

1.2.5.1.3 AEROGENERADOR CON ROTOR GIROMILL

Estos aerogeneradores son parte de la familia de los Darrieus, su patente le pertenece a la misma persona G. J. M. Darrieus. La diferencia con los anteriores es que las palas de estos aerogeneradores están unidas al eje mediante un sistema de brazos horizontales salientes cercanos a los extremos o inclusive desde la mitad de la pala. La ventaja que presentan estas máquinas es el cambio de orientación de las palas en relación al giro del rotor para tener un mayor aprovechamiento de la fuerza del viento. Normalmente ofrece un rango de suministro de 10 a 20 kW (Portillo, 2017).



Figura 1.13: Aerogenerador tipo Giomill

Fuente: <http://www.teknikicerik.com>

1.2.5.1.4 AEROGENERADOR CON ROTOR WINDSIDE

Este tipo de aerogenerador tiene similitud con el de rotor Savonius. Presenta la diferencia en que, en lugar de tener una estructura cilíndrica, tiene un perfil alabeado con torsión que asciende por el eje vertical. La diferencia en su estructura estilo aerodinámico hace que de alguna manera se acerque a las eficiencias que se obtienen con los aerogeneradores de eje horizontal (Opex Energy, 2017).



Figura 1.14: Aerogeneradores con rotor Windside

Fuente: <http://www.archiexpo.com>

1.2.5.2 AEROGENERADORES DE EJE HORIZONTAL

Los aerogeneradores de eje horizontal son los más usados en la práctica, esto viene dado debido a varias razones, de las cuales se puede mencionar que tiene un rendimiento mayor en comparación con los de eje vertical. Esto se debe a que pueden alcanzar mayores velocidades de rotación y sumado a ello la posibilidad de ubicarlas en mayores alturas lo cual ayuda a que tenga una mejor captación del recurso eólico, por lo tanto, mayor velocidad de viento.

Respecto a los aerogeneradores de eje horizontal, se puede clasificar de varias maneras, tales como: número de palas, orientación respecto a la dirección dominante del viento y por el tipo de torre utilizada (Opex Energy, 2017).

1.2.5.2.1 CLASIFICACIÓN DE AEROGENERADORES DE EJE HORIZONTAL POR NÚMERO DE PALAS

1.2.5.2.1.1 AEROGENERADOR MONOPALA

Este tipo de aerogeneradores son muy poco usados, debido a los problemas que presenta. Entre ellos se puede mencionar la necesidad de una mayor velocidad de viento para lograr el giro de la pala, lo cual hace que la máquina realice un esfuerzo más grande, desencadenando en una reducción notable de su vida útil. Adicionalmente se puede mencionar la existencia de contaminación acústica debido al ruido que provocan (ECOVIVE, 2016). Se puede ver este tipo de aerogenerador en la Figura 1.15.



Figura 1.15: Aerogenerador monopala

Fuente: ecovive.com

1.2.5.2.1.2 AEROGENERADOR BIPALA

Como su nombre lo expresa, estos aerogeneradores presentan dos palas (Figura 1.16), y por ello hacen necesario un diseño más complejo que otros. A diferencia de los aerogeneradores monopala, estos son menos costosos y menos pesados. Sin embargo, sigue existiendo la necesidad de una velocidad de giro alta para producir la energía de salida suficiente (ECOVIVE, 2016).



Figura 1.16: Aerogenerador Bipala

Fuente: <http://energiaeolicaparatodoslospublicos.blogspot.com/>

1.2.5.2.1.3 AEROGENERADOR TRIPALA

En la actualidad, es el aerogenerador más utilizado y más comercial. Este “diseño danés” es el dominante en el mercado. Como su nombre lo expresa, consta de tres palas (Figura 1.17), distribuidas de tal manera que tienen una separación de 120 grados entre cada una. Con el avance de la tecnología se tiene ahora motores eléctricos adicionales que sirven para proveer un mecanismo de orientación que dependerá de la velocidad y dirección del viento. Se estima que con un aerogenerador tripala se alcanza un 4% más de rendimiento que una bipala, e incluso un 10% más que un monopala (ECOVIVE, 2016), siendo por ello que es el más aceptado.



Figura 1.17: Aerogenerador Tripala

Fuente: www.xatakaciencia.com

1.2.5.2.1.4 AEROGENERADORES MULTIPALAS

En general, los fabricantes de aerogeneradores evitan en lo posible construir máquinas con números de palas mayores a tres. La razón de ello es que al poseer mayor número de palas empiezan a surgir problemas tales como el aumento del peso de la máquina, estabilidad en la turbina, etc. Otro de los grandes inconvenientes es que los modelos multipalas no se usan en general para la producción de energía eléctrica, sino que normalmente se los usa con fines mecánicos tales como el bombeo de agua, entre otros. Entre las ventajas que estos aerogeneradores presentan se menciona que son indicadas para zonas donde no se cuenta con vientos fuertes, además de que son a comparación de los anteriores, más silenciosos. Un ejemplo de este tipo de aerogenerador se presenta en la Figura 1.18.



Figura 1.18: Aerogenerador multipala

Fuente: ecovive.com

1.2.5.2.2 CLASIFICACIÓN DE AEROGENERADORES DE EJE HORIZONTAL POR ORIENTACIÓN RESPECTO A LA DIRECCIÓN DOMINANTE DEL VIENTO.

1.2.5.2.2.1 AEROGENERADORES ORIENTADOS A BARLOVENTO

Son aquellos aerogeneradores que están ubicados de tal manera que el rotor se encuentra con enfoque directo o de frente a la dirección dominante del viento, consiguiendo con ello aprovechar de mejor manera la fuerza del mismo. Este tipo de máquinas requieren un mecanismo de orientación al estar expuesto de manera directa. Los aerogeneradores tripala ubicados a barlovento son los más utilizados para los diseños de uso de energía eólica (Opex Energy, 2017).

1.2.5.2.2.2 AEROGENERADORES ORIENTADOS A SOTAVENTO

Estos aerogeneradores son aquellos cuyo rotor se encuentra ubicado en sentido contrario al de la dirección del viento dominante. En teoría, no necesitarían un mecanismo de orientación automática puesto que es el mismo viento el que ubica u orienta a la góndola. Sin embargo, suele instalarse dichos mecanismos como una herramienta de protección y seguridad de la máquina.

La Figura 1.19 muestra un esquema de estos dos tipos de aerogeneradores.

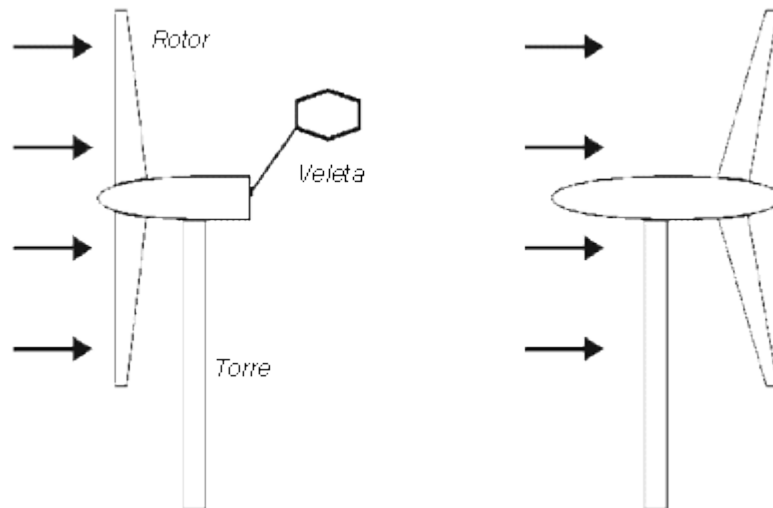


Figura 1.19: Izquierda: Aerogenerador ubicado a barlovento. Derecha: Aerogenerador ubicado a sotavento

Fuente: www.cubasolar.cu

1.2.5.2.3 CLASIFICACIÓN DE AEROGENERADORES DE EJE HORIZONTAL POR EL TIPO DE TORRE UTILIZADA

1.2.5.2.3.1 AEROGENERADORES SOBRE TORRES DE CELOSÍA

Su construcción se la realiza mediante perfiles de acero unidos mediante tornillos (Figura 1.20). Económicamente estas torres son de bajo costo y con facilidad de construcción, sin embargo, deben estar sometidas a verificaciones periódicas para asegurarse de que las sujeciones de la estructura sea la correcta. Para tener acceso a la góndola se sube mediante una escalerilla exterior, lo cual presenta grandes riesgos para el personal, especialmente en tiempos de gran viento (Opex Energy, 2017).



Figura 1.20: Aerogenerador sobre torre de celosía

Fuente: <https://m.forocoche.com/foro/showthread.php?t=879190&page=2>

1.2.5.2.3.2 AEROGENERADORES SOBRE TORRES TUBULARES

Estas torres son grandes tubos de acero en forma cónica o tubular (Figura 1.21), las cuales presenta la ventaja que en su interior ofrece el espacio necesario para el acceso de los equipos terrestres y adicionalmente escaleras de acceso a la góndola. Sus desventajas se presentan básicamente en que su instalación a diferencia de las anteriores es más complicada y económicamente más caras, sin embargo, por su robustez ofrecen mayor resistencia y por lo tanto menos mantenimiento requerida por la torre. Por todo ello hacen que estas estructuras sean las más utilizadas.



Figura 1.21: Aerogeneradores sobre torres tubulares

Fuente: www.andina.com.pe

1.2.6 SITUACIÓN ACTUAL Y TENDENCIAS FUTURAS

Con el paso de los años, se han venido construyendo aerogeneradores cada vez más grandes con el fin de obtener mayor potencia y ubicarlos en mayores alturas donde se cuenta con velocidades de viento superiores. Los sistemas de control y movimiento se han venido automatizando con el avance de la tecnología, de tal manera que la mayoría de las acciones se las realiza de manera automática, tanto en control de velocidad como de posición, respetando los límites de generación para movimiento de las aspas al encontrarse con mayor o menor cantidad de viento, para acelerarlo o dejar de interactuar con el viento de ser necesario al llegar a los límites permisibles. Un vistazo general a la evolución del tamaño de los aerogeneradores se lo puede apreciar en la Figura 1.22:



Figura 1.22: Evolución del tamaño de aerogeneradores

Fuente: <https://metode.es/revistas-metode/monograficos/el-exito-del-viento.html>

Es importante tener en cuenta que, si bien anteriormente se expresó que, según aspectos ideales, la eficiencia de un aerogenerador estaría dentro del 60%, no se tiene en cuenta aspectos relacionados a los rendimientos de las hélices, el multiplicador, alternador y transformador. Un balance de los componentes expresados anteriormente se presenta en la Tabla 1.2 (Uclm, 2011):

Tabla 1.2: Rendimiento global de una instalación eólica

Rendimiento de Betz	59,3%
Rendimiento de la hélice	85%
Rendimiento del multiplicador	98%
Rendimiento del generador	95%
Rendimiento del transformador	98%
Total	46%

Por otro lado, la energía eólica aún al ser una energía renovable no es totalmente ajena a la contaminación medio ambiental, y esto debido a que en ciertos lugares y en la diversidad de opiniones, los aerogeneradores pueden representar una fuente de contaminación visual y sonora, cuando se encuentre muy cerca de zonas pobladas. Adicionalmente, a pesar de que la energía eólica es una fuente renovable, la mortalidad de las aves es uno de los aspectos más preocupantes desde el punto de la conservación (SEO/BirdLife, 2015), ya que en algunas zonas se afecta el hábitat natural de ciertas aves que pueden morir al pasar por donde las máquinas estén instaladas e interfieran con el curso natural de vuelo de las aves (Diario "El Mundo", 2011). Sin embargo, durante los últimos años la energía eólica se ha convertido en una de las fuentes de generación de energía eléctrica proveniente de energías

renovables más utilizadas y sobre la cual se están centrando muchas investigaciones y desarrollos con la finalidad de suplir la demanda de energía en la mayor parte de las regiones. Expertos predicen que si el ritmo de crecimiento de la energía eólica se mantiene, en el año 2050, alrededor de un tercio de las necesidades mundiales de electricidad serán suplidas desde esta fuente (National Geographic, 2010).

Actualmente, China es el mayor productor de energía eólica en el mundo. Esto se ve reflejado a que en los estudios realizador a finales del año 2016, la capacidad instalada fue de 149 millones de kilovatios; con respecto a 2015 en datos porcentuales se ve un aumento del 4% (Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico, 2017). Una visión general a la capacidad total instalada en el mundo se puede ver en la Figura 1.23.

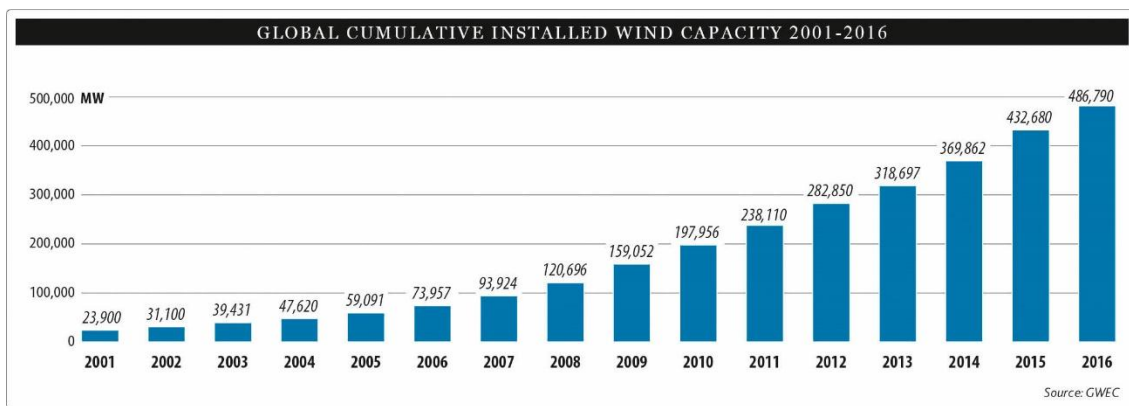


Figura 1.23: Capacidad total global instalada

Fuente: (GWEC, 2016)

Como una proyección a futuro, existen nuevos aerogeneradores que se han venido desarrollando fruto de trabajos innovadores. A continuación, se presentan algunos de ellos.

1.2.6.1 AEROGENERADORES VORTEX

Los denominados “Aerogeneradores sin hélices Vortex” son una creación de la mano de la empresa española “Deutecno”. Se trata de unos aerogeneradores sin partes móviles, tal como se muestra en la Figura 1.24. Tal idea innovadora los llevaría a ganar el primer premio de la categoría Energy, en el “The South Summit 2014” (Repsol Innovación, 2014). Dichos aerogeneradores presentarían grandes ventajas tales como el abaratamiento de los costos, tanto en instalación y mantenimiento, adicionalmente reduce impactos ambientales y existe una disminución del ruido generado por la máquina. El principio de funcionamiento de estos aerogeneradores consiste en la deformación de un material producida por la vibración provocada por la entrada del viento en resonancia con el cilindro vertical. Dicho de otra manera, es un aerogenerador piezoeléctrico por vorticidad (sin palas), que aprovechando la deformación del material piezoeléctrico llega a producir energía eléctrica.



Figura 1.24: Aerogenerador sin hélices Vortex

Fuente: (Portillo, 2017)

1.2.6.2 AEROGENERADORES WIND TREE

Desarrollados por NewWind, este proyecto denominado “Wind Tree” es una composición de 72 hojas artificiales, siendo cada una de ellas una pequeña turbina vertical en forma cónica la cual tiene la capacidad de generar energía con brisa de dos metros por segundo. Su ubicación estaría a 11 metros de altura con un diámetro de 8 metros, tendiendo una apariencia bastante similar a un árbol real, con el objetivo de disminuir el impacto visual, especialmente para cuando se trata de instalarlo en zonas urbanas (Figura 1.25). Con los estudios realizados se ha determinado que pueden generar energía durante 280 días al año con un total de aproximadamente 3.1 kW, cuando están en funcionamiento el número de turbinas antes mencionadas (Portillo, 2017).



Figura 1.25: Aerogeneradores Wind Tree

Fuente: (Portillo, 2017)



1.3 PRODUCCIÓN ENERGÉTICA DE AEROGENERADORES

La energía producida por los aerogenerador instalados, se realizan mediante el cálculo de la potencia que se puede obtener de un aerogenerador en general, la cual viene dada por la ecuación (2) (Torres, 2015):

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

Donde:

P : Potencia [W]

C_p : Coeficiente de potencia

d : Densidad del aire [kg/m³]

A : Área de barrido del rotor [m²]

V : Velocidad del viento [m/s]

De la ecuación (2), el coeficiente de potencia es un parámetro muy importante en lo que se refiere al cálculo de potencia. Primeramente, se requiere la obtención del parámetro denominado relación de velocidad tangencial (TSR o λ), la cual viene expresada en la ecuación (3) (Torres, 2015):

$$TSR = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot r}{V \cdot 60} \quad (3)$$

Donde:

n : Revoluciones por minuto

r : Radio del aerogenerador [m]

V : Velocidad del viento [m/s]

Una vez obtenido el TSR, se procede a determinar el valor aproximado del coeficiente de potencia, el cual depende de la curva propia de rendimiento de los aerogeneradores, según su tipo. Estas curvas se presentan en la Figura 1.26:

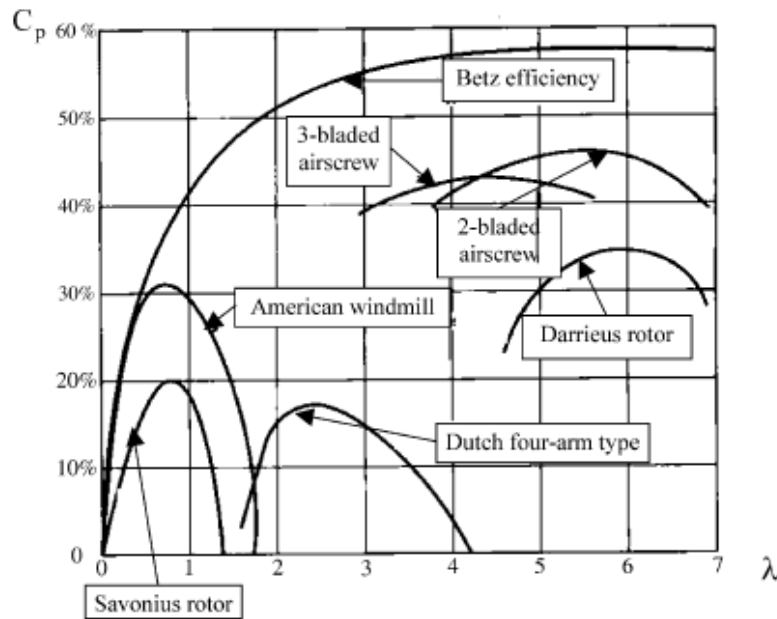


Figura 1.26: Rendimientos de las principales turbinas eólicas

Fuente: (Menet, 2004)

Una vez conocido todos estos parámetros, se procede a realizar el cálculo de la energía producida por los aerogeneradores, para ello se hace uso de la ecuación (4) (González et al., 2009):

$$E = P \cdot t \quad (3)$$

Donde:

E: Energía en [kWh]

P: Potencia en [W] o [kW]

t: Tiempo en horas [h]

La ecuación (3) nos muestra una manera analítica de calcular la energía producida por un aerogenerador.

1.4 ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL ECUADOR

1.4.1 ANTECEDENTES

La matriz de generación eléctrica ecuatoriana se ha visto inmersa en un sistema donde la mayoría de su producción de electricidad ha provenido, en varios años, de centrales a base de combustibles fósiles, es decir un tipo de energía no renovable. Sin embargo, el Ecuador es un país que posee grandes fuentes que pueden ser destinadas a la generación de energía renovable y lo que se ha buscado y se viene planeando es un cambio significativo en lo que se refiere a la matriz de generación eléctrica, dejando detrás a los combustibles fósiles y centrando sus esfuerzos en la energía renovable. Durante los años de 1999 – 2005 hubo una tasa prácticamente nula de crecimiento de potencia efectiva referente a fuentes de energía renovables (Salazar & Panchi, 2014).

Hasta el año 2007, el Ecuador tenía un sector eléctrico desarticulado, donde las principales características eran bajos niveles en la calidad del servicio, alto grado de pérdidas de energía y muy poca inversión en nuevos proyectos. Adicionalmente, se tenían altos costos de producción de la energía, lo cual afectaba notablemente a la economía que cada vez veía más lejana la sostenibilidad financiera del servicio básico mencionado. Una visión de lo que ha sido la matriz energética ecuatoriana al año 2006 se presenta en la Figura 1.27 (Tech4CDM, 2008).

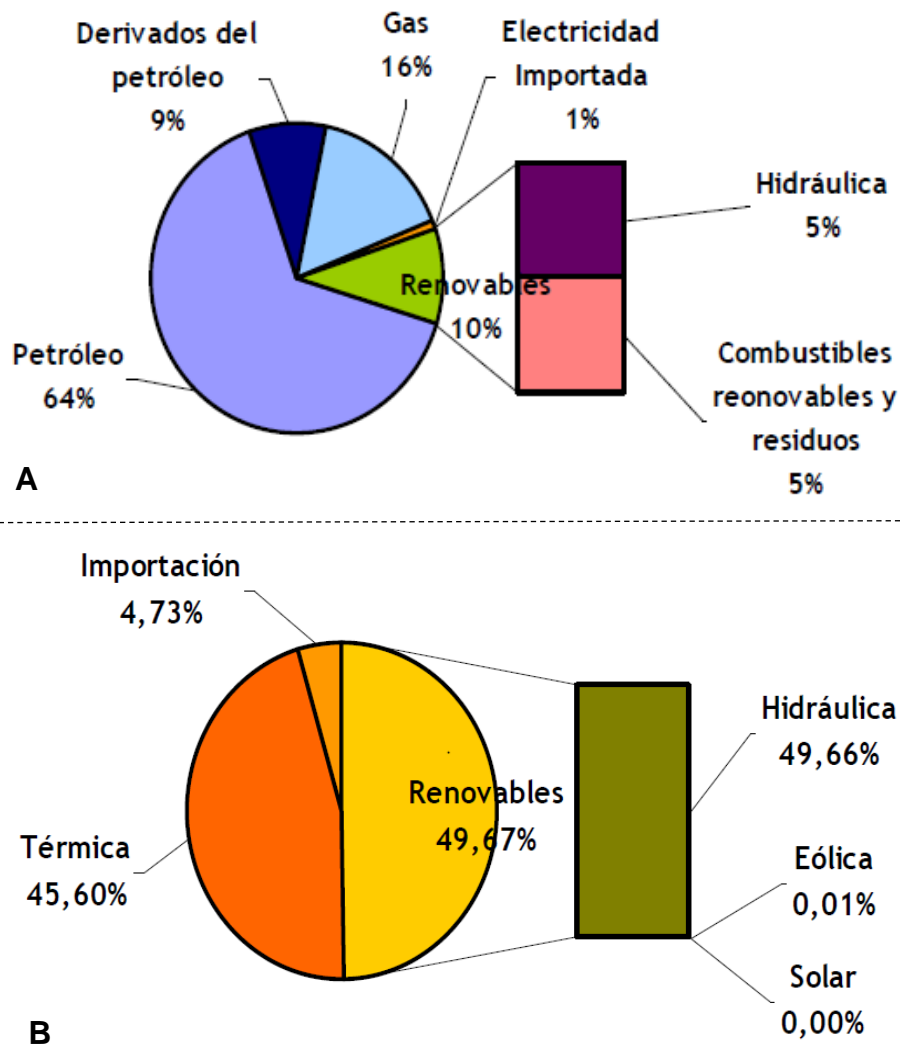


Figura 1.27: (A): Producción de energía primaria en Ecuador, 2006. (B): Generación de energía eléctrica durante año 2007

Fuente: MEER, 2007; CONELEC, 2007.



La demanda de electricidad en el país seguía creciendo y se veía la necesidad de tener mayor capacidad de generación para cubrir la demanda, lo cual llevó a requerir nuevas interconexiones dentro del sistema nacional interconectado, para obtener la importación de energía eléctrica desde los países Colombia y Perú (Salazar & Panchi, 2014).

El cambio importante en la matriz de generación eléctrica en Ecuador ha venido dándose durante la última década. El año 2007 marca una línea que separa la matriz energética tradicional gobernada por las fuentes de energía provenientes de combustibles fósiles, hacia la inclusión a gran escala de las centrales de generación hidráulica, a través de la construcción de varias centrales de este tipo. Paralelamente se empiezan a explotar los demás tipos de energías renovables existentes como la fotovoltaica y la eólica. Así pues, una comparación en el crecimiento de la potencia de generación entre el año 2007 y el año 2016 se puede ver expresada en la Tabla 1.3 (ARCONEL, 2017).

Como se puede notar en la Tabla 1.3, ha habido un cambio notable en cuanto a unidades de generación de energía renovable se refiere, con una inclusión muy fuerte especialmente en las centrales hidroeléctricas. Esto ha llevado a un incremento de más del doble en capacidad de generación en los últimos 10 años. Un vistazo más técnico en cuanto a potencias de las unidades de energías renovables y no renovables se verá más adelante.

Para lograr dicho cambio, se han tenido que analizar las dificultades y barreras existentes que imposibilitan el desarrollo del sector eléctrico, algunas de estas son la falta de información, escasa inversión, el acceso limitado a tecnologías nuevas, mejoradas y por consiguiente más eficientes. Una vez que dichos problemas se van corrigiendo, se puede llegar a un sistema capaz de brindar beneficios tanto sociales como económicos a los usuarios y con ello garantizar una mejor calidad de vida de los mismos.

Tabla 1.3: Potencia nominal de centrales de generación con fuentes de energía renovable

Provincia	Tipo de Central	Número de centrales		Potencia Nominal (MW)		
		2007	2016	2007	2016	Variación
Azuay	Hidráulica	3	6	1113,43	1772,49	659,06
Bolívar	Hidráulica	1	1	1,90	8,00	6,10
Cañar	Biomasa	1	1	29,80	29,80	0,00
Cañar	Hidráulica	0	2	-	32,33	32,33
Carchi	Hidráulica	4	3	5,00	4,71	-0,29
Chimborazo	Hidráulica	3	4	13,84	16,33	2,49
Cotopaxi	Hidráulica	6	6	29,36	28,79	-0,57
Cotopaxi	Solar	0	2	-	2,00	2,00
El Oro	Solar	0	6	-	5,99	5,99
Galápagos	Eólica	1	2	2,40	4,65	2,25
Galápagos	Solar	1	7	0,02	1,64	1,62
Guayas	Biomasa	2	2	44,00	114,50	70,50
Guayas	Hidráulica	1	1	213,00	213,00	0,00
Guayas	Fotovoltaica	-	4	-	3,98	3,98
Imbabura	Hidráulica	4	7	9,00	74,56	65,56
Imbabura	Fotovoltaica	-	3	-	4,00	4,00
Loja	Eólica	-	1	-	16,50	16,50
Loja	Fotovoltaica	-	6	-	5,99	5,99
Los Ríos	Hidráulica	1	2	16,00	57,57	41,57
Manabí	Hidráulica	2	-	9,00	-	-9,00
Manabí	Fotovoltaica	-	2	-	1,50	1,50
Morona Santiago	Hidráulica	2	2	38,83	88,40	49,57
Morona Santiago	Fotovoltaica	-	1	-	0,37	0,37
Napo	Hidráulica	2	3	6,73	1516,95	1510,22
Orellana	Hidráulica	1	1	2,30	2,30	0,00
Pichincha	Hidráulica	14	17	129,90	134,38	4,48
Pichincha	Fotovoltaica	-	1	-	1,00	1,00
Pichincha	Biogás	-	1	-	2,00	2,00
Sucumbíos	Hidráulica	1	-	0,40	-	-0,40
Tungurahua	Hidráulica	4	6	466,00	494,15	28,15
Zamora Chinchipe	Hidráulica	1	1	2,40	2,40	0,00
Total		55	101	2133,31	4640,28	2506,97



1.4.2 ACTUALIDAD

El crecimiento en la calidad de vida de la población del Ecuador tiene temas íntimamente relacionados con la energía, y uno de los más importantes viene dado por el incremento en la demanda de energía eléctrica. A partir de este incremento, el Ecuador ha venido experimentando un “crecimiento eléctrico”; es decir, para suplir la creciente demanda ha sido necesaria la construcción de nuevas centrales que puedan cubrir dicha demanda, y es ahí donde se comenzó a aprovechar los recursos propios del país en cuanto a energías renovables. Es importante mencionar que como todo proyecto de construcción o renovación, ha tenido que venir de la mano con aspectos tales como la inclusión de políticas, limitaciones, medidas arancelarias y tributarias, así como un cambio en las tarifas de suministro, brindando facilidades y opciones que promoverían el uso consciente y eficiente del servicio (MEER-BID, 2016), siguiendo las propuestas aplicables a la realidad del Ecuador que recoge el Plan Nacional de Eficiencia Energética (PLANEE).

En el Ecuador, en la actualidad el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER), creado en el año 2007, ha sido el encargado de velar por el buen desempeño del sector eléctrico y ser responsable de satisfacer las necesidades de energía eléctrica en el país cumpliendo este objetivo bajo los principios de obligatoriedad, generalidad, uniformidad, eficiencia, responsabilidad, universalidad, accesibilidad, regularidad, continuidad y calidad establecidas en las políticas gubernamentales. Trabaja además en el desarrollo de la energía renovable, con el fin de hacer crecer la matriz energética del país para conseguir una cobertura plena en el suministro del servicio eléctrico (MEER, 2017). El MEER realizó un documento denominado “El sector Eléctrico ecuatoriano 2007-2016”, en el cual se daba a conocer que durante el transcurso de esos años la capacidad instalada de generación de energía eléctrica había presentado un crecimiento que va desde 4.070 MW que se tenía registrados en el año 2006, hasta llegar a tener 8.090 MW en el año 2016, con una visión probable de alcanzar los 8.569 MW para el año 2017.

Para tener una idea más clara de lo expresado, se puede observar en la Tabla 1.4 dichos registros de potencia de las diferentes fuentes de energía existentes (ARCONEL, 2017).

Como se puede apreciar en la Tabla 1.4, ha existido un desarrollo notable en lo que respecta al uso de energías renovables, pues el total de potencia nominal y efectiva supera a la no renovable. Dichos cambios que se han venido dando en el sector eléctrico, han sido motivos de reconocimientos regionales y mundiales, lo cual deja ver la capacidad que existe en el país para la construcción y renovación de dicha estructura.

Tabla 1.4: Potencia nominal y efectiva por tipo de fuente

Tipo Fuente	Tipo de Central	Tipo de Unidad	Potencia Nominal (MW)	Potencia Efectiva (MW)
Renovable	Hidráulica	Hidráulica	4446,36	4418,18
	Térmica Biomasa	Turbo-vapor	144,30	136,40
	Fotovoltaica	Fotovoltaica	26,48	25,59
	Eólica	Eólica	21,15	21,15
	Térmica Biogás	MCI	2,00	1,76
Total Renovable			4640,29	4603,08
No Renovable	Térmica	MCI	2005,43	1611,63
		Turbo-gas	1118,85	969,43
		Turbo-vapor	461,87	422,74
Total No Renovable			3586,15	3003,80
Total			8226,44	7606,88

Este desarrollo es importante para cubrir la demanda nacional de electricidad, pues como se ve en la Figura 1.28, la evolución de la demanda máxima de potencia en el período 2007-2016 ha tenido un comportamiento creciente con el pasar de los años, con una tasa promedio de crecimiento anual de la potencia máxima de 3,32 % (MEER, 2017).

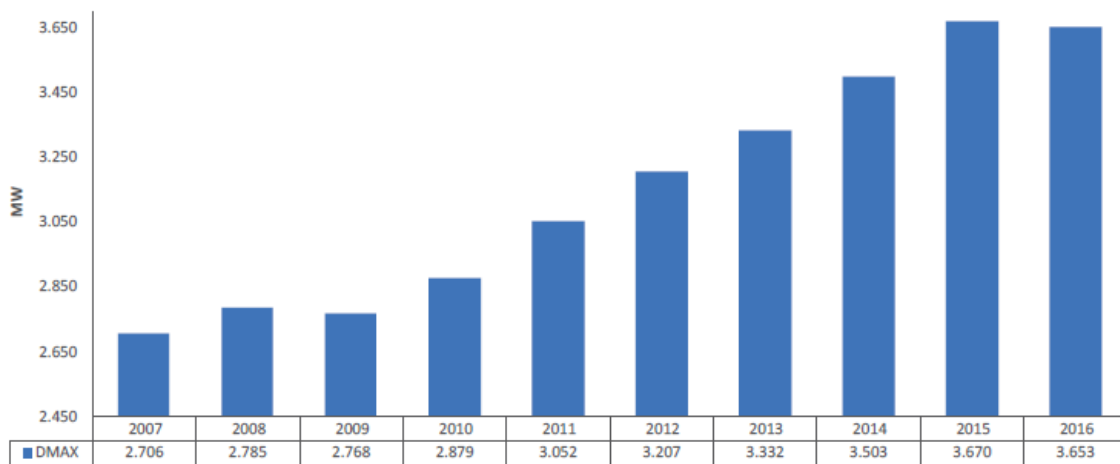


Figura 1.28: Demanda de potencia en el periodo 2007 -2016

Fuente: (MEER, 2017)

Entre las fuentes renovables, la energía eólica era una opción en el Ecuador, sin embargo, el Estado Ecuatoriano no contaba con información relevante para afirmar dicho supuesto y por consiguiente sustentar la generación de proyectos eólicos que tuvieran fines de generación eléctrica, con la excepción de unos casos que han sido objeto de estudio específicos para la zona, como por

ejemplo las Islas Galápagos y Villonaco (Loja). Siendo así, el MEER realizó campañas de medición de viento en algunas provincias del Ecuador con el objetivo de la obtención de datos del recurso eólico a alturas de 40, 60 y 80 metros, y con ello empezar la conformación de lo que hoy se conoce como el “Atlas Eólico del Ecuador (2013)”, (MEER, 2013). Desde entonces, los proyectos de energía eólica se empezaron a potenciar con la culminación de algunos proyectos y la puesta en marcha de otros. Así pues, la energía eólica ahora forma parte del sistema eléctrico ecuatoriano, en donde con el pasar de los años se sigue analizando las posibles inclusiones de parques eólicos cumpliendo con los requerimientos necesarios para un posible aprovechamiento del recurso en zonas específicas

Algunos de estos proyectos se presentan en la Tabla 1.5.

1.4.2.1 COBERTURA ELÉCTRICA

Así mismo, como se aprecia en la Figura 1.29, la cobertura de servicio eléctrico en Ecuador pasó del 93,35% del año 2007 al 97,24% en el año 2016, superando la media regional, que es de 95,91% (MEER, 2017).

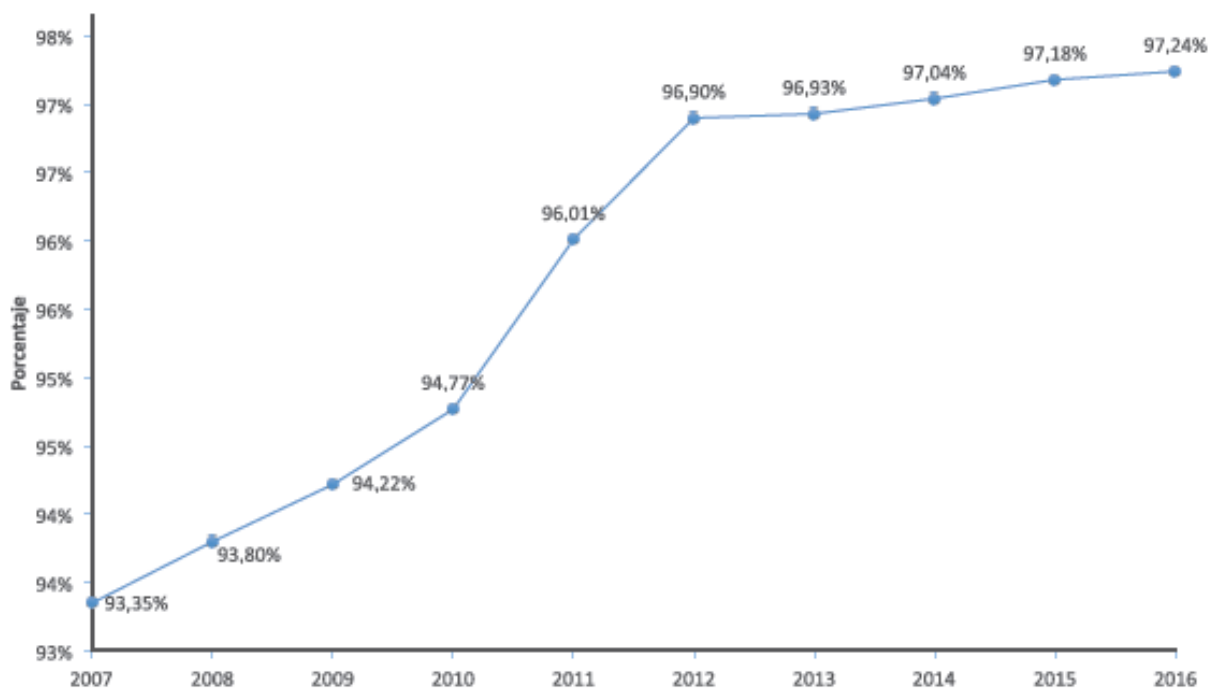


Figura 1.29: Evolución de la cobertura eléctrica nacional

Fuente: MEER,2017

A pesar de tener una notable cobertura del servicio eléctrico, siempre existen en el país sectores rurales más alejados a los cuales es más complejo llegar con dicho servicio. A raíz de este problema, y con el objetivo de suplir dicha demanda se ha visto la necesidad de ir más allá de las energías renovables convencionales (hidroeléctrica) y dar paso a la investigación y explotación de



los demás tipos de energía renovable no convencional. Es en este punto donde la energía proveniente del viento, la energía eólica, como fuente de generación de electricidad, se convierte en una alternativa viable tanto para generación a gran escala, como para la generación a pequeña escala sobre todo para los sectores rurales mencionados.

1.5 LA ENERGÍA EÓLICA EN EL ECUADOR

En la última década, la energía hidroeléctrica ha sido la forma de energía renovable más usada en el Ecuador para el cambio de su matriz energética. A pesar de aquello, y sabiendo que el recurso hídrico no es constante para todas las épocas del año, se ha considerado indispensable contar con datos actualizados sobre varios recursos renovables, entre ellos el recurso eólico, con fines de explotación energética y fomentar inversiones públicas y privadas para la generación de energía renovable no convencional.

Para el territorio ecuatoriano, la modelización del recurso eólico llevado a cabo en el Atlas Eólico del Ecuador (2013), se lo realizó con resolución de 200m x 200m para la identificación de la distribución del viento sobre el territorio (MEER, 2013). Es importante tener en cuenta la orografía del Ecuador que se conforma de cuatro zonas climáticas, cada una de ellas con sus características propias, sabiendo también con anterioridad que los vientos predominantes en el país son los denominados alisios, que provienen del Este. La evaluación del recurso eólico en las zonas antes mencionadas se resume en (Mosquera et al., 2013):

1.5.1 ZONA ORIENTAL O AMAZÓNICA

Existe disminución de la velocidad del viento en niveles cercanos al suelo debido a la vegetación selvática de la zona.

1.5.2 ZONA SIERRA

Existen vientos muy elevados, muy comprimidos debido a la presencia de la Cordillera de los Andes lo cual resulta en una aceleración de los mismos. Aparentemente suena una condición bastante ideal, sin embargo, tienen la desventaja que dichos vientos se producen en alturas muy elevadas, razón por la cual el acceso al recurso se convierte en una dificultad y adicionalmente debido a la altura hay una disminución en la densidad del viento que no resulta del todo beneficioso para la instalación de la tecnología.

1.5.3 ZONA COSTA

Los alisios se ven relacionados con circulaciones locales: la brisa proveniente de la interacción entre las temperaturas continente – océano, y también de la misma manera para la relación valle – montaña. Debido a esta característica de interacción entre los diferentes tipos de viento, convierte al recurso a uno con mayor variabilidad y la localización varía de manera muy uniforme respecto a cada lugar donde se puedan realizar los estudios.



1.5.4 ISLAS GALÁPAGOS

De manera similar a la Costa, las Islas Galápagos tienen la conjunción de tres características importantes que determinarán los vientos en su territorio: alisios, volcánicos, y las islas en sí. Debido a la existencia de estos tres aspectos mencionados, desencadena variaciones importantes en el viento tales como aceleración y desaceleración en espacios muy pequeños, y adicionalmente presenta diversos cambios de dirección.

Según el MEER (2013), en el Ecuador se estima la existencia de un potencial aproximado de 1.671 MW, los cuales están principalmente distribuidos en la región de la sierra-sur (provincias de Loja y Azuay), como se muestra en la Figura 1.30.

Por otro lado, una descripción general a las centrales eólicas existentes y en etapa de estudios o construcción, a finales de 2017, se expone en la Tabla 1.5 y la Figura 1.31.

Tabla 1.5: Centrales eólicas en el Ecuador

Proyecto Eólico	Potencia (MW)	Situación Actual
San Cristóbal (Galápagos)	2,4	En operación desde 2007
Isla Baltra-Santa Cruz (Galápagos)	2,25	En operación desde 2014
Villonaco (Loja)	16,5	En operación desde 2013
En proceso		
Membrillo ¹ (Loja)	45	Estudios de factibilidad
Huascachaca ² (Loja – Azuay)	50	Inicio de construcción
Salinas ³ (Imbabura)	10	En espera
Los Chinchas ⁴ (Loja)	10 - 15	Estudio de factibilidad

¹ Información extraída de (INER, 2011)

² http://www.elecaastro.com.ec/index.php?option=com_content&view=article&id=65&Itemid=80

³ Este proyecto tuvo la campaña de medición de viento llevada a cabo por ProViento S.A entre los años 1997 – 2001 para la empresa operadora ElectroViento S.A., sin embargo, la falta de inversionistas para impulsar el proyecto hizo que en el año 2008 la empresa ElectroViento S.A pierda la concesión del proyecto. Fuente: <http://www.proviento.com.ec/salinas.html>

⁴ Se lo conoce también como Huacacocha (Loja). Los estudios realizados durante un periodo de medición de 36 meses, muestran una velocidad anual media de 9,1 m/s a 2470 m.s.n.m (INER, 2013)

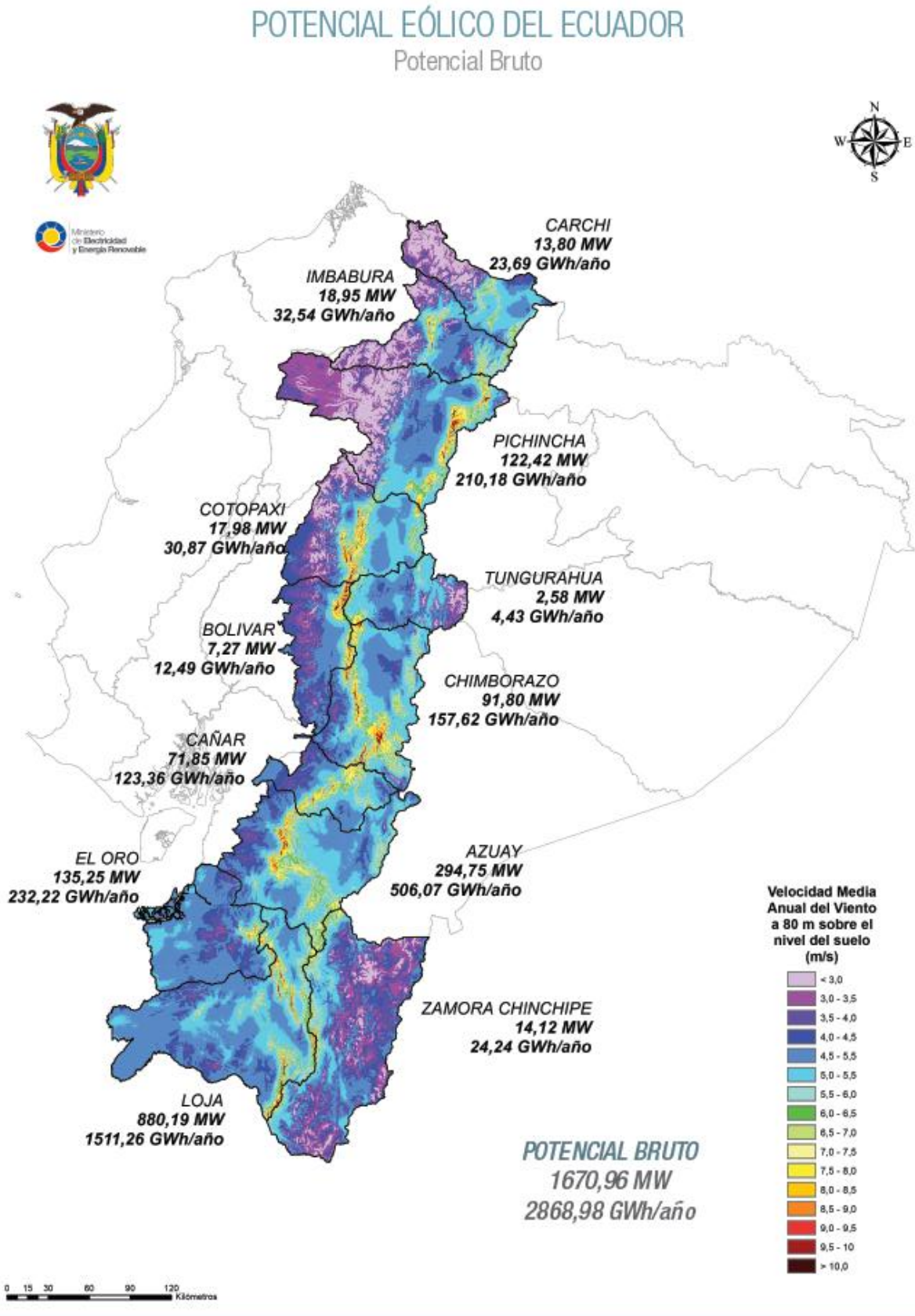


Figura 1.30: Potencial eólico del Ecuador.

Fuente: MEER, 2013



De manera más específica, con el fin de ir convergiendo en el tema de estudio se presentan datos de velocidad promedio del viento en la provincia del Azuay extraídos del Atlas Eólico del Ecuador (MEER, 2013), cuya metodología empleada en el estudio es el sistema MesoMap, donde se encuentra una integración de modelos de simulación de la atmósfera, bases de datos, estaciones de trabajo y unidades de disco de gran capacidad. Dentro de este sistema se encuentra un simulador denominado MASS, el cual es un modelo físico-matemático que simula el comportamiento de la atmósfera a mesoescala. Adicionalmente, el modelo MASS es acoplado a un modelo de microescala simplificado de flujo de viento (WindMap), utilizado para refinar la resolución espacial del MASS e incluir los efectos locales de la rugosidad y orografía. Entonces, el Atlas Eólico del Ecuador ha utilizado estas herramientas de tal manera que, el MASS simula las condiciones atmosféricas sobre la región de interés durante un total de 366 días escogidos de manera aleatoria de un total de 15 años. Al finalizar estas simulaciones, los resultados son introducidos en el WindMap. Para la estimación del potencial eólico del Ecuador, se realizó mediante la integración de dichos mapas y adicionalmente recursos de geoprocesamiento, cálculo de desempeño y producción de energía eléctrica a partir de las curvas de potencia de turbinas eólicas existentes en el mercado. Los resultados se presentan en la Tabla 1.6.

Tabla 1.6: Potencial eólico - eléctrico estimado para la provincia del Azuay, Ecuador

Fuente: MEER, 2013

Provincia	Rango de Velocidad a 80 m de altura [m/s]	Área [km ²]	Potencia Instalable [MW]	Energía Anual [GWh/año]
Azuay	7,0 - 7,5	62,16	186,47	320,17
	7,5 - 8,0	26,90	80,71	173,22
	8,0 - 8,5	7,16	21,47	55,29
	> 8,5	2,03	6,10	18,31

La Tabla 1.6 puede ser complementada con la Figura 1.29 para mejor comprensión del rango de velocidades y el área.



A



B



C

Figura 1.31: (A): Proyecto eólico Bartra – Santa Cruz. (B): Proyecto eólico San Cristóbal. (C): Proyecto eólico Villonaco.

Fuente: MEER; <http://www.galapagosdigital.com>

2 CAPÍTULO 2. ENERGÍA EÓLICA A PEQUEÑA ESCALA

2.1 LA ENERGÍA EÓLICA A PEQUEÑA ESCALA

Con el paso del tiempo y el avance de la tecnología, la generación eléctrica proveniente de la energía eólica, a través de los distintos tipos de aerogeneradores, ha ido desarrollándose cada vez más. Estos equipos se vienen convirtiendo en máquinas cada vez más grandes en su potencia de diseño y su aporte a las redes eléctricas de muchos países crece en importancia. Sin embargo, existen familias de aerogeneradores que se han opuesto a dicha tendencia, y que se han mantenido en el rango de potencias menores a los 10 kW.

Por esta razón, se ha visto necesaria la clasificación de los aerogeneradores en base a su potencia y por consiguiente en su campo de aplicación. Dicha clasificación se presenta en la Figura 2.1 (Lascorz & CIEMAT, 2014):

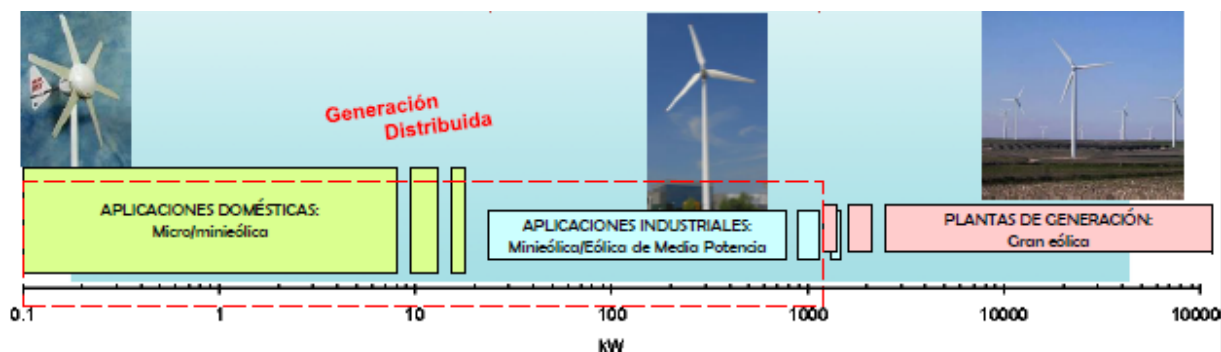


Figura 2.1: Definición de rangos de energía eólica

Fuente: Ciemat, 2014

2.1.1 RANGOS DE LA ENERGÍA EÓLICA A PEQUEÑA ESCALA.

La energía eólica a pequeña escala, que para el presente documento se puede considerar hasta los 100 kW de potencia, se puede subdividir en cuatro sub-categorías, las cuales se presentan en la Tabla 2.1.

La parte clave para clasificar un sistema eólico de pequeña escala está en el tamaño de la turbina eólica (Briefing, Small, & Energy, 2015). Esto es debido a que el tamaño de la turbina y también la velocidad del viento son factores que determinan la cantidad de electricidad que un sistema eólico podría producir.



Tabla 2.1: Sub-categorías de aerogeneradores a pequeña escala

Fuente: Ciemat, 2014

Potencia Nominal (kW)	Área barrida de rotor (m)	Sub-categoría
$P_{\text{nominal}} < 1 \text{ kW}$	$A < 4,9 \text{ m}^2$	Pico eólica
$1 \text{ kW} < P_{\text{nominal}} < 7 \text{ kW}$	$A < 40 \text{ m}^2$	Micro eólica
$7 \text{ kW} < P_{\text{nominal}} < 50 \text{ kW}$	$A < 200 \text{ m}^2$	Mini eólica
$50 \text{ kW} < P_{\text{nominal}} < 100 \text{ kW}$	$A < 300 \text{ m}^2$	Mini eólica ⁵

Como se puede ver en la Tabla 2.1, las potencias que se manejan en la energía eólica a pequeña escala son bajas comparadas con aquellas conectadas a la red, lo que hace que su uso sea destinado especialmente a sectores donde se requiere generar energía suficiente para satisfacer demandas de una casa, una pequeña empresa o lugares similares. Adicionalmente, la energía eólica a pequeña escala es altamente usada en zonas rurales donde la llegada con la red eléctrica convencional se ve complicada, y ante este inconveniente existe un gran potencial de este tipo de generación renovable a pequeña escala, pues dichos sistemas pueden ser instalados muy cerca del lugar al que se quiere energizar. Esta última característica se puede aplicar también a sistemas eléctricos más grandes, a través de la denominada generación distribuida.

2.2 GENERACIÓN DISTRIBUIDA

La generación distribuida, no es más que la construcción o la puesta en marcha de pequeños sistemas de generación de energía eléctrica, a ser conectados a un sistema más grande. Para ello se hace un uso amplio de las energías renovables, especialmente la fotovoltaica y la eólica, pues son las que mayor avance tecnológico han experimentado en los últimos años. La generación distribuida tiene la característica de conectarse a la red eléctrica de distribución. El contar con sistemas de este tipo ofrece las siguientes ventajas (Rodríguez, 2013), (Universidad Politécnica de Cartagena, 2008):

- **Reducción de pérdidas en la red:** debido a que las distancias que se transporta el flujo de energía es notablemente menor a la red tradicional en los puntos de gran generación.
- **Confiabilidad y calidad de la energía:** Al contar con varios puntos de generación en un territorio determinado, el restablecimiento de la energía ante un fallo que no sea de mayor magnitud, puede ser muy rápida.

⁵ Usualmente, suele usarse un mismo rango (entre 7 kW y 100 kW) para definir a la mini eólica, sin embargo, se la puede sub-dividir a esta de manera que para un área de barrido de 300 m² sea con aerogeneradores entre 50 y 100 kW

- **Bajos niveles de potencia:** Aunque existen diferencias en cuanto al establecimiento de un límite de potencia para la generación distribuida, se pueden mencionar a manera de ejemplo, el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE) establece unos límites que van desde 1 kW hasta las decenas de MW. En tanto España, el Régimen Especial contempla un límite máximo de potencia de 50 MW. Adicionalmente EscoVale Consultancy, consultora del Reino Unido, amplía el rango de potencias hasta 100 MW, limitando a 10 MW la potencia máxima para instalaciones basadas en fuentes de energía renovable.
- **Uso de energías renovables:** Lo cual reduce impactos negativos de contaminación al ambiente.

La Figura 2.2 muestra, a manera de ejemplo, el esquema de una red en la cual se incluye la generación distribuida.



Figura 2.2: Esquema de generación distribuida

Fuente: saenergia.com.ar

2.2.1 SISTEMAS EÓLICOS EN GENERACIÓN DISTRIBUIDA

Los sistemas eólicos de pequeña escala son ampliamente usados para aplicar el concepto de generación distribuida, debido a que sus costos de mantenimiento son bajos, pero también no generan mayor contaminación medioambiental. Generalmente suelen ser utilizados en complemento con sistemas fotovoltaicos, a lo que se lo denomina sistema híbrido (Martínez, 2017). La Figura 2.3 muestra un ejemplo de un pequeño sistema híbrido eólico fotovoltaico.



Figura 2.3: Ejemplo de un sistema híbrido para generación distribuida

Fuente: twenergy.com

Bajo el concepto de generación distribuida, los sistemas eólicos instalados permiten una independencia temporal de la energía proporcionada por la red de distribución, reduciendo su uso a situaciones en las cuales la demanda sea mayor que la generación, pero que también puede realizar un procedimiento inverso; es decir, la energía que se está generando pero que no se está consumiendo puede ser devuelta o inyectada de vuelta a la red eléctrica en caso de ser necesario.

Por las razones antes mencionadas, la generación a pequeña escala cada vez sigue creciendo de manera importante. Por ejemplo las ventajas que presentan estos sistemas ha llamado la atención a alrededor de unas 250 empresas en 26 países para la fabricación de aerogeneradores pequeños según expresa la American Wind Energy Association (AWEA), y solamente en EEUU más de 150.000 turbinas de pequeña potencia han sido instaladas al final del año 2012 (American Wind Energy Association , 2013). Así mismo, un aerogenerador aún si es uno de pequeña potencia, de ser instalado en un lugar estratégico puede producir varios cientos de kWh al año (5 – 20% de las necesidades anuales de un hogar (Blog de CEMAER, 2011)).

2.3 APLICACIONES DE LA ENERGÍA EÓLICA A PEQUEÑA ESCALA.

Existen algunos países y ciudades donde la energía eólica ha sido acogida de manera muy positiva, tal que algunas de sus construcciones (edificios, hogares, etc.) han sido realizadas conjuntamente con fuentes de generación de energías

renovables. A continuación, se presentan algunos ejemplos donde se usa energía eólica a pequeña escala.

2.3.1 CONEXIÓN A LA RED ELÉCTRICA

La energía eléctrica se genera mediante las turbinas eólicas, donde la energía producida se la utiliza para consumo propio, mientras que en los casos en los que se genere un excedente de energía se puede realizar un almacenamiento en un banco de baterías, o en caso contrario se lo inyecta y se lo vende a la red eléctrica, pudiendo o no almacenar un poco de esa energía en baterías (Figura 2.4).

CONEXIÓN A RED

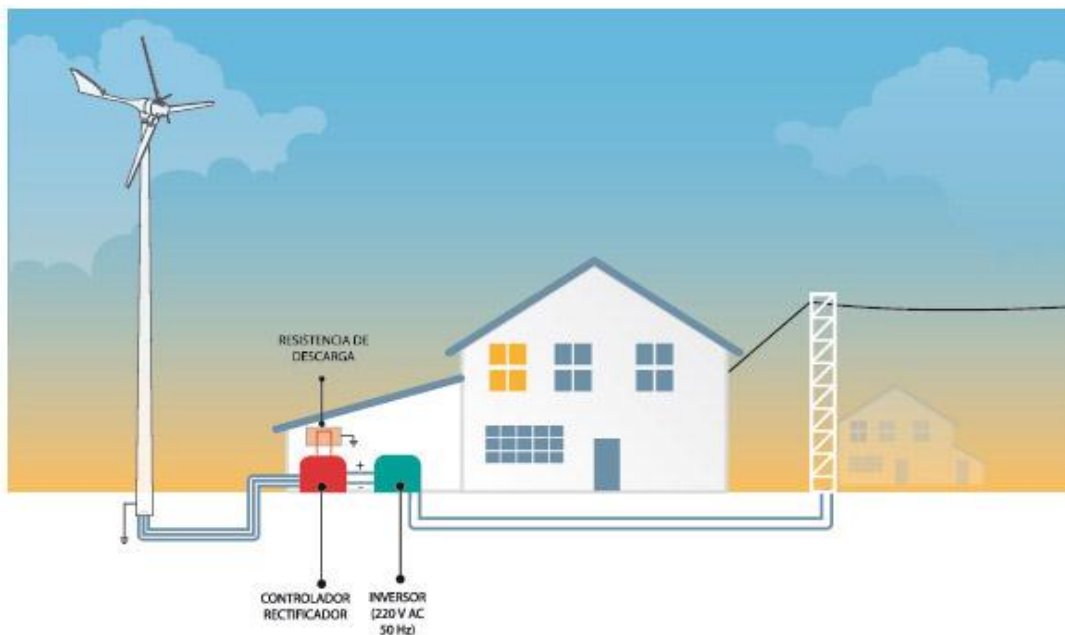


Figura 2.4: Diagrama básico de un aerogenerador conectado a la red

Fuente: www.windspot.es

2.3.2 CONEXIÓN AISLADA

En lugares donde la red eléctrica no es capaz de llegar, y por lo tanto no se puede tener una conexión a ella para suministro de energía, así como tampoco se puede realizar una conexión como la del punto anterior, se puede optar por una conexión del sistema que pueda aprovechar el recurso eólico para uso exclusivo del lugar (residencia, edificio o pequeña comunidad). La energía es almacenada en baterías, las cuales pueden servir como un respaldo durante los periodos de poco viento. (Figura 2.5).

CONEXIÓN CASO AISLADO

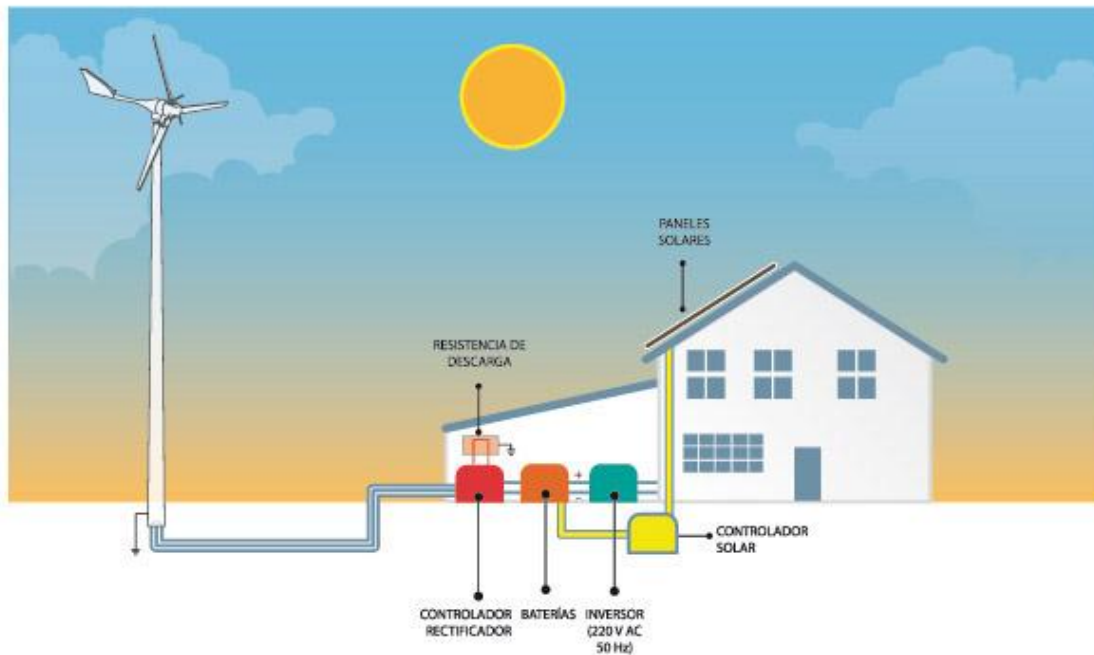


Figura 2.5: Diagrama básico de un aerogenerador de conexión aislada

Fuente: www.windspot.es

Este tipo de conexión es muy típico de las zonas rurales, donde las cargas son muy dispersas y la red eléctrica no ha llegado.

2.3.3 BOMBEO DE AGUA

Una de las aplicaciones más antiguas de la energía eólica y que aún sigue siendo usada hoy en día, particularmente por la de pequeña escala es el bombeo de agua. En la actualidad, se suele combinar el consumo propio con una bomba de agua. Al igual que en los casos anteriores, la energía se almacena en baterías, desde donde mediante un inversor se la transforma para uso en la residencia o el lugar destinado, o por sistema de bombeo instalado (Figura 2.6).

CONEXIÓN BOMBA DE AGUA

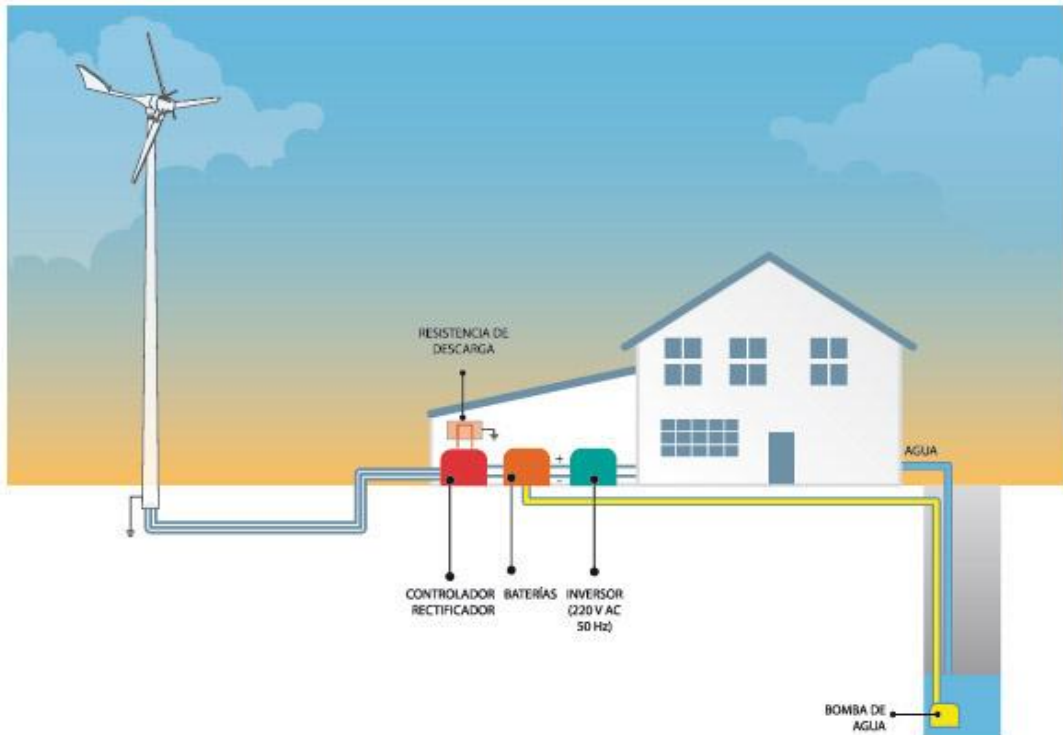


Figura 2.6: Diagrama básico de un aerogenerador para bomba de agua

Fuente: www.windspot.es

2.3.4 CONEXIÓN A ANTENA DE TELEFONÍA

En los últimos años, las telecomunicaciones han tenido un avance exponencial en nuestro medio, siendo así una de las herramientas principales en ámbitos como la educación, el trabajo y demás. Es por ello que, ante el aumento en las necesidades de las telecomunicaciones, existen antenas que se colocan en ubicaciones muy alejadas, razón por la cual la energización necesaria para las mismas se ve complicadas puesto que la red eléctrica convencional no suele llegar a tales puntos, siendo así que el uso de la energía eólica a pequeña escala interviene para alimentación de la antena. La energía generada por el aerogenerador es almacenada en bancos de baterías donde está lista para el uso en la antena.

La Figura 2.7 muestra la conexión a antena de telefonía, en tanto que la Figura 2.8 muestra un ejemplo de aplicación.

CONEXIÓN ANTENA TELEFONÍA

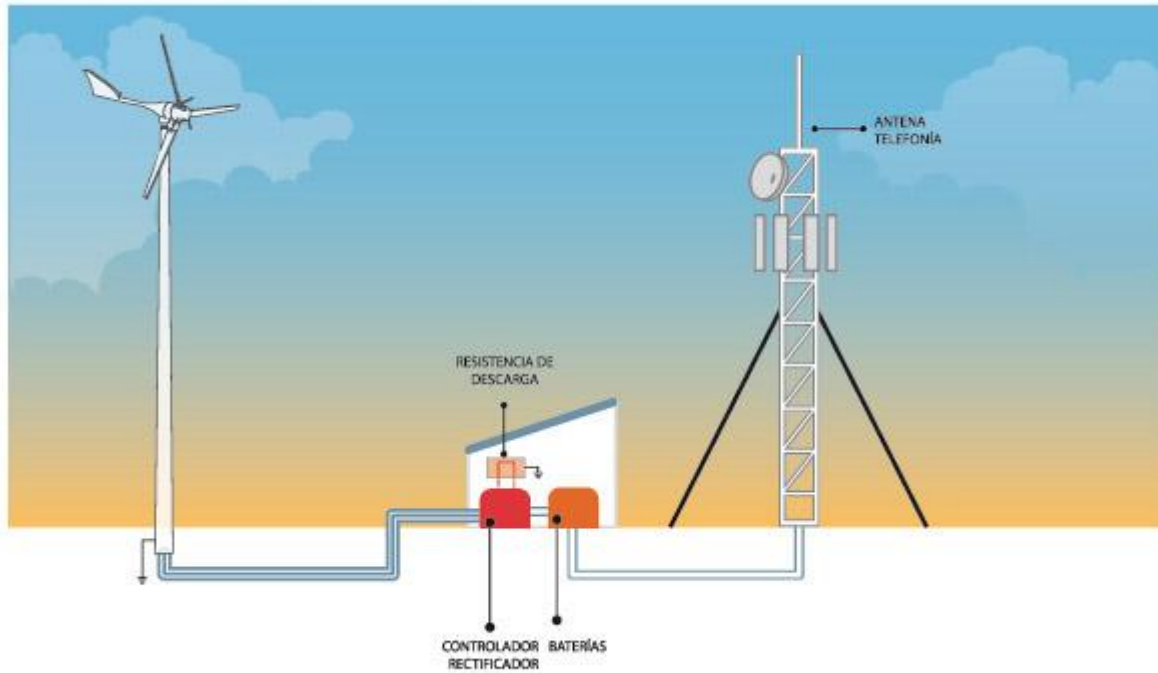


Figura 2.7: Diagrama básico de un aerogenerador para conexión con antena

Fuente: www.windspot.es/



Figura 2.8: Aerogenerador para alimentación de antena de telefonía

Fuente: www.windspot.es

2.3.5 APLICACIONES ESPECIALES EN EDIFICACIONES

A continuación, se exponen algunos ejemplos reales donde se ha hecho uso de la energía eólica a pequeña y mediana escala en grandes edificaciones.

2.3.5.1 BAHRAIN WORLD TRADE CENTER

Este edificio está ubicado en Manama, Bareín. El diseño de las torres de esta edificación ha sido inspirado en las conocidas “Torre eólica” o “Torres del viento” árabes tradicionales debido a que por su arquitectura aprovecha la brisa marina proveniente del golfo. Razón de ello, estas torres conforman el primer edificio comercial que integra completamente tres turbinas eólicas de 225 kW en su diseño, ubicadas a 240 metros de altura. Las turbinas instaladas suministran alrededor del 10 al 15% del consumo total de la energía en el edificio (Bahrain World Trade Center, 2015). Por los motivos expuestos, el proyecto ha sido merecedor a varios reconocimientos, algunos referentes a la sostenibilidad, entre los cuales se puede mencionar el obtenido en el año 2006 en los LEAF Awards en la mención de “Mejor uso de Tecnología en un Gran Planeamiento” y un premio al “Diseño Sostenible” (World Architecture News, 2008). Ver Figura 2.9

A



B



Figura 2.9: (A): Vista de los tres aerogeneradores que forman parte de la edificación. (B): Vista panorámica del edificio

Fuente: www.bahrainwtc.com

2.3.5.2 TORRE SACYR VALLEHERMOSO, ESPAÑA

Consiste en un micro-parque eólico que está ubicado en la azotea de la torre, lo cual quiere decir que se encuentran a 239 metros de altura. Está conformado por tres unidades aerogeneradores de pequeña escala de eje vertical, de 5 kW cada uno. El sistema es usado para la iluminación de la fachada así como para el alumbrado en casos de emergencia especialmente a oficinas o plantas críticas que necesitan de electricidad como servidores informativos o sistemas de seguridad (Magariño, 2008). La Figura 2.10 muestra esta instalación.



Figura 2.10: Instalación micro-parque eólico en la Torre Sacyr

Fuente: Magariño, 2008

2.3.5.3 PSE-MINIEÓLICA, ESPAÑA

El Proyecto Singular Estratégico “Minieólica” perteneciente al CIEMAT, Organismo Público de Investigación dependiente del Ministerio de Educación y Ciencia, trata de un proyecto plurianual de investigación y desarrollo que se centra en el ascenso de la tecnología eólica a pequeña escala con los fines de uso de conexión a la red eléctrica, en viviendas y en general temas relacionados a la generación distribuida (Figura 2.11), con el fin de mejorar los

niveles de calidad y confiabilidad del sistema eléctrico al mismo tiempo que se reducen los costos de la energía, suponiendo una opción muy viable para países en desarrollo (CIEMAT, 2009).



Figura 2.11: PSE-Minieólica, España

Fuente: www.ciemat.es

2.4 LA ENERGÍA EÓLICA A PEQUEÑA ESCALA EN EL MUNDO

En función de las diversas aplicaciones de la energía eólica a pequeña escala, en el año 2012, un estudio realizado por la World Wind Energy Association (WWEA), señala que existe un total instalado de 678 MW de energía mini-eólica instalada alrededor del mundo. A finales del 2015, se estima que existían al menos unas 990.000 turbinas mini-eólicas instaladas con una capacidad total de más de 945 MW. China encabeza la lista como el país que mayor capacidad instalada de energía eólica a pequeña escala, según el reporte mundial de la mini-eólica (Small Wind World Report, 2017), con un porcentaje del 43% del valor global, seguido de EEUU con el 25%, Reino Unido con el 15% e Italia con

el 6,3% (Pitteloud & Gsänger, 2017). Los datos mencionados se los puede observar en la Figura 2.12.

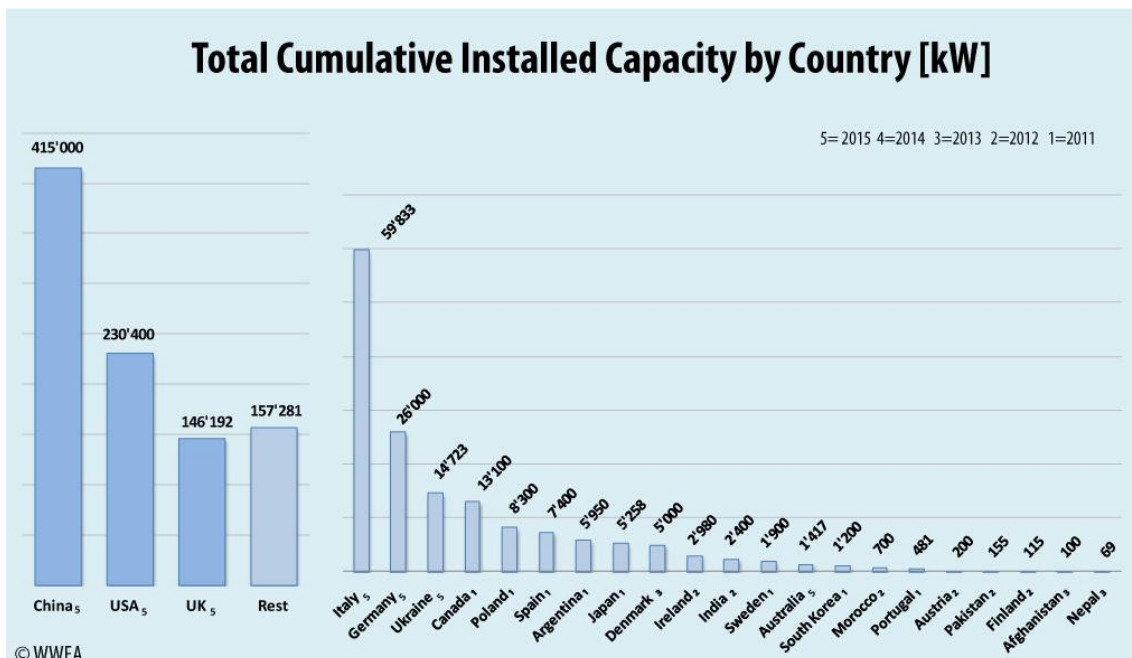
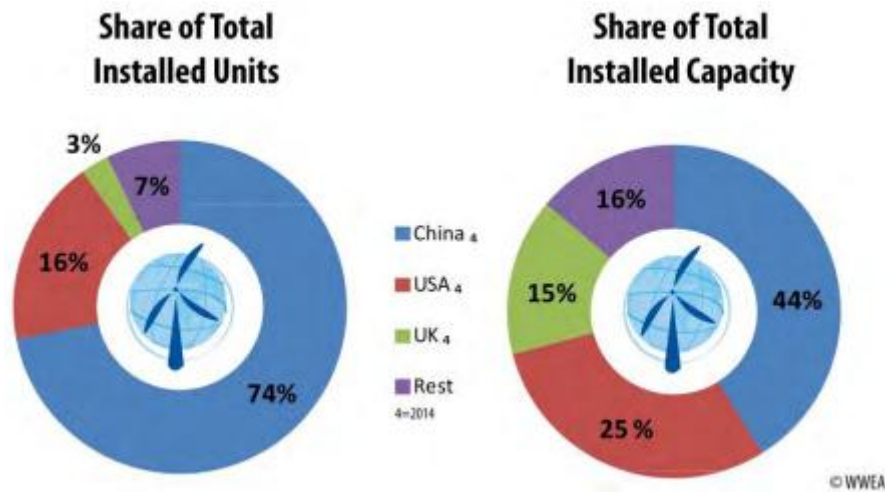


Figura 2.12: Arriba izquierda: Porcentaje del total de unidades instaladas. Arriba Derecha: Porcentaje del total de la capacidad instalada. Abajo: Capacidad total acumulada instalada por país

Fuente: WWEA

2.5 LA ENERGÍA EÓLICA A PEQUEÑA ESCALA EN ECUADOR

El cambio en las políticas energéticas en el sector eléctrico ecuatoriano, ha provocado la aparición de nuevas formas de generación de energía eléctrica. Siendo así, las energías renovables han crecido en cuanto a su participación en la electrificación del país, incrementando la cobertura de servicio eléctrico para los sectores alejados del país, de manera particular en los sectores rurales. La energía eólica a pequeña escala representa una tecnología poderosa para estos fines, tal como dijo Stefan Gsänger en la sexta Cumbre



Mundial de la Energía Mini-eólica (2015): “Técnicamente y económicamente, la mini eólica tiene mucho que ofrecer...aparte de los mercados del mundo industrializado, el mayor potencial para la mini eólica se encuentra en la electrificación de las zonas rurales, en particular en los países en desarrollo”. (Gsänger, 2015)

La razón por la cual existe interés en la electrificación de estos sectores del Ecuador, es debido a la búsqueda de la equidad entre los sectores urbanos con los urbanos-marginales y rurales con el objetivo de lograr un proceso de desarrollo integral en la nación. Siendo esta la meta, es necesario impulsar y mejorar las actividades productivas que fomenten el crecimiento de los sectores rurales, para con ello lograr un crecimiento de la economía para conseguir una mejor calidad de vida.

Acorde a los datos del Censo de Población y Vivienda del año 2010 realizado por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), el área urbana contaba con un porcentaje del 94,77% en cuanto a viviendas que cuentan con electricidad, no así el área rural, que tan solo contaba con un 89,03%. Esto es debido a que como se ha mencionado anteriormente, la llegada con la red a ciertas zonas rurales se ve dificultada por los altos costos que esto representa, debido a las grandes distancias a cubrir, las cargas dispersas, existen grandes pérdidas, etc. lo que lleva a una deficiente calidad de servicio eléctrico. Por otra parte, a más de dificultades económicas que supone la extensión de red, existen otras razones por las cuales en algunas regiones no se ha podido llegar a electrificar. Entre dichas razones se destacan los aspectos ambientales, pues la red tendría que cruzar por zonas de vegetación o fauna protegidas en donde no se ha podido llegar a obtener un camino viable ni un acuerdo que permita la construcción de la red que pase por el lugar. Adicionalmente, sobre todo en lugares de la Amazonía, varias etnias locales se han opuesto a la construcción o electrificación de los lugares, razón por la cual y sumado a ello el respeto por las diferentes culturas no se ha procedido a las extensiones de red eléctrica.

Por los motivos expuestos, la electrificación con fuentes de energías renovables se considera una opción viable, sin embargo, su puesta en marcha no es ajena de problemas o inconvenientes. Una de las barreras más grandes es la falta de conocimiento de las personas ante estas tecnologías, con ello la falta de capacitación y comprensión de las ventajas que este tipo de solución podría ofrecer ha llevado a suponer grandes problemas en la incorporación de estas fuentes de generación (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2017).

2.5.1 PROYECTOS DE ENERGÍA MINI-EÓLICA EN EL ECUADOR

Para la determinación de los recursos eólicos en el Ecuador, se ha dado un gran paso con la publicación del “Atlas Eólico del Ecuador” realizada por el MEER en el año 2013. Sin embargo, si se quiere tener información puntual sobre el recurso eólico existente en una determinada zona, se debe realizar mediciones sobre el lugar de interés, para con ello obtener con exactitud las

velocidades y dirección del viento, información que no se puede extraer con exactitud del Atlas Eólico.

En el Ecuador no existen proyectos emblemáticos sobre energía eólica a pequeña escala, siendo esto reducido solo a proyectos de investigación y estudios específicos de zonas de interés. A continuación, se presentan algunos de estos.

2.5.1.1 PROYECTO DE ESTACIÓN METEOROLÓGICA

El Centro de Estudios de Energías Renovables de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Guayaquil, ha sido el impulsor de una propuesta para un proyecto de evaluación y medición del recurso eólico ubicados a baja altura (43 msnm) y sobre las azoteas en algunos de los edificios de la ciudad de Guayaquil. (Fernández, 2017)

Dentro de la propuesta del proyecto se pretenden realizar mediciones para obtención de velocidad media del viento, así como su caracterización (tiempo y dirección), puesto que representan los parámetros esenciales para la determinación de factibilidad de un proyecto de energía eólica. El montaje de las estaciones se distribuye en la zona 8 de la provincia del Guayas y como mínimo se planteó un año de recolección de datos (Fernández, 2017). El equipo para la medición es una estación WS-1090, la cual se la puede en la Figura 2.13.



Figura 2.13: Estación WS-1090

Fuente: <http://www.ambientweather.com/amws1090>

La estación mostrada en la Figura 2.13, tiene la capacidad de medir la dirección del viento (grados de desviación magnética), y la velocidad del viento



(m/s). A conocimiento del autor, no se ha conseguido información acerca de los resultados realizados en este estudio.

2.5.1.2 ESTUDIO EXPLORATORIO DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA Y FOTOVOLTAICA EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

Esta investigación trata sobre el análisis de la velocidad del viento a partir de información secundaria existente y recolección de datos primarios para su posterior contraste y estimación del potencial de generación de energía eólica.

Los datos secundarios fueron obtenidos de los registros del INAHMI, entre los años 1982 – 2012 en Ñaquito (2789 msnm), Izobamba (3058 msnm) y la Tola de Tumbaco (2480 msnm). Los datos primarios por su parte fueron tomados en Calderón (2680 msnm), Itchimbía (2929 msnm). Para la recolección de los datos se hizo uso de anemómetros Windmonitor (modelo RM Young) con un Dataloger HOBO 430-NRC, el cual realiza la toma de lecturas según la configuración necesaria, en este caso cada 30 segundos, por tres meses. Los equipos para obtención de datos fueron colocados a 12 metros del nivel del suelo. (Franco, Puruncajas, & Ortiz, 2014)

Los datos del INAHMI muestran para Ñaquito velocidades de 3 a 6 m/s mensualmente. Izobamba de 2 a 3 m/s mensualmente. La tola de Tumbaco tiene valores superiores, que van desde los 2m/s hasta el valor máximo obtenido de 8m/s. Debido a que los datos fueron obtenidos de manera secundaria, a partir de información mensual, no se tiene un conocimiento exacto del comportamiento del viento a determinadas horas del día. Los resultados obtenidos de las mediciones primarias, si pueden tener un registro detallado, siendo así que, para Calderón, las mayores velocidades están entre las 11h00 y 16h00, llegando a 5 m/s, y para horas fuera del intervalo son valores muy pequeños menores a 1 m/s. Con ello se obtuvo una velocidad promedio de 3m/s. En Itchimbía, en valor máximo alcanzado fue 8 m/s, pero como velocidad promedio se tiene 3 m/s, sin embargo a diferencia del sector de Calderón, aquí los valores fueron alcanzados entre las 9h00 y las 15h00, adicionalmente en horas de la noche se tiene viento también con velocidades entre 0.5 y 3 m/s en su mayoría, contando con la existencia esporádica de velocidades de hasta 6 m/s (Franco et al., 2014).

En conclusión, al trabajo realizado por el Distrito Metropolitano de Quito, se dice que en los lugares estudiados no se tiene recurso eólico suficiente para generación eléctrica de alta potencia. Sin embargo, con la velocidad de 3 m/s obtenida permitiría hacer uso de generadores eólicos de baja potencia, el cual podría ser aprovechado especialmente para abastecimiento o autoconsumo domiciliario (Franco et al., 2014).

2.5.1.3 SISTEMA HÍBRIDO DEL PULULAHUA

Proyecto instalado por la empresa ProViento S.A. en el año 2008 y que sigue en operación hasta la actualidad. Consiste en un sistema híbrido eólico/solar con un respaldo de la red en el hostel del volcán Pululahua.

En cuanto al sistema eólico que es el punto de interés, se tuvieron dos etapas. La primera constaba de un aerogenerador de 1000W ubicado a una altura de 12 metros y aspas de 2.8 metros, sin embargo debido a que en dicha altura el viento no era completamente constante se procedió a cambiarlo por un aerogenerador Exmork 1000 a 1500 W con aspas de 3.2 m, con una torre venteada de 18 metros (ProViento S.A., 2017). (Ver Figura 2.14)



Figura 2.14: Aerogenerador del sistema Pululahua

Fuente: ProViento S.A.

2.5.1.4 ENERGÍA PARA GARUPAMBA (CUENCA)

La empresa ProViento S.A. realizó la instalación de un aerogenerador EXMORK 500W/12VDC en una torre a 6 metros de altura con el objetivo de

proveer de energía eléctrica al Centro de Encuentro con la Naturaleza y Terapia Social 'Garupamba' ubicado a 75km al sur del cantón Cuenca (ver Figura 2.15), debido a que al ser un sector alejado donde la red eléctrica no se encuentra en las cercanías, sin embargo el centro educativo está bastante expuesto al viento y por tal razón se procedió a instalar el aerogenerador. (ProViento S.A, 2017)



Figura 2.15: Aerogenerador en Garupamba

Fuente: ProViento S.A.

2.5.1.5 ANÁLISIS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA DE UN MINI-PARQUE EÓLICO

Se trata de un proyecto de investigación previa a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico realizado en la Universidad Católica de Cuenca. El trabajo realizado consta de información referente a las formas de aprovechamiento del viento para su implementación en un parque eólico de aproximadamente 600 kW. (Bajaña, 2013)

Sin embargo, el estudio fue solo realizado de manera teórica, donde se analizan los diferentes elementos que forman parte de un sistema eólico de generación eléctrica, así como cotizaciones de los elementos y materiales con el objetivo de plantearlo como un proyecto a largo plazo accesible para usuarios interesados. (Bajaña, 2013)

2.5.1.6 MINI-PARQUE EÓLICO EN LA GRANJA IRQUIS DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA

Este mini-parque eólico, que es el centro de la investigación del presente trabajo, está ubicado en la parroquia Victoria del Portete, en la vía Cuenca – Girón (km 23), con una altura de 2663 metros sobre el nivel mar donde se



realizará la obtención de los parámetros eléctricos de generación de los aerogeneradores de manera simultánea para los tres aerogeneradores instalados, realizar un análisis con los datos primarios de viento obtenidos de las mediciones propias de la región y presentarse como un estudio pionero de este tipo de tecnología, que como se ha visto, a pesar de los proyectos existentes, los cuales son escasos, ninguno de ellos presenta un estudio técnico para validarlo. En el capítulo 3 se ampliará el análisis de este mini-parque eólico

3 CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

En este capítulo, se tratarán aspectos importantes que contribuirán al cumplimiento de los objetivos planteados al inicio del proyecto tales como el análisis de las variables que afectan al funcionamiento del mini-parque eólico en análisis y la evaluación de las características técnicas de los aerogeneradores instalados. Así, se presenta también el procedimiento para la comparación de los parámetros obtenidos con las mediciones realizadas en los tres aerogeneradores bajo las condiciones encontradas en la zona.

Inicialmente, se presenta una introducción del mini-parque eólico de la Universidad de Cuenca, y adicionalmente de los equipos que se usarán para el desarrollo del proyecto, tales como los aerogeneradores y el equipo de medición para obtención de los parámetros requeridos.

3.1 MINI-PARQUE EÓLICO EN LA GRANJA IRQUIS DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA

El mini-parque eólico consta de tres aerogeneradores de pequeña potencia, dos ENAIR E70pro de eje horizontal de 5 kWc/u, y un aerogenerador ENAIR-Toyoda de eje vertical de 5 kW, formando en su conjunto un parque de 15 kW de potencia, el cual de acuerdo de la Tabla 2.1, está dentro de la categoría de energía mini-eólica. La instalación de los aerogeneradores está realizada de tal manera que un aerogenerador de eje horizontal está a la misma altura que el aerogenerador de eje vertical, siendo ésta de 18 metros. El aerogenerador de eje horizontal faltante está ubicado a una altura de 24 metros. (Ver Figura 3.1)



Figura 3.1: Aerogeneradores de la Granja Irquis de la Universidad de Cuenca

Fuente: Autor

3.2 ANEMÓMETRO NRG 40C

Este anemómetro perteneciente a NRGSystems, fue uno de los primeros modelos de anemómetros diseñados para la industria eólica principalmente, y se lo puede observar en la Figura 3.2. Presenta un bajo momento de inercia por lo que permiten una rápida respuesta ante ráfagas de viento y momentos de calma, pues presenta un rango de medición de velocidad entre 1m/s y 96m/s. (nrgsystems.com)



Figura 3.2: Anemómetro NRG 40C

Fuente: <https://www.nrgsystems.com/products/met-sensors/anemometers/detail/40c-anemometer>

En la granja Iruquis de la Universidad de Cuenca, y gracias a un convenio con la empresa generadora del Austro ELCAUSTRO S.A se encuentran instalados en una torre de medición dos anemómetros NRG 40C, los cuales están ubicados a una altura de 15m y 26m respectivamente, de los cuales se han obtenido las velocidades de viento a dichas alturas propias de la zona. En la sección 3.7, realizaremos un análisis de los datos obtenidos.

3.3 VELETA NRG 200P

Esta veleta o sensor de dirección pertenece a NRGSystems, la cual es construida de material termoplástico y acero inoxidable, es resistente a la corrosión y presenta una alta relación entre resistencia y peso, se puede ver a este equipo en la Figura 3.3.



Figura 3.3: Veleta NRG 200P

Fuente: <https://www.nrgsystems.com/products/met-sensors/wind-direction-vanes/detail/200p-wind-vane>

Esta veleta se encuentra también ubicada en la Granja Irquis de la Universidad de Cuenca, a una altura de 26m junto a uno de los anemómetros, y cuyos datos obtenidos de las mediciones serán presentados en la Sección 3.7.

3.4 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS AEROGENERADORES

Es importante tener conocimiento de las características técnicas de cada una de las máquinas aerogeneradoras instaladas con el fin de evaluar de mejor manera las capacidades de generación, que representará el potencial eólico, el mismo que dependerá del comportamiento del recurso eólico en la zona, el cual se presentará en la Sección 3.6.

3.4.1 TURBINA EÓLICA ENAIR E70 PRO

Se trata de una turbina tipo rotor de eje horizontal a barlovento de 3 palas (ver Figura 3.4) que forman un diámetro de 4.3 metros, con área de barrido de 14.5m². (ENAIR)



Figura 3.4: Turbina eólica ENAIR 70 PRO ubicada en la granja Irquis

Fuente: Autor

La turbina necesita una velocidad de viento de arranque de 2 m/s y alcanza una velocidad nominal de 11 m/s, a la que alcanza una potencia nominal de 4000W (ENAIR). Las curvas de potencia y energía se observan en la Figura 3.5 y 3.6, respectivamente.

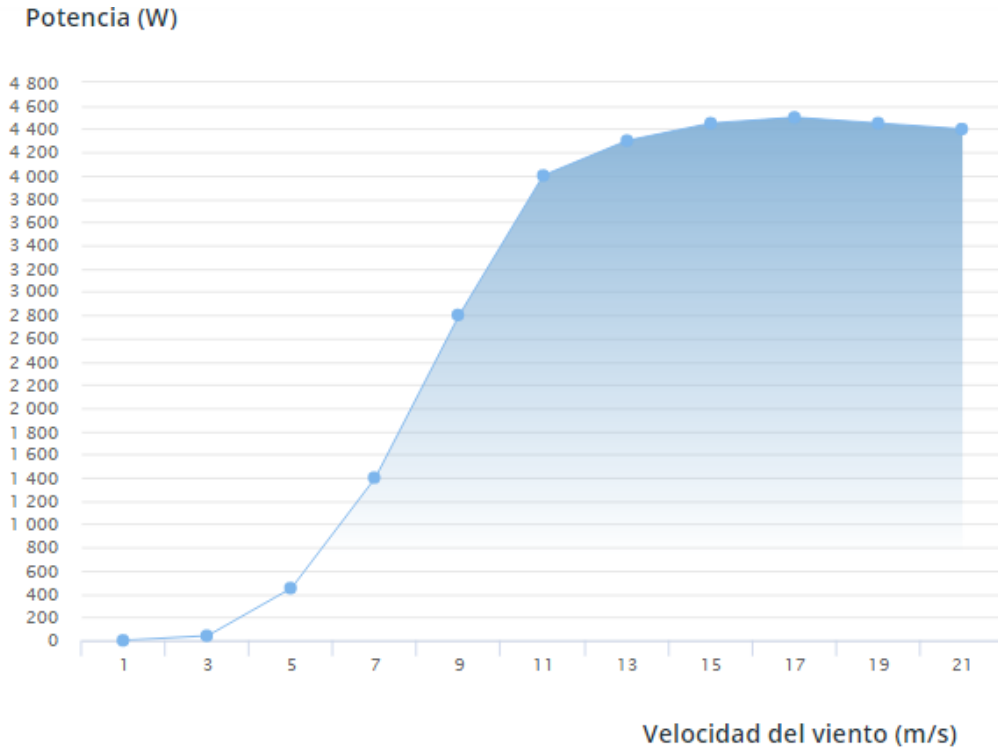


Figura 3.5: Curva de potencia del Aerogenerador ENAIR E70 PRO

Fuente: <https://www.enair.es/es/aerogeneradores/e70pro>

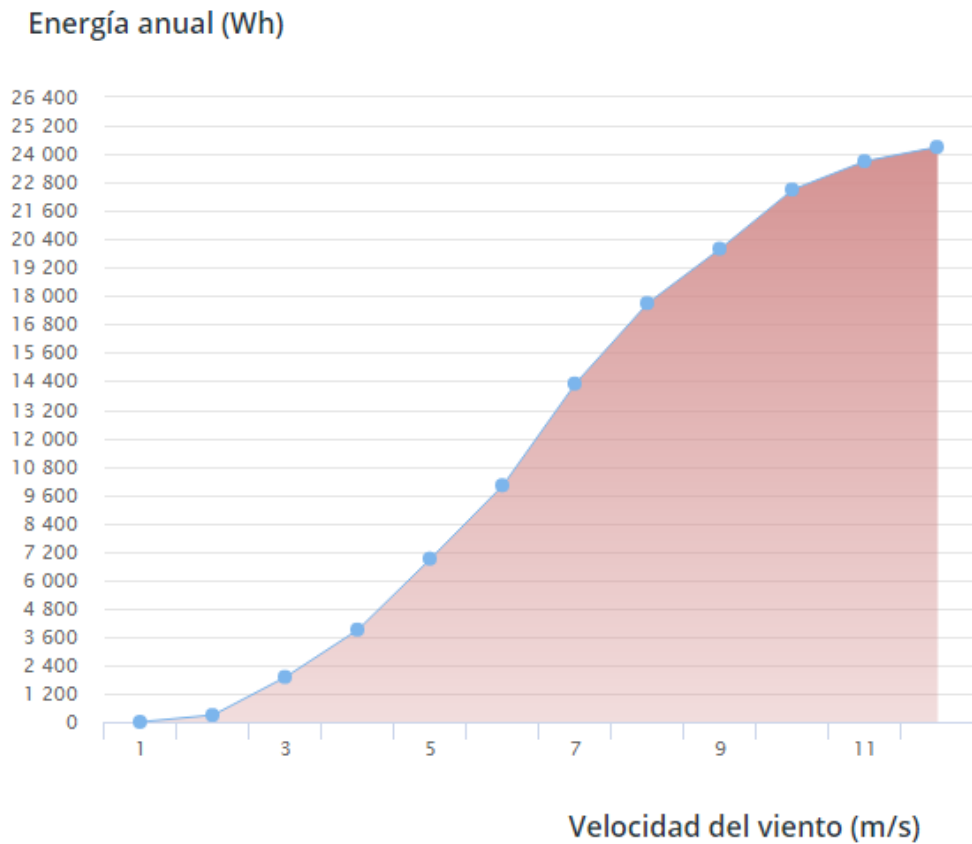


Figura 3.6: Curva de Energía del Aerogenerador ENAIR E70 PRO

Fuente: <https://www.enair.es/es/aerogeneradores/e70pro>

3.4.2 TURBINA EÓLICA TYD-WT-5000

Este equipo es fabricado por la empresa Toyoda Technology Group, y se trata de un aerogenerador de eje vertical de 3 palas, con una potencia nominal de 5 kW. La longitud de las palas es de 5.5m, un diámetro de 3.5 metros y necesita una velocidad de arranque de 2.5m/s alcanzando una velocidad nominal de 12m/s con 100rpm (Toyoda Technology Group). Este aerogenerador fue provisto por la empresa ENAIR, quienes realizaron pequeñas modificaciones en las estructuras de apoyo. (Ver Figura 3.7)



Figura 3.7: Aerogenerador de eje vertical TYD-WT-5000 en la granja Irquis

Fuente: Autor

Se presentan las curvas de potencia y energía del aerogenerador en las Figuras 3.8 y 3.9, respectivamente.

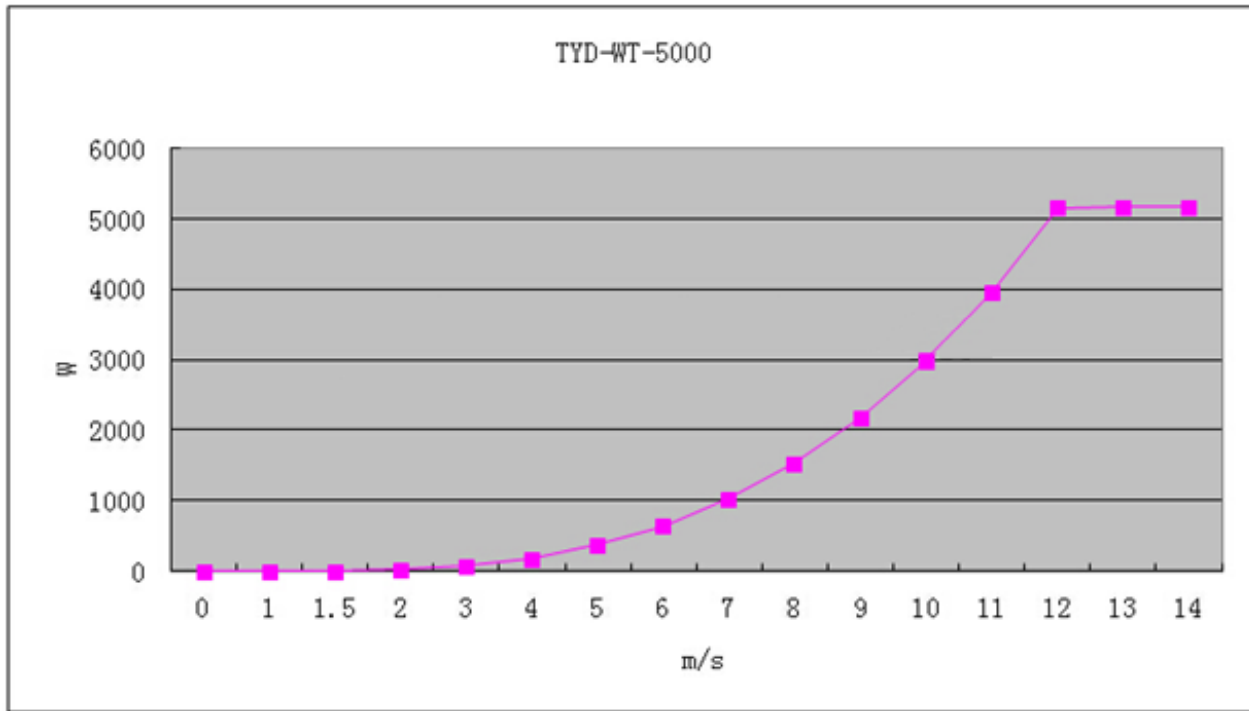


Figura 3.8: Curva de potencia del Aerogenerador Toyoda TYD-Wt-5000

Fuente: Alibaba Group

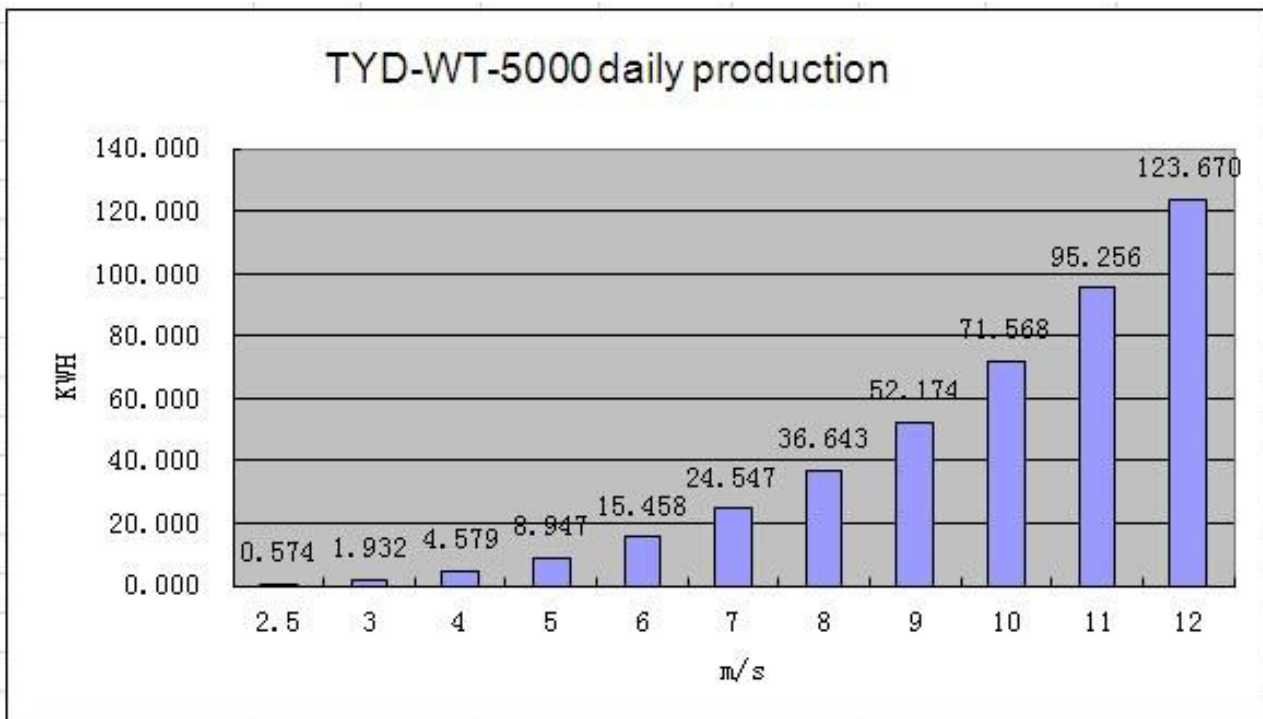


Figura 3.9: Curva de energía del Aerogenerador Toyoda TYD-Wt-5000

Fuente: Alibaba Group



3.5 COMPORTAMIENTO Y POTENCIAL DEL RECURSO EÓLICO EN EL MINI-PARQUE EÓLICO DE LA GRANJA IRQUIS DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA

El análisis y la evaluación del potencial eólico propio de la zona es un punto clave en el proyecto, pues se trata de la obtención de los datos acerca del recurso eólico (viento), de manera primaria. Es decir, los perfiles de viento obtenidos de los registros pertenecen específicamente a la zona donde los aerogeneradores tienen su puesta en marcha, siendo esta información muy valiosa debido a la inexistencia de este tipo de estudios en el Ecuador a conocimiento del autor, por lo que se podrá realizar una evaluación y análisis técnico más puntual de los equipos aerogeneradores, así como de su producción bajo las condiciones existentes propias en la zona.

Inicialmente, a razón del cumplir el primer objetivo planteado en el proyecto, con ayuda del anemómetro NRG 40C y la veleta NRG 200P, se han realizado mediciones de la velocidad y dirección del viento respectivamente. Esta información es accesible gracias al convenio que mantiene la Universidad de Cuenca con Elecaustro S.A. El registrador de datos realiza una medición cada 2 segundos los cuales son almacenados en una memoria volátil (Sumba H, ELECAUSTRO S.A, 2018), luego se obtiene un promedio de las mediciones en intervalos de 10 minutos (de 0h00 a 23h50), de manera diaria. En el presente caso, la información se obtuvo entre los meses de abril de 2017 hasta el 21 de enero de 2018 de manera continua, en este punto se interrumpió la adquisición de datos debido a tareas de mantenimiento, reanudando la toma de datos desde el 22 de febrero de 2018 hasta el 18 de marzo de 2018 representando un tiempo de mediciones suficiente para tener una idea clara del comportamiento del recurso eólico en la zona durante todo un año. (ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca, 2018)

Debido a la cantidad de información, se la ha agrupado de tal manera que, para todos los datos obtenidos sobre la velocidad del viento por cada mes, se ha realizado un promedio de manera horaria. Es decir, se ha tomado cada día del mes y se ha sacado un promedio de los valores registrados a la hora 00h00, 01h00, 02h00 y así hasta las 23h00. Las Tablas relacionadas a estos datos se presentan en el Anexo 3.

Las Figuras 3.11, 3.12 y 3.13 muestran el comportamiento del viento en el mini-parque eólico de la Granja Irquis de la Universidad de Cuenca para tres meses representativos del año. Sin embargo, en el Anexo 4, se encuentran las curvas de velocidad de viento diario obtenidas para cada uno de los meses analizados.

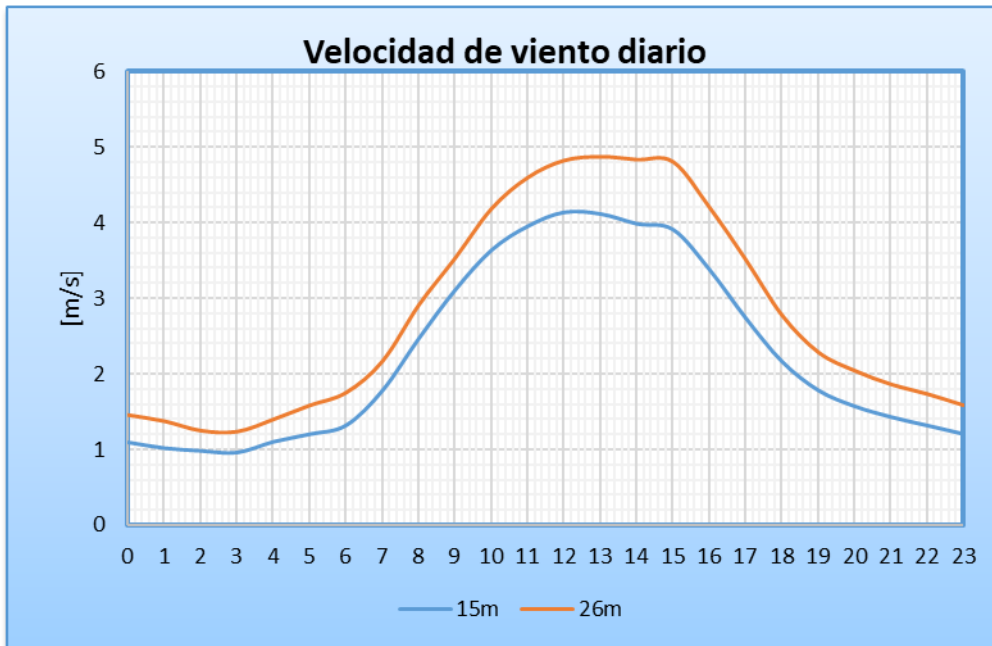


Figura 3.10: Curva de velocidad del viento en el mes de abril, 2017

Fuente: ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca, 2018

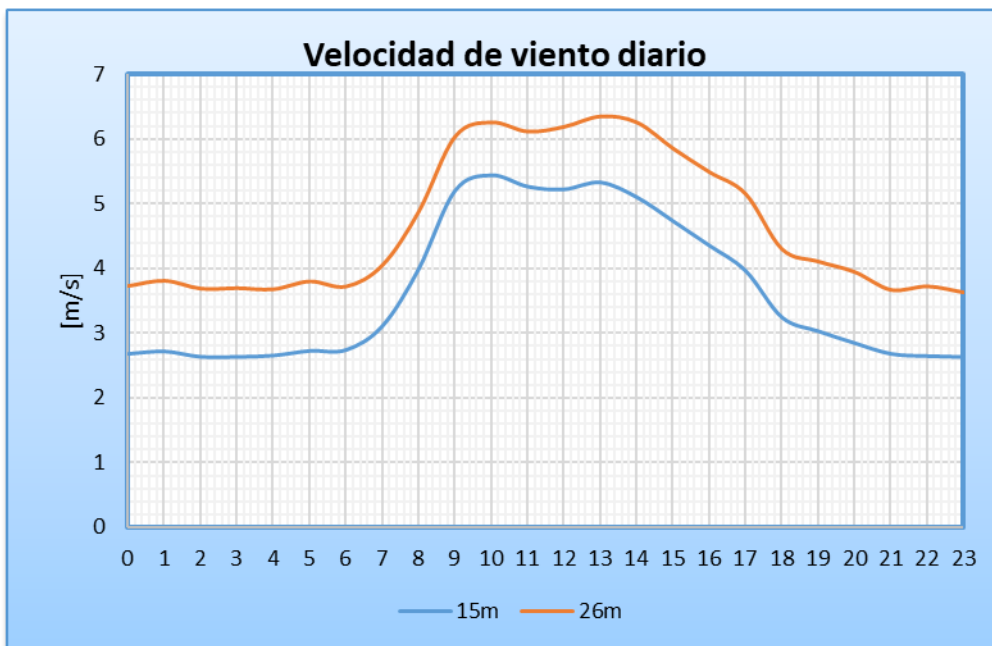


Figura 3.11: Curva de velocidad del viento en el mes de julio, 2017

Fuente: ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca, 2018

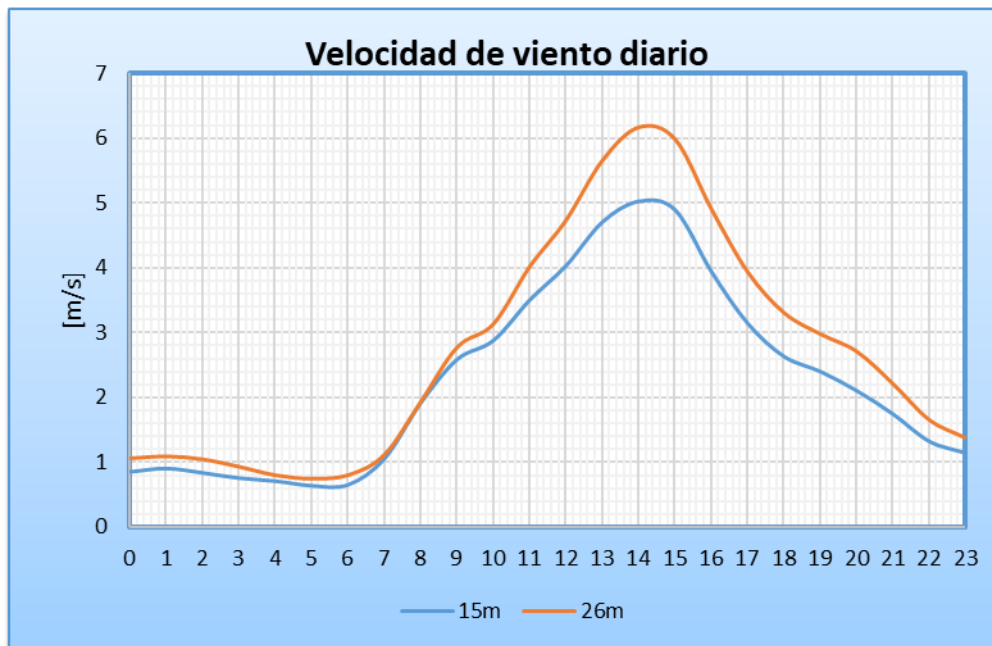


Figura 3.12: Curva de velocidad del viento en el mes de enero, 2018

Fuente: ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca, 2018

Las Figuras 3.10, 3.11 y 3.12 han sido escogidas debido a que representan los tres patrones más importantes encontrados a lo largo de todos los meses. Es importante tener en cuenta que el anemómetro que presentan los datos de la velocidad del viento a 15 metros de altura, será usado para el análisis de los aerogeneradores ubicados a 18 metros de altura. En tanto que, la información del anemómetro ubicado a 26 metros de altura será útil para analizar el aerogenerador que está a 24 metros de altura.

Inicialmente, la Figura 3.10 nos muestra el comportamiento de la velocidad del viento para el mes de abril de 2017. El cual, de los resultados obtenidos a lo largo de todas las mediciones es el comportamiento más similar al de algunos otros meses (mayo, junio, agosto, septiembre y octubre de 2017 y marzo de 2018). Dicho comportamiento se refleja en que aproximadamente al iniciar la mañana (6h00 – 7h00), la velocidad del viento se ve con un incremento, el mismo que se mantiene en un máximo por alrededor de 3 horas (de 12h00 a 15h00) para luego decaer en su velocidad. En teoría, con este comportamiento, los aerogeneradores ubicados a 18 metros de altura podrían empezar la producir energía entre las 7h30 para el aerogenerador de eje horizontal y las 8h00 para el de eje vertical, mientras que entre las 17h00 y 18h00, los aerogeneradores dejarían de producir. En tanto, para el aerogenerador de eje horizontal a 24 metros de altura, su producción de energía podría comenzar un poco antes de las 7h00 y mantenerse así hasta aproximadamente las 20h00, hora en que la generación de energía se detendría. Todo esto debido a las velocidades de arranque necesarias de cada aerogenerador, tal como se vio en las Secciones 3.4 y 3.5.

El segundo caso (Figura 3.11), se presenta específicamente en el mes de julio de 2017, si bien la forma de la curva de velocidad del viento guarda semejanza con la de la Figura 3.11, existe una característica muy particular. Como se vio en la Sección 3.4, la velocidad de arranque para los aerogeneradores de eje horizontal es de 2 m/s, mientras que en la Sección 3.5, nos muestra que la velocidad de arranque para el aerogenerador de eje vertical es de 2,5 m/s, lo que significaría que los tres aerogeneradores permanecerían en constante generación de energía a lo largo de todo el mes, situación que en los demás meses no se presentaría.

Finalmente, la Figura 3.12 (enero, 2018) nos muestra un último comportamiento característico de la zona. A pesar de nuevamente observar similitud con los comportamientos anteriores, la Figura presenta un pico mucho más pronunciado, lo cual se refleja en que los aerogeneradores empezarían su funcionamiento entre las 8h00 y 9h00 y de allí tener una característica creciente alcanzando su punto máximo aproximadamente a las 14h00, para luego decrecer y detener la generación aproximadamente entre las 18h00 para el aerogenerador de eje vertical, y a las 20h00 para el aerogenerador de eje horizontal a 18 metros, y las 21h00 para el aerogenerador de eje horizontal a 24 metros. Comportamientos similares se observaron en los meses de noviembre y diciembre de 2017, así como para febrero de 2018.

Como se puede observar en las Figuras previas, todas comparten un patrón parecido en cuanto a su forma de curva. Sin embargo, no solo existe ese comportamiento con el viento, sino que las curvas encontradas también presentan similitud con la Figura 3.13.

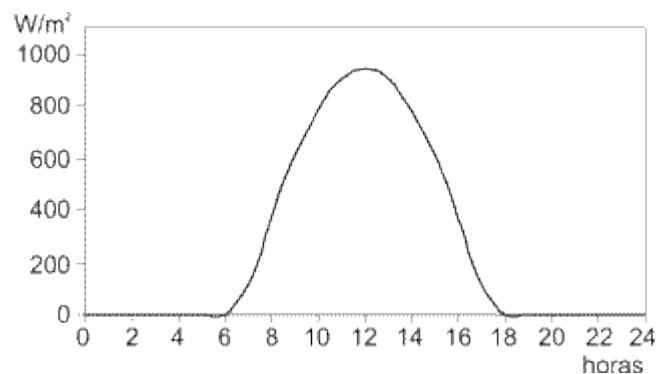


Figura 3.13: Distribución horaria de la irradiancia solar sin nubes

Fuente:

<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia22/HTML/articulo03.htm>

La Figura 3.13 nos muestra el comportamiento del sol a lo largo del día, lo cual si lo comparamos con las Figuras 3.10, 3.11 y 3.12, se puede encontrar cierta aproximación, especialmente viendo que entre las 6h00 y las 7h00 la velocidad del viento empieza a tener una característica creciente, de manera similar al sol. Así mismo, podemos observar que los valores máximos alcanzados están presentes a la mitad del día. Finalmente, aproximadamente en la media tarde es cuando tanto la irradiancia solar, así como la velocidad del viento en la



Granja Iruquis, empieza a mostrar un carácter decreciente. Visto aquello, los resultados nos muestran un comportamiento muy característico del viento en la zona que, a más de ser muy similares entre ellas, son también muy parecidas al comportamiento solar. Este comportamiento, podría atribuirse a las condiciones propias de la región interandina, la cual requiere un análisis meteorológico más detallado que escapa al alcance del presente estudio.

Con la información disponible tanto del recurso eólico como de los equipos instalados, es posible estimar la producción de energía del mini-parque. Los resultados de la estimación energética de los tres aerogeneradores se presentan en el Capítulo 4.



4 CAPÍTULO 4. RESULTADOS

En el presente capítulo se presenta la estimación de la producción energética de los aerogeneradores instalados, bajo las condiciones existentes en la zona. Para realizar esta estimación, en lo que se refiere a los aerogeneradores de eje horizontal se hará uso de la aplicación propia de la empresa ENAIR, denominada “Cálculo de producción eólica y solar” (Enair). En tanto que para el aerogenerador de eje vertical Toyoda TYD-WT-5000 se hará uso de las curvas características de potencia y energía del equipo, obtenidas del catálogo correspondiente (Anexo 2) y presentadas en la Sección 3.4.2.

4.1 PRODUCCIÓN ENERGÉTICA DE AEROGENERADOR ENAIR E70PRO

Para los aerogeneradores de eje horizontal (5 kW) de la empresa Enair, con ayuda de la ecuación (3), y considerando sus valores nominales, obtenemos el TSR:

$$TSR = 5,1169$$

Con el resultado obtenido, para el valor 5,11 en la Figura 4.1, se obtendrá un valor aproximado del 40,3% ($C_p = 0,403$). Sin embargo, el coeficiente de potencia puede variar en cierto grado dependiendo de la empresa fabricante del equipo, por tal razón, haremos uso de la ecuación (2) para despejar y obtener el coeficiente de potencia, teniendo en cuenta que la densidad del aire en condiciones normales es de $1,225 \text{ kg/m}^3$, y además basados en los datos técnicos del aerogenerador (Anexo 1). De la Figura 3.5 se ve que para una velocidad de 5 m/s, se obtiene una potencia de 450 W, entonces, de la ecuación (1) se obtiene que:

$$C_p = 0,405$$

Como se puede observar, el coeficiente de potencia es prácticamente el mismo. Por esta razón, más adelante en la Sección 4.2 se hará uso de esta metodología para la obtención del coeficiente de potencia del aerogenerador de eje vertical.

La empresa ENAIR presenta una herramienta de cálculo de producción de energía propia de sus aerogeneradores. Esta herramienta consta de un atlas eólico y solar mundial, donde se puede ubicar un punto en el mapa ya sea pulsando sobre un lugar de interés, o insertando las coordenadas manuales del sitio requerido mediante su longitud y latitud. Con ayuda de la herramienta Google Maps, se encontraron las coordenadas de la Granja Irquis de la Universidad de Cuenca, tal como se ve en la Figura 4.1. Una vez obtenidas las coordenadas se las ingresó en el atlas eólico de la aplicación, como se ve en la Figura 4.2, donde A1 representa al aerogenerador de eje horizontal ubicado a 24 metros de altura, A2 el aerogenerador de eje horizontal ubicado a 18 metros de altura y finalmente A3 representa al aerogenerador de eje vertical a 18 metros de altura.

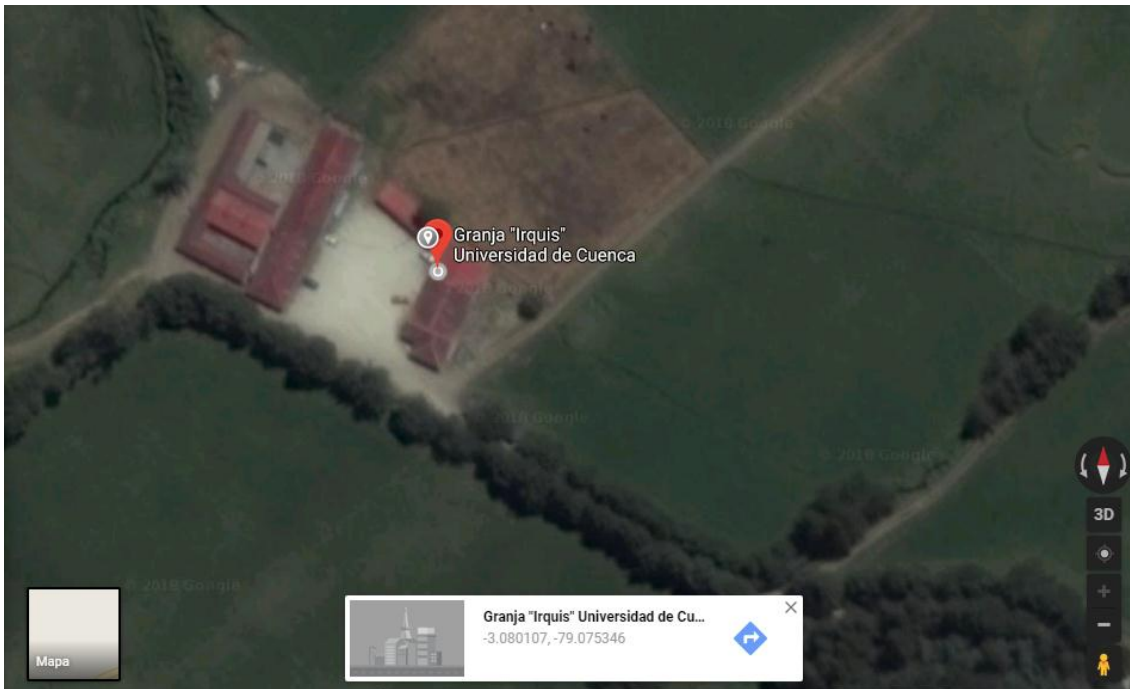


Figura 4.1: Coordenadas de longitud y latitud de la Granja Irquis de la Universidad de Cuenca

Fuente: Google Maps

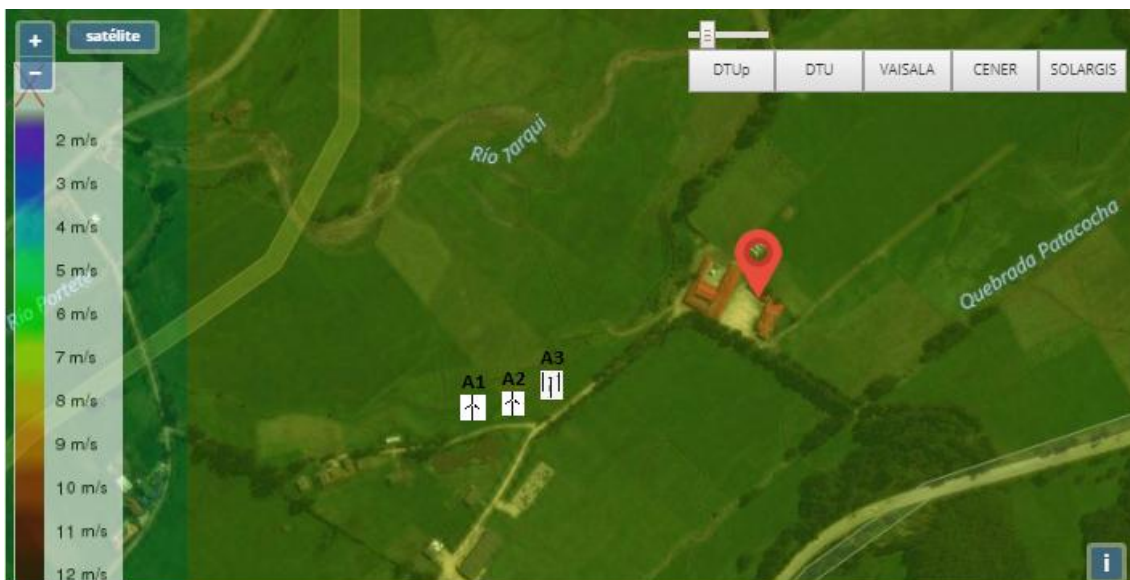


Figura 4.2: Ubicación de la Granja Irquis de la Universidad de Cuenca en el atlas eólico

Fuente: <https://www.enair.es/es/app>

Una ventaja que presenta la aplicación y dentro de ella el atlas eólico, es que al ubicar el punto de interés también contiene la información referente a la altitud del terreno. La aplicación da como resultado una altitud de 2649.3 m.s.n.m., siendo esta muy cercana a la original (2663 m.s.n.m), considerada en la

Sección 2.5.1.6. Adicionalmente, dentro de las configuraciones, se permite elegir el modelo del aerogenerador, que en el caso del presente proyecto se trata del aerogenerador Enair 70PRO. Se puede también seleccionar la rugosidad del terreno e ingresar la altura sobre el suelo a la cual el aerogenerador está ubicado. Finalmente, es posible ingresar la velocidad media del viento en m/s. Con lo cual, al ir alimentando los datos registrados de la velocidad del viento que se mostraron en la Sección 3.6, se irán obteniendo las estimaciones de los valores de producción de energía del aerogenerador. La Figura 4.3 muestra la interfaz de la aplicación.

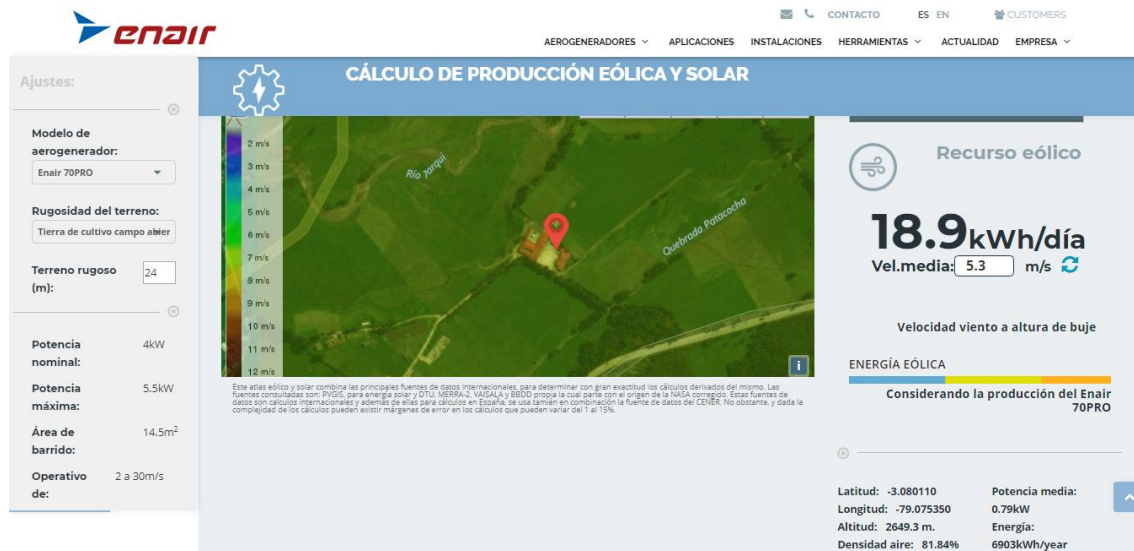


Figura 4.3: Interfaz de la aplicación de cálculo de producción eólica de la empresa Enair.

Fuente: enair.es

4.1.1 ESTIMACIÓN DE ENERGÍA DE LA TURBINA EÓLICA ENAIR 70PRO UBICADA A 18 METROS DE ALTURA

La Figura 4.4 presenta la curva de energía para las turbinas eólicas Enair 70Pro bajo las condiciones existentes en la zona. La curva ha sido obtenida mediante la obtención de datos de la aplicación del cálculo de producción eólica de la empresa Enair.

Las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3 presentan los resultados de las aproximaciones obtenidas para los meses de abril y julio de 2017, así como para enero de 2018, respectivamente. La velocidad promedio horaria ha sido obtenida de la información proporcionada por los anemómetros de la torre de medición, de propiedad de ELECAUSTRO S.A, instalada en el sitio.

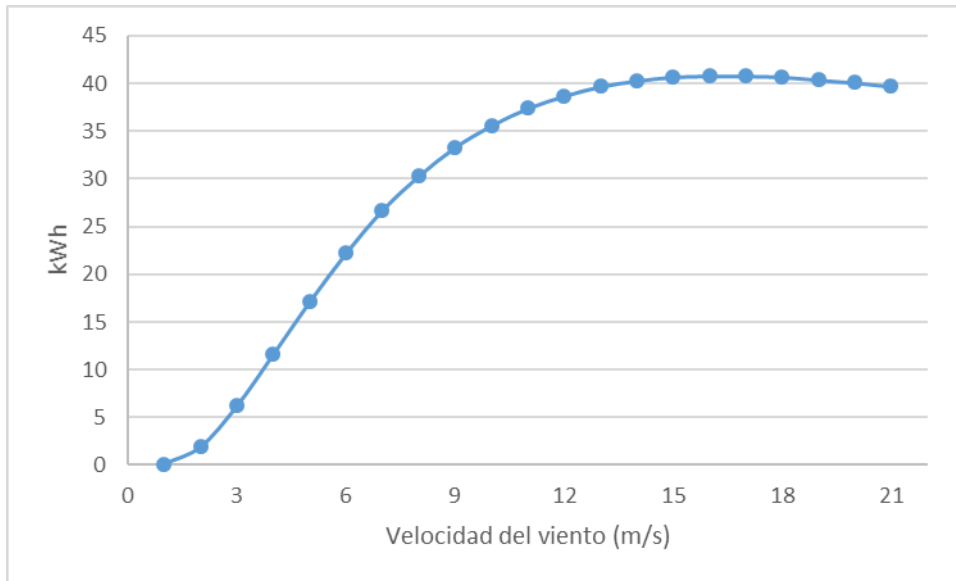


Figura 4.4: Curva de energía de aerogeneradores de eje horizontal bajo las condiciones de la zona

La Tabla 4.1 muestra que, para un día típico del mes de abril se puede obtener un promedio estimado de 4,18 kWh/día de energía con este aerogenerador. De allí que, para el mes de abril se podría obtener un total de 125,4 kWh/mes.

Tabla 4.1: Promedio de energía estimada por el aerogenerador Enair 70PRO a 18m de altura (abril, 2017)

Fuente: Elaboración propia

Hora	Velocidad [m/s]	Energía Producida [kWh/día]	Hora	Velocidad [m/s]	Energía Producida [kWh/día]
0	1,09	0,2	12	4,14	12,4
1	1,02	0,1	13	4,12	12,3
2	0,98	0,1	14	3,99	11,5
3	0,96	0,1	15	3,91	11,1
4	1,10	0,2	16	3,38	8,2
5	1,20	0,3	17	2,74	4,9
6	1,32	0,4	18	2,16	2,5
7	1,78	1,3	19	1,78	1,3
8	2,47	3,7	20	1,57	0,8
9	3,11	6,7	21	1,43	0,6
10	3,64	9,6	22	1,32	0,4
11	3,96	11,4	23	1,20	0,3
Promedio día [kWh/día]					
4,18					



Adicionalmente, como se mencionó en la Sección 3.6, el comportamiento de la curva del viento del mes de abril guarda similitud a los meses de marzo, mayo, junio, agosto, septiembre y octubre, por esta razón, para los meses de abril, junio y septiembre se podría obtener un total de 125,4 kWh/mes, al ser meses de 30 días. En tanto que para los meses de marzo, mayo, agosto y octubre se obtendría aproximadamente 129,58 kWh/mes, al ser meses de 31 días.

La Tabla 4.2 presenta el promedio estimado de la producción de energía en un día del mes de julio, siendo esta de 9,78 kWh/día. Al ser un mes de 31 días, la energía promedio que se podría obtener en el mes es de 303,18 kWh/mes, siendo el valor más alto, que además como se vio en la Sección 3.6, es una característica propia del mes.

Tabla 4.2: Promedio de energía estimada por el aerogenerador Enair 70PRO a 18m de altura (julio, 2017)

Fuente: Elaboración propia

Hora	Velocidad [m/s]	Energía Producida [kWh/día]	Hora	Velocidad [m/s]	Energía Producida [kWh/día]
0	2,68	4,6	12	5,22	18,3
1	2,71	4,8	13	5,32	18,8
2	2,63	4,4	14	5,10	17,7
3	2,63	4,4	15	4,73	15,7
4	2,65	4,5	16	4,35	13,6
5	2,72	4,8	17	3,96	11,4
6	2,74	4,9	18	3,24	7,4
7	3,11	6,7	19	3,02	6,3
8	3,99	11,5	20	2,84	5,4
9	5,20	18,2	21	2,68	4,6
10	5,44	19,5	22	2,64	4,4
11	5,26	18,5	23	2,63	4,4
Promedio día [kWh/día]					
9,78					

La Tabla 4.3 presenta el promedio estimado que se puede obtener en un día del mes de enero, siendo de 4,64 kWh/día. Como se vio en la Sección 3.6, el comportamiento del recurso eólico en el mes de enero de 2018 es semejante para los meses de febrero, noviembre y diciembre. Siendo así, para el mes de noviembre al tener 30 días, se puede obtener promedio mensual de energía de 139,2 kWh/mes. Por otra parte, para los meses de 31 días como son diciembre y enero, se podría obtener 143,84 kWh/mes. Adicionalmente, febrero al ser un mes de solo 28 días, se podría obtener un total de 129,92kWh/mes.

Tabla 4.3: Promedio de energía estimada por el aerogenerador Enair 70PRO a 18m de altura (enero, 2018)

Fuente: Elaboración propia

Hora	Velocidad [m/s]	Energía Producida [kWh/día]	Hora	Velocidad [m/s]	Energía Producida [kWh/día]
0	0,85	0	12	4,03	11,8
1	0,90	0,1	13	4,71	15,6
2	0,84	0	14	5,03	17,3
3	0,75	0	15	4,89	16,5
4	0,71	0	16	3,94	11,3
5	0,64	0	17	3,14	6,9
6	0,65	0	18	2,63	4,4
7	1,06	0,2	19	2,40	3,4
8	1,92	1,07	20	2,10	2,3
9	2,59	4,2	21	1,74	1,2
10	2,88	5,6	22	1,32	0,4
11	3,51	8,9	23	1,14	0,2
Promedio día [kWh/día]					
4,64					

4.1.2 ESTIMACIÓN DE ENERGÍA DE LA TURBINA EÓLICA ENAIR 70PRO UBICADA A 24 METROS DE ALTURA

A continuación, las Tablas 4.4, 4.5 y 4.6 presentan los resultados aproximados obtenidos para la energía producida por el aerogenerador ubicado a 24 metros de altura. De igual manera, la curva de energía es la presentada en la sección 4.1.1. (Figura 4.4)

En la Tabla 4.4 se puede observar un promedio energético de 6,23 kWh/día, con lo cual, de manera similar a lo realizado en la sección 4.1.1, para los meses de abril, junio y septiembre al ser meses de 30 días, se podría obtener un total de 186,9 kWh/mes. En tanto que para los meses de marzo, mayo, agosto y octubre se obtendría aproximadamente 193,13 kWh/mes, al ser meses de 31 días. Así mismo, se puede ver que, por efecto de la altura de la torre, este aerogenerador podría producir aproximadamente un 50% más de energía respecto a su similar ubicado a 18 m de altura. Este fenómeno se repite en los demás meses analizados.

Tabla 4.4: Promedio de energía estimada por el aerogenerador Enair 70PRO a 24m de altura (abril, 2017)

Fuente: Elaboración propia

Hora	Velocidad [m/s]	Energía Producida [kWh/día]	Hora	Velocidad [m/s]	Energía Producida [kWh/día]
0	1,46	0,6	12	4,83	16,2
1	1,37	0,5	13	4,88	16,5
2	1,25	0,3	14	4,84	16,3
3	1,24	0,3	15	4,81	16,1
4	1,40	0,5	16	4,21	12,8
5	1,58	0,8	17	3,51	8,9
6	1,75	1,2	18	2,78	5,1
7	2,17	2,5	19	2,29	2,9
8	2,91	5,7	20	2,04	2,1
9	3,53	9	21	1,86	1,5
10	4,19	12,7	22	1,73	1,2
11	4,60	15	23	1,59	0,9
Promedio día [kWh/día]					
6,23					

Tabla 4.5: Promedio de energía estimada por el aerogenerador Enair 70PRO a 24m de altura (julio, 2017)

Fuente: Elaboración propia

Hora	Velocidad [m/s]	Energía Producida [kWh/día]	Hora	Velocidad [m/s]	Energía Producida [kWh/día]
0	3,72	10	12	6,18	23,1
1	3,80	10,5	13	6,34	23,8
2	3,68	9,8	14	6,25	23,4
3	3,69	9,9	15	5,84	21,5
4	3,67	9,7	16	5,48	19,7
5	3,79	10,4	17	5,14	17,9
6	3,71	10	18	4,29	13,2
7	4,04	11,8	19	4,10	12,2
8	4,87	16,4	20	3,94	11,3
9	6,03	22,4	21	3,66	9,7
10	6,25	23,4	22	3,72	10
11	6,11	22,8	23	3,62	9,5
Promedio día [kWh/día]					
15,10					



Como se esperaba, de la Tabla 4.5 se ve que la producción promedio de energía para el mes de julio es la más alta con un promedio de 15,10 kWh/día, dándonos con ello un promedio de 468,1 kWh/mes.

La Tabla 4.6 muestra que para el mes de enero de 2018 existe un promedio de 6,59 kWh/día, lo cual es un valor semejante al del mes de abril de 2017. Adicionalmente y de manera similar a lo realizado en la Sección 4.1.1, febrero al tener 28 días podría tener un aproximado de 184,52kWh/mes; para el mes de noviembre que posee 30 días, habrá un promedio mensual de energía de 197,7 kWh/mes. Por otra parte, para los meses de 31 días como lo son diciembre y enero, se podría obtener 204,29 kWh/mes.

Tabla 4.6: Promedio de energía estimada por el aerogenerador Enair 70PRO a 24m de altura (enero, 2018)

Fuente: Elaboración propia

Hora	Velocidad [m/s]	Energía Producida [kWh/día]	Hora	Velocidad [m/s]	Energía Producida [kWh/día]
0	1,06	0,2	12	4,73	15,7
1	1,09	0,2	13	5,66	20,6
2	1,04	0,1	14	6,17	23,1
3	0,93	0,1	15	5,98	22,2
4	0,80	0	16	4,90	16,6
5	0,74	0	17	3,93	11,2
6	0,80	0	18	3,30	7,7
7	1,11	0,2	19	2,98	6,1
8	1,93	1,7	20	2,71	4,8
9	2,77	5	21	2,21	2,6
10	3,13	6,8	22	1,65	1
11	4,02	11,7	23	1,37	0,5
Promedio día [kWh/día]					
6,59					

4.2 ESTIMACIÓN ENERGÉTICA DE LA TURBINA EÓLICA TOYODA TYD-WT-5000 UBICADA A 18 METROS DE ALTURA

Como se vio en la Sección 4.1, inicialmente se realiza el cálculo del coeficiente de potencia del aerogenerador, teniendo en cuenta que la densidad del aire en condiciones normales es 1,225 kg/m³ (Danish Wind Industry Association, n.d.). Adicionalmente, para los aerogeneradores de eje vertical, y en este caso en particular se trata de un modelo con rotor tipo Giromill, el área de barrido viene dado por la longitud de las palas multiplicada por el diámetro del rotor (D'Ambrosio & Medaglia, 2010). Además de aquello, con ayuda de la Figura 3.8, para una velocidad de 7 m/s, se obtiene una potencia aproximada de 1 kW.



Con ello, y conociendo las características técnicas del aerogenerador (Anexo 2), despejamos de la ecuación (2) y obtenemos:

$$C_p = 0,272$$

Como en la Sección 4.1 se constató que el valor obtenido mediante esta manera de cálculo presenta un resultado muy aceptable, se tomará el valor del coeficiente de potencia de 0,272. Sin embargo, para corroborar el valor obtenido en el presente proyecto, teniendo en cuenta la poca existencia de referencias de este tipo, se ha considerado un estudio realizado para el diseño de una turbina Giromill denominado “Power coefficient measurement on a 12 kW straight bladed vertical axis wind” (Kjellin et al., 2011), donde se presenta como resultado que el coeficiente de potencia alcanzó un máximo de 0.29. Adicionalmente, en el estudio denominado “Medium-solidity Vertical Axis Wind Turbines for use in Urban Environments” (Tullis, Fiedler, McLaren, & Ziada, 2008), para un aerogenerador comercial de 2,5 kW de eje vertical, dio como resultado un coeficiente de potencia pico de aproximadamente 0.28. Por estas razones, el coeficiente de potencia de 0.272 obtenido será tomado como el propio para el aerogenerador Toyoda TYD-WT-5000.

A diferencia de las turbinas eólicas Enair, Toyoda no cuenta con un software o una hoja de cálculo propia para la obtención de la energía del aerogenerador, razón por la cual se hará uso de las ecuaciones (2) y (4) para la obtención de la energía producida. Es importante tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) El coeficiente de potencia será aceptado como válido el obtenido mediante el proceso analítico, es decir: $C_p = 0,272$.
- b) Se debe tener en cuenta que la densidad de aire depende del lugar donde se encuentran los aerogeneradores, para ello, como se vio en la Sección 4.1, la altitud del terreno obtenida en la aplicación de Enair es muy cercana a la considerada originalmente, por lo tanto, es aceptable también tomar como válido una densidad del aire del 81,84% que provee la aplicación. Entonces para hallar el valor en kg/m^3 tenemos:

$$d = \frac{1,225 \cdot 81,84}{100}$$

$$d = 1,002 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

- c) El área de barrido para el aerogenerador será el producto entre la longitud de las palas y el diámetro del rotor.
- d) Para el cálculo de la energía, se obtendrá un promedio de la producción diaria de manera similar a la metodología usada en las Secciones 4.1.1 y 4.1.2.

Adicionalmente, la Figura 4.5, presenta la curva de potencia para el aerogenerador de eje vertical bajo las condiciones de la zona.

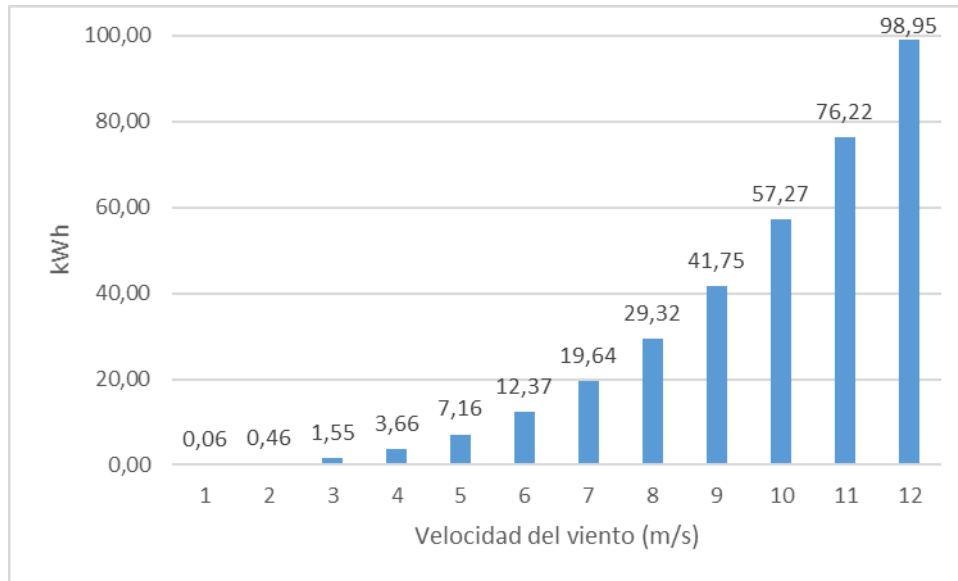


Figura 4.5: Curva de energía de aerogenerador de eje vertical bajo las condiciones de la zona

Teniendo en cuenta estas consideraciones, las Tablas 4.7, 4.8 y 4.9 presentan los resultados aproximados obtenidos de la producción de energía del aerogenerador de eje vertical instalado.

Tabla 4.7: Promedio de energía estimada por el aerogenerador Toyoda TYD-WT-5000 a 18m de altura (abril, 2017)

Fuente: Elaboración propia

Hora	Velocidad [m/s]	Energía Producida [kWh/día]	Hora	Velocidad [m/s]	Energía Producida [kWh/día]
0	1,09	0,07	12	4,14	4,07
1	1,02	0,06	13	4,12	4,00
2	0,98	0,05	14	3,99	3,64
3	0,96	0,05	15	3,91	3,43
4	1,10	0,08	16	3,38	2,22
5	1,20	0,10	17	2,74	1,18
6	1,32	0,13	18	2,16	0,58
7	1,78	0,32	19	1,78	0,32
8	2,47	0,86	20	1,57	0,22
9	3,11	1,73	21	1,43	0,17
10	3,64	2,76	22	1,32	0,13
11	3,96	3,55	23	1,20	0,10
Promedio día [kWh/día]					
1,24					



De manera similar, al tener una producción de 1,24 kWh/día obtenida en la Tabla 4.7 para el mes de abril, como se vio en la Sección 4.1.1, para los meses de abril, junio y septiembre se podría obtener un total de 37,2 kWh/mes, al ser meses de 30 días. Mientras que, para los meses de marzo, mayo, agosto y octubre se obtendría aproximadamente 38,44 kWh/mes, al ser meses de 31 días.

Para el mes de julio, de la Tabla 4.8 se observa que se tiene un promedio de 3,56 kWh/día, lo cual representa un total de 110,36 kWh/mes.

Tabla 4.8: Promedio de energía estimada por el aerogenerador Toyoda TYD-WT-5000 a 18m de altura (julio, 2017)

Fuente: Elaboración propia

Hora	Velocidad [m/s]	Energía Producida [kWh/día]	Hora	Velocidad [m/s]	Energía Producida [kWh/día]
0	2,68	1,10	12	5,22	8,13
1	2,71	1,14	13	5,32	8,65
2	2,63	1,04	14	5,10	7,58
3	2,63	1,04	15	4,73	6,05
4	2,65	1,07	16	4,35	4,70
5	2,72	1,15	17	3,96	3,55
6	2,74	1,17	18	3,24	1,94
7	3,11	1,72	19	3,02	1,58
8	3,99	3,64	20	2,84	1,31
9	5,20	8,04	21	2,68	1,10
10	5,44	9,20	22	2,64	1,06
11	5,26	8,33	23	2,63	1,04
Promedio día [kWh/día]					
3,56					

Finalmente, la Tabla 4.9 presenta un promedio de energía producida de 1,56 kWh/día, tal como se vio en la Sección 4.1.1, se puede relacionar el resultado a algunos meses, siendo así, para febrero con 28 días se podría obtener 43,68kWh/mes. Para noviembre con 30 días, se puede obtener promedio mensual de energía de 46,8 kWh/mes. Por otra parte, para los meses de 31 días como son diciembre y enero, se podría obtener 48,36 kWh/mes.

Tabla 4.9: Promedio de energía estimada por el aerogenerador Toyoda TYD-WT-5000 a 18m de altura (enero, 2018)

Fuente: Elaboración propia

Hora	Velocidad [m/s]	Energía Producida [kWh/día]	Hora	Velocidad [m/s]	Energía Producida [kWh/día]
0	0,85	0,04	12	4,03	3,76
1	0,90	0,04	13	4,71	5,98
2	0,84	0,03	14	5,03	7,27
3	0,75	0,02	15	4,89	6,71
4	0,71	0,02	16	3,94	3,51
5	0,64	0,01	17	3,14	1,78
6	0,65	0,02	18	2,63	1,04
7	1,06	0,07	19	2,40	0,79
8	1,92	0,40	20	2,10	0,53
9	2,59	0,99	21	1,74	0,30
10	2,88	1,37	22	1,32	0,13
11	3,51	2,47	23	1,14	0,09
Promedio día [kWh/día]					
1,56					

4.3 PRODUCCIÓN TOTAL ESTIMADA DE ENERGÍA DEL MINI-PARQUE EÓLICO DE LA GRANJA IRQUIS DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA

Con los resultados obtenidos en la sección precedente, en la Tabla 4.10, se presenta un resumen de la energía mensual producida por cada aerogenerador, así como también el total de la energía del mini-parque eólico Irquis.

La Tabla 4.10 presenta un resumen de la producción energética tanto individualmente, por aerogenerador, como de todo el mini-parque eólico. Inicialmente, realizando la comparación del aerogenerador de eje horizontal ENAIR 70Pro ubicado a 18 m de altura, junto con el aerogenerador de eje vertical Toyoda, la turbina eólica Enair presenta una mejor producción de energía que la turbina eólica Toyoda.



Tabla 4.10: Resumen energía producida estimada para los diferentes meses

Fuente: Elaboración propia

	Energía producida kWh/mes			Total de energía del mini-parque kWh/mes
	ENAIR 70Pro	Toyoda	ENAIR 70Pro	
	18 metros		24 metros	
Enero	143,84	48,36	204,29	396,49
Febrero	129,92	43,68	184,52	358,12
Marzo	129,58	38,44	193,13	361,15
Abril	125,40	37,20	186,90	349,50
Mayo	129,58	38,44	193,13	361,15
Junio	125,40	37,20	186,90	349,50
Julio	303,18	110,36	468,10	881,64
Agosto	129,58	38,44	193,13	361,15
Septiembre	125,40	37,20	186,90	349,50
Octubre	129,58	38,44	193,13	361,15
Noviembre	139,20	46,80	197,70	383,70
Diciembre	143,84	48,36	204,29	396,49
Total energía producida en un año	1754,50	562,92	2592,12	4909,54

No obstante, si comparamos el aerogenerador Enair a 18 metros de altura con su similar ubicada a 24 metros, vemos como la influencia de la altura a la que ha sido colocado el aerogenerador tiene gran relevancia, esto viene dado inicialmente por la aplicación de la ecuación (1) y la Tabla 1.1 vistos en la Sección 1.2.1.3, de la siguiente manera:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\ln(24/0,1)}{\ln(18/0,1)}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = 1,055$$

Como se puede ver la velocidad del viento se aumentaría alrededor de un 6%, lo cual, al momento de comparar ese aumento de la velocidad del viento, en las curvas de las Figuras 3.5, 3.6, 3.8 y 3.9 se observa que la potencia y la energía tiene un aumento también, el cual se vería reflejado en la generación de energía de la turbina ubicada a 24 metros que produce casi 1.5 veces más que la ubicada a 18 metros. De la misma manera, si comparamos la turbina de eje horizontal a 24 m con el aerogenerador Toyoda, existe una diferencia de 4.6



veces más generación de energía, pues sumado al incremento de la velocidad debido a la altura, también están presentes las características propias de los aerogeneradores de eje vertical y horizontal. Otra observación que se puede obtener de la Tabla 4.10 es que, aún si se uniera la generación de las dos turbinas ubicadas a 18 metros de altura, dando un total de 2317,42 kWh, se acercaría a la energía total generada por la turbina eólica ubicada a 24 metros de altura, pero no llegaría a obtenerse un valor igual o mayor a la producción de energía de la misma, por sí sola. Visto aquello, se puede concluir que, al realizar la comparación entre los tres aerogeneradores existentes en la zona, es la turbina eólica ENAIR 70Pro la que presenta la mayor producción de energía, en tanto que la turbina eólica Toyoda, presenta la producción energética más baja, teniendo en cuenta que han sido sometidas a las mismas condiciones de viento, que son propias de la zona.

Un aspecto adicional que se puede ver en la Tabla 4.10, es que el punto máximo de generación se presenta en el mes de julio, comportamiento similar en los otros dos aerogeneradores, aunque en menor cantidad de energía producida. Con esta energía se buscaría sustentar la demanda de algunas de las cargas presenten es la granja Irquis, lo cual se verá en la Sección 4.4.

4.4 COBERTURA DEL CONSUMO DE ENERGÍA DE LA GRANJA IRQUIS MEDIANTE LA ENERGÍA PRODUCIDA POR EL MINI-PARQUE EÓLICO

Dentro del estudio denominado “Análisis de eficiencia energética de la granja Irquis de la Universidad de Cuenca” (Idrovo & Romero, 2017), se encuentran los cuadros de las cargas para iluminación, tomacorrientes y cargas especiales, cuyo resumen se ve en la Tabla 4.11.

Realizando un análisis entre las Tablas 4.10 y 4.11, con los 4909,54 kWh generados al año por el mini-parque eólico, se conseguiría suplir la demanda registrada en los tableros de distribución TDS1, TDS1-1, TDS1-2, TDS2, TDS3, TDS5, TDS5-1 y TDS9-2 pues entre ellos alcanzan un total de 4138,63 kWh. El tablero TDS1, TDS1-1 y TDS1-2 corresponde a las cargas de iluminación y tomas de 110V principalmente; el tablero TDS2 está destinado a iluminación (lámparas fluorescentes), tomas de 110V y una toma de 220V, en tanto que el tablero TDS3 corresponde a iluminación, tomas de 110V y una carga especial perteneciente a una bomba de agua en aulas de clase. Los tableros TDS5 y TDS5-1 corresponde a cargas de iluminación, tomas de 110V y una carga especial cada una, siendo una ducha y una bomba de agua respectivamente, en la casa de trabajadores. Finalmente, el tablero TDS9-2 corresponde a iluminación y tomas de 110V.

De manera complementaria, se presenta en la Figura 4.6 una factura eléctrica para el consumo de energía de la granja Irquis de la Universidad de Cuenca.

Tabla 4.11: Resumen de cargas existentes en la Granja Irquis de la Universidad de Cuenca

Fuente: (Idrovo & Romero, 2017)

Tablero de distribución	Carga Instalada [kW]	Demanda Máxima [kW]	Energía anual [kWh]
TDS1	0,36	0,13	45,99
TDS1-1	4,19	1,95	713,36
TDS1-2	1,98	0,89	326,02
TDS2	1,87	0,79	287,18
TDS3	4,27	2,74	998,97
TDS4	22,71	22,71	8288,42
TDS5	3,88	2,33	851,55
TDS5-1	1,91	1,21	442,38
TDS6	4,73	2,71	989,52
TDS7	4,18	2,53	921,73
TDS7-1	6,94	2,80	1020,21
TDS7-2	5,00	2,40	876,00
TDS8	4,29	2,55	929,22
TDS9	5,50	5,50	2007,50
TDS9-1	11,05	11,05	4033,25
TDS9-2	3,15	1,30	473,19
Cargas a red aérea de BT	7,75	7,75	2828,75
Cargas a viviendas	8,94	6,26	2284,17
Total	102,71	77,58	28317,39



**DETALLE
CONSUMOS**

AFACTURAS500			0-00-00	0	2016-07-15	11	11
Año Mes	VARIABLE	RANGO	-----Anterior-----		-----Actual-----		CONSUMO
			Fecha Lectura	Lectura	Fecha Lectura	Lectura	KWH
2016-Sep.	ACTIVA	N7/18 (L	2016-08-15	112484	2016-09-15	113612	1150
2016-Sep.	ACTIVA	N18/22(LV	2016-08-15	48207	2016-09-15	48604	404
2016-Sep.	ACTIVA	N22/7 LVy	2016-08-15	71570	2016-09-15	71959	396
2016-Sep.	DEMANDA	N18/22(LV	0-00-00	0	2016-09-15	10	10
2016-Sep.	DEMANDA	NO PICO	0-00-00	0	2016-09-15	11	11
2016-Sep.	REACTIVA	NORMAL	2016-08-15	78880	2016-09-15	80129	1273
2016-Ago.	ACTIVA	N7/18 (L	2016-07-15	111318	2016-08-15	112484	1189
2016-Ago.	ACTIVA	N18/22(LV	2016-07-15	47829	2016-08-15	48207	385
2016-Ago.	ACTIVA	N22/7 LVy	2016-07-15	71156	2016-08-15	71570	422
2016-Ago.	DEMANDA	N18/22(LV	0-00-00	0	2016-08-15	10	10
2016-Ago.	DEMANDA	NO PICO	0-00-00	0	2016-08-15	11	11
2016-Ago.	REACTIVA	NORMAL	2016-07-15	77788	2016-08-15	78880	1113
2016-Jul.	ACTIVA	N7/18 (L	2016-06-15	110015	2016-07-15	111318	1329
2016-Jul.	ACTIVA	N18/22(LV	2016-06-15	47441	2016-07-15	47829	395
2016-Jul.	ACTIVA	N22/7 LVy	2016-06-15	70676	2016-07-15	71156	489
2016-Jul.	DEMANDA	N18/22(LV	0-00-00	0	2016-07-15	10	10

Figura 4.6: Detalles de consumo de la factura eléctrica (2016)

Fuente: Empresa Eléctrica Regional Centro Sur

De la Figura 4.6 se observa que para el mes de septiembre se tendría un consumo total de 1950 kWh, y con la ayuda de la Tabla 4.10, vemos que en el mes de septiembre se tendría una producción de 349,50 kWh con lo cual se cubriría aproximadamente un 18% del consumo. De manera similar para agosto se cubriría aproximadamente un porcentaje similar del consumo. En tanto que para el mes de julio que corresponde para al de mayor producción, se cubriría aproximadamente un 39%.

En la Figura 4.7, se presenta la cobertura de consumo aproximada para cada mes del año en base a los datos obtenidos de la factura eléctrica, para los meses de julio, agosto y septiembre se toman los valores de la factura, en tanto que para el resto de meses se ha realizado un promedio entre los valores de estos tres meses.

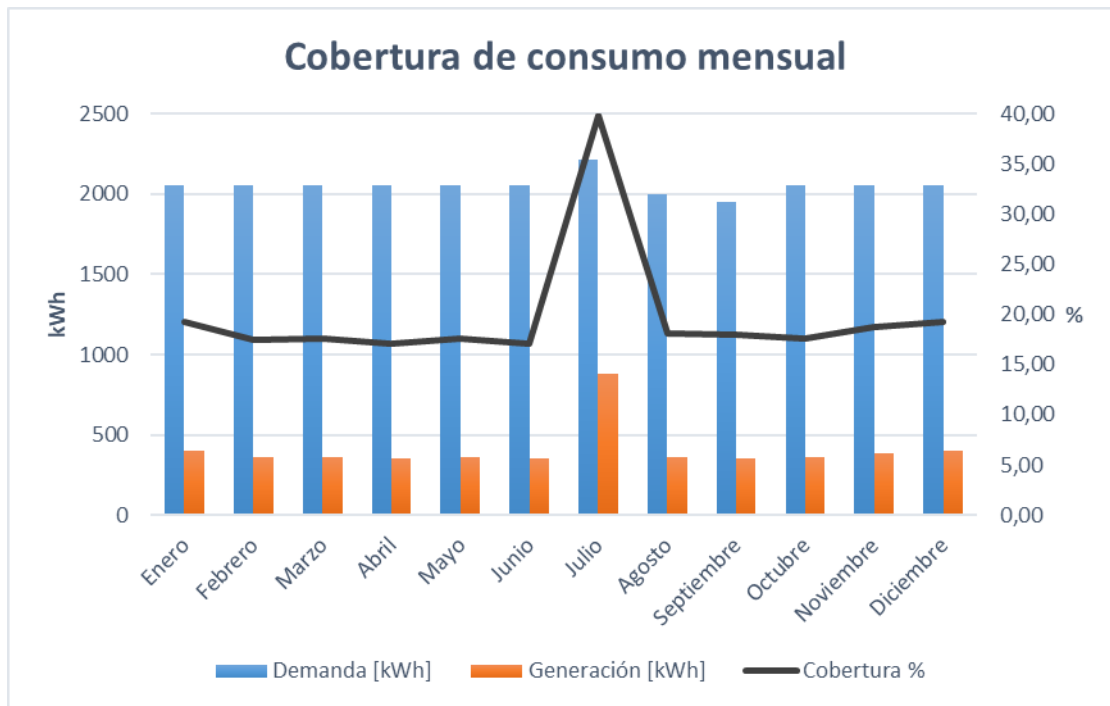


Figura 4.7: Cobertura de consumo mensual de la granja Irquis.

Fuente: Autor.

Si bien el aporte del mini-parque eólico al consumo energético total de la granja es un tanto variable dependiendo del mes y del consumo de energía en el mismo, para un periodo anual basado en la Tabla 4.11 se tendría 28317,39 kWh de demanda de energía, con los 4909,54 kWh anuales que se puede obtener del mini-parque, se cubriría aproximadamente el 17% de la demanda, brindando un aporte considerable a la demanda de la granja. Adicionalmente, gracias al presente proyecto se llega a tener la posibilidad de contar en la región y el país con generación distribuida a pequeña escala y a nivel rural, abriendo muchas opciones de investigación a nivel académico e industrial. Además, el proyecto puede ser escalable de confirmarse las características del recurso con la producción energética. Finalmente, aunque fuera del alcance de esta tesis, se podría combinar al mini-parque eólico con otras alternativas renovables que dispone el campus Irquis, como la energía solar, biomasa o biogás, planteando para el futuro la opción de tener una granja universitaria energéticamente sostenible.



5 CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES GENERALES

El mini-parque eólico de la Universidad de Cuenca presenta una muy buena oportunidad para realizar estudios acerca de la generación de energía eléctrica a pequeña escala, mediante el uso de una fuente renovable no convencional, permitiendo de esta manera enriquecer los conocimientos y fortalecer la investigación de este tipo de energía para futuras aplicaciones a este nivel de producción, ya sea para autoabastecimiento, electrificación de zonas rurales en el Ecuador, incorporación de la energía eólica a pequeña escala para generación distribuida, entre otros.

El comportamiento del viento en la granja Irquis de la Universidad de Cuenca, tomando en cuenta velocidades mayores a los 3 m/s, que se supone es el punto en el cual los aerogeneradores estarían en etapa de producción, tiende a mantener una continuidad a lo largo del año, si bien se presentan algunos altos y bajos en ciertos meses, la tendencia de la velocidad del viento marca un comportamiento regular para todo el año. Esto significaría que los



aerogeneradores no pararían de producir energía, siendo este aspecto muy importante que confirmaría la decisión de optar por la generación de energía eléctrica mediante el uso de esta tecnología renovable no convencional. Adicionalmente, es notorio que, para todas las curvas de velocidades de viento, el anemómetro ubicado a 26 metros, obtiene velocidades mayores que las obtenidas con el anemómetro a 15 metros de altura, confirmando así la teoría expuesta en la Sección 1.2.1.3 que, para alturas superiores, existe mejor porcentaje en el perfil de viento.

Con los resultados obtenidos en las Tablas 4.1 a 4.9, se puede observar que los valores obtenidos de la producción de energía a través de los procedimientos matemáticos y simulaciones, presentan una aproximación aceptable comparando y estimando el valor en las respectivas curvas de energía presentadas en las Figuras 3.6 y 3.9.

Con la generación de energía producida por el mini-parque eólico de la Universidad de Cuenca, sabiendo que el precio medio de la energía facturada por las empresas distribuidoras es de 9,86 ¢/kWh (ARCONEL, 2016), los 4909,54 kWh generados al año por el mini-parque, supondría un ahorro de 484,08 dólares anuales en la planilla del consumo eléctrico. Sin embargo, la Granja Irquis representa una carga muy grande para estos aerogeneradores, aun contando con la cobertura de un 17% de su demanda. Una instalación de este tipo sería idónea para, por ejemplo, aplicaciones residenciales o pequeñas comunidades. En efecto, el consumo promedio mensual de energía eléctrica estimado por la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur para el grupo de consumo residencial en kWh/cliente, es de 100,33 kWh (ARCONEL, 2016), siendo así que con los resultados obtenidos en la Tabla 4.10, bastaría tener instalado uno de los aerogeneradores para satisfacer la necesidad de un hogar promedio. No obstante, si la residencia estuviera dentro de la granja, con todo el aporte del mini-parque eólico se podría no solo cubrir el consumo de la residencia, sino que adicionalmente se podría cubrir la demanda de otras viviendas o realizar la inyección del excedente de energía a la red, produciendo con ello la venta de energía.

Por otra parte, durante el desarrollo del proyecto, se pudo apreciar una característica muy significativa que diferencia a los aerogeneradores de eje horizontal con el aerogenerador de eje vertical, y es que, al comparar la producción de energía de las curvas características de los dos tipos de aerogeneradores (Figura 3.6 y 3.9), la turbina eólica ENAIR (eje horizontal) presenta mayor producción de energía en comparación con la turbina eólica Toyoda (eje vertical), para velocidades de viento menores a 10 m/s. Sin embargo, para velocidades mayores a los 10 m/s, el aerogenerador de eje vertical Toyoda, presenta una mayor capacidad de producción de energía eléctrica que el aerogenerador de eje horizontal ENAIR. Este factor es de suma importancia debido a que exige tener conocimientos referentes al potencial eólico de la zona, más específicamente de la velocidad del viento en el lugar donde se busque instalar un aerogenerador, pues al momento de la elección de un equipo, dependerá mucho de las condiciones de la zona para la correcta



elección del mismo. Para el caso del presente proyecto, bajo las condiciones existentes medidas y conocidas de la zona, se mantiene la concordancia de lo expuesto, con los resultados obtenidos, mostrándonos que efectivamente, como la velocidad del viento no llega a valores cercanos a 10 m/s, los aerogeneradores de eje horizontal terminan siendo los más eficientes, específicamente el aerogenerador ubicado a 24 metros de altura, confirmando también la premisa que, a mayor altura, mayor generación.

5.2 RECOMENDACIONES

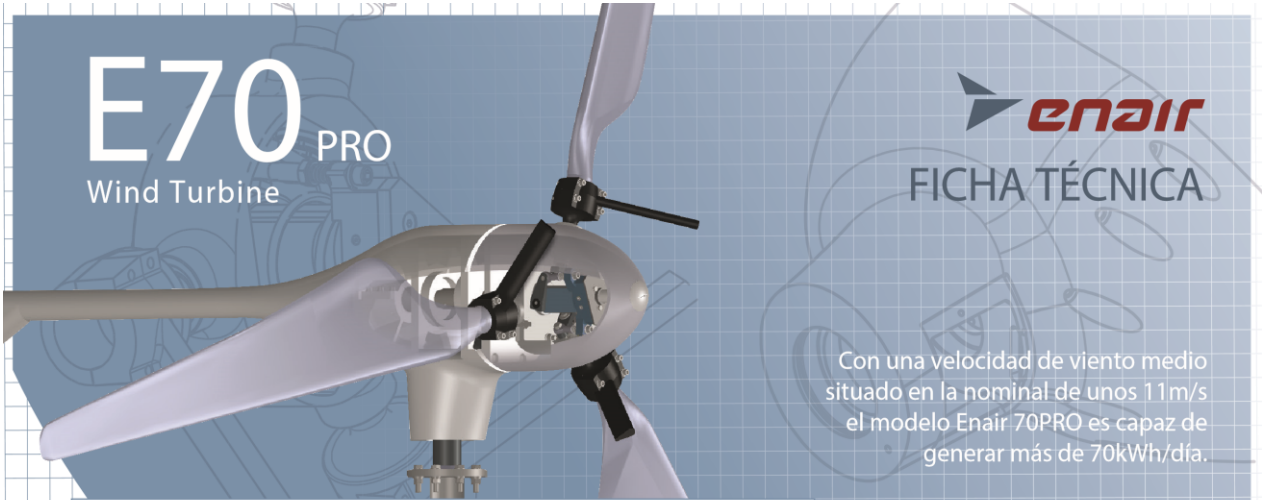
Es de vital importancia a la hora de la elección de un aerogenerador, a más de conocer sus curvas características de potencia o energía, tener una evaluación y un conocimiento claro del comportamiento del recurso eólico, esto debido a que dependerá de ello la elección más apropiada para la instalación de un aerogenerador de eje horizontal o de eje vertical. La evaluación del recurso, como lo demuestra este trabajo, debería ser de por lo menos un año corrido.

En relación con el punto anterior, también se recomienda extender la evaluación del recurso eólico a otros sitios de la granja Irquis, considerando su tamaño. Por ejemplo, en la zona alta del campus, dentro del bosque, tiene una planicie extensa que bien pudiera servir para evaluar el comportamiento del viento.

Es importante conocer los valores que se obtendrían al realizar las mediciones sobre los equipos aerogeneradores ya instalados, pues con ello se puede dar validez de los cálculos realizados en el presente proyecto.

Como la mayoría de tecnologías de energía renovable, la instalación eólica analizada en este documento puede ser escalable, de confirmarse las características del recurso con la producción energética. En ese sentido, se podría a futuro pensar en incrementar la capacidad del parque eólico o combinarlo con otras alternativas renovables que dispone el campus Irquis, como la energía solar, biomasa o biogás. Se recomienda explorar dichas alternativas pues ello permitiría contar con una granja universitaria energéticamente sostenible, que sirva de ejemplo para el país y el mundo.

6 ANEXO 1: FICHA TÉCNICA DEL AEROGENERADOR ENAIR 70PRO



E70 PRO

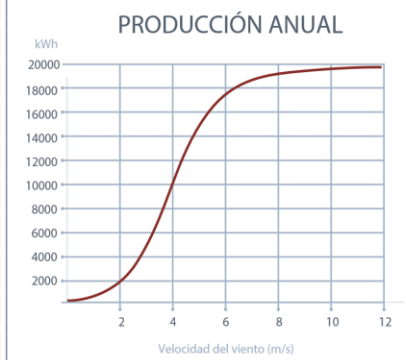
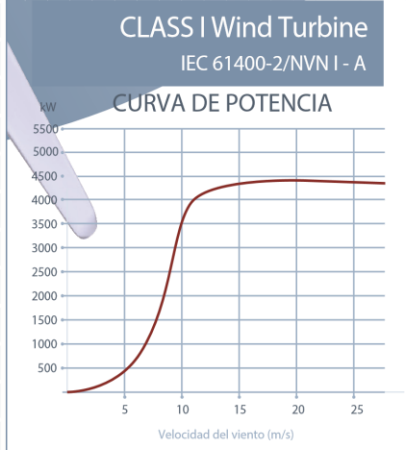
Wind Turbine



FICHA TÉCNICA

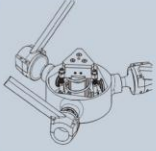
Con una velocidad de viento medio situado en la nominal de unos 11m/s el modelo Enair 70PRO es capaz de generar más de 70kWh/día.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS, ELÉCTRICAS Y DE FUNCIONAMIENTO	
Número de palas	3
Material palas	Fibra de vidrio con resina y núcleo de poliuretano
Generador	250rpm nominales imanes de neodimio
Potencia	5500W
Potencia nominal	4000W
Tensión	24 / 48 / 220V
Clase de viento	CLASS I - IEC 61400-2/NVN I - A
Diámetro	4,3m
Sentido de giro	Horario
Área de barrido	14,5m ²
Peso	165kg
Aplicaciones	Carga de baterías 24 o 48V y conexión a red
Viento de arranque	1,8m/s
Velocidad nominal	11m/s
Vel. regulación del paso variable	12m/s
Velocidad supervivencia	60m/s
Rango de generación eficiente	De 2 a 60m/s
Tipo	Rotor de eje horizontal a barlovento
Orientación	Sistema pasivo con timón de orientación
Control de potencia	Sistema de paso variable pasivo centrífugo con 2 velocidades de actuación
Transmisión	Directa
Freno	Eléctrico por cortocircuito y aerodinámico por paso variable
Controlador	Carga de baterías y conexión a red
Inversor eólico	Eficiencia 97%; algoritmo MPPT
Ruido	48dB Reducción al mínimo debido al diseño de las palas y las bajas revoluciones. 1% más que el ruido ambiente del viento
Protección anti-corrosión	Hermético, pintura epoxi de secado al horno de alta temperatura, generando un recubrimiento plástico
Torre	Celosía, presilla y tubular. Abatibles o fijas de altura variable según condiciones





PASO VARIABLE PASIVO



Tecnología patentada para maximizar la producción de la energía. Es un sistema mecánico que gracias a la fuerza centrífuga modifica el ángulo de las palas y nunca se sobrepasan sus rpm de diseño

Obteniendo:

- Menos ruido
- Más capacidad de absorber rachas
- Más constancia en la generación
- Más energía con menos viento

CONTROL ELECTRÓNICO



Sistema de gestión de la energía inteligente

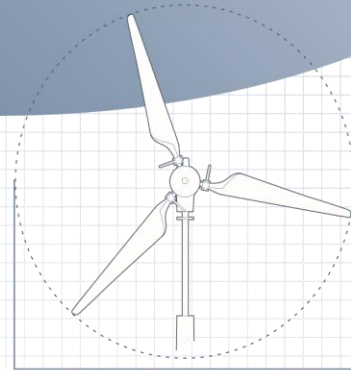
Conexión a baterías:

7 tipos de baterías programables (litio, plomo, gel, etc.)
Cargador con pulsos de derivación a resistencias en caso de sobrecarga. Solo deriva el exceso que no puede cargar para proteger las baterías

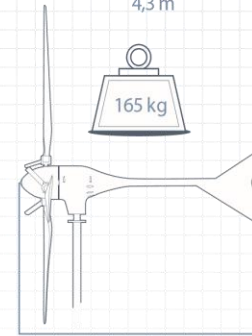
Conexión a red:

Los inversores MPPT, van programados con la curva de potencia eólica, maximizan la producción en todo momento. Compatible con redes trifásicas y monofásicas; en sistemas europeos y americanos

enair
E70PRO Wind Turbine
FICHA TÉCNICA



4,3 m



3,4 m



UN NUEVO DISEÑO, UNA NUEVA ENERGÍA

Cuando aplicas la última tecnología en diseño, la última tecnología en simulación, los mejores materiales del mercado y lo combinas con más de 40 años de experiencia, el resultado es: **el mejor aerogenerador del mercado**



MÁS EFICIENCIA

Un PMG con imanes más potentes y un rotor totalmente integrado en la chapa magnética, junto a una mejora de los perfiles de las palas hacen que con menos viento, seamos más eficientes



MÁS ROBUSTEZ

El diseño del conjunto se ha desarrollado teniendo en cuenta un centro de gravedad posicionado sobre el eje de orientación para equilibrar las tensiones y mejorar las cargas



MÁS SEGURIDAD

El uso materiales como la fibra de carbono y la integración de las resinas con el acero hacen que los factores de seguridad se incrementen $F_s=9$



MÁS ENERGÍA

Combinando todas estas mejoras y aplicando las últimas técnicas como la dinámica de fluidos computacional conseguimos un mejor un 15% la producción de energía



Mínimo ruido

El ruido esta en torno a un 1 % por encima del ruido ambiente siendo prácticamente inapreciable para nuestro oído



Máxima eficiencia

Funciona con una simple brisa de 1,8m/s y continúa funcionando a más de 60m/s



Anticorrosivo

El uso de pintura epoxy lo convierte en un conjunto anticorrosivo y antisalino ideal para islas y costas



Hermético

Sellado herméticamente en todas sus juntas, para evitar filtraciones de humedad y micropartículas que arrastra el viento. Evita deterioros en zonas de costa o desierto donde hay mucha arena



Robusto

Para poder soportar fuertes vientos y ofrecer una larga vida de operación todas las piezas del equipo están sobredimensionadas



PREMIO A LA INNOVACIÓN EMPRESARIAL 2014



Small wind turbines, manufactured



IEC 61400-2



Avenida Ibi, 44 – P.O. 182 C.P. 03420 | Castalla (Alicante), España
+34 96 556 00 18 info@enair.es

www.enair.es

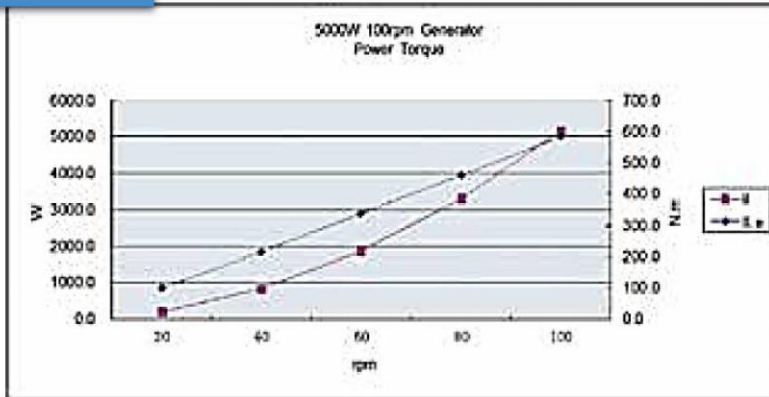
7 ANEXO 2: FICHA TÉCNICA DEL AEROGENERADOR TOYODA TYD-WT-5000



Aerogenerador de Eje Vertical de 5000W	
Arranque en (m/s)	1.5 m/s
Inicio de producción (m/s)	2.5 m/s
Velocidad Nominal (m/s)	12 m/s
Rev. por Minuto Nominales	100 RPM
Potencia Nominal	5.000 W
Diámetro en (m)	3.5 m
Cantidad de Palas	3
Longitud del Palas (m)	5 m
Max. velocidad de viento (m/s)	60 m/s
Peso:	679,4 Kg

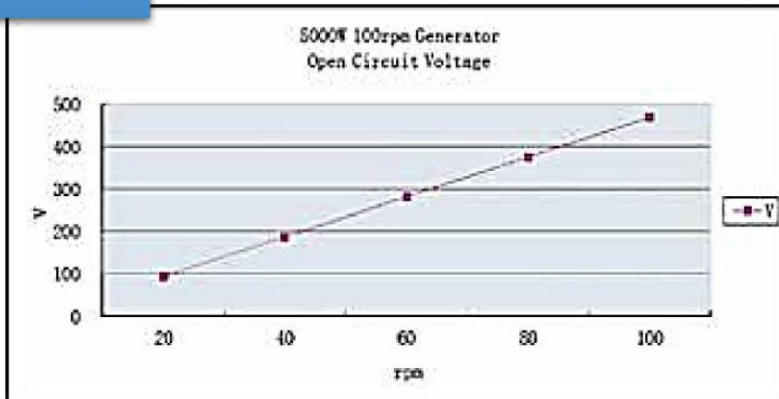
W/RPM

Power vs Torque



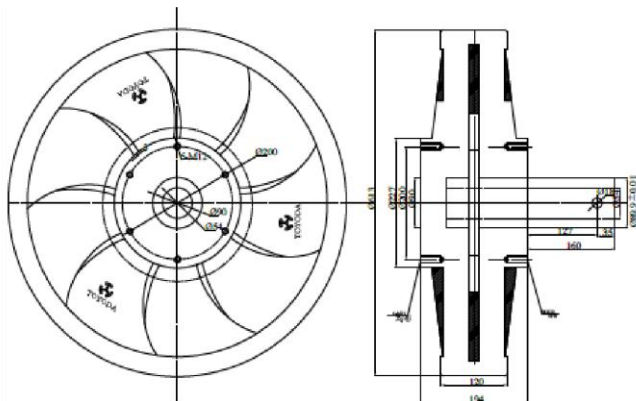
V/RPM

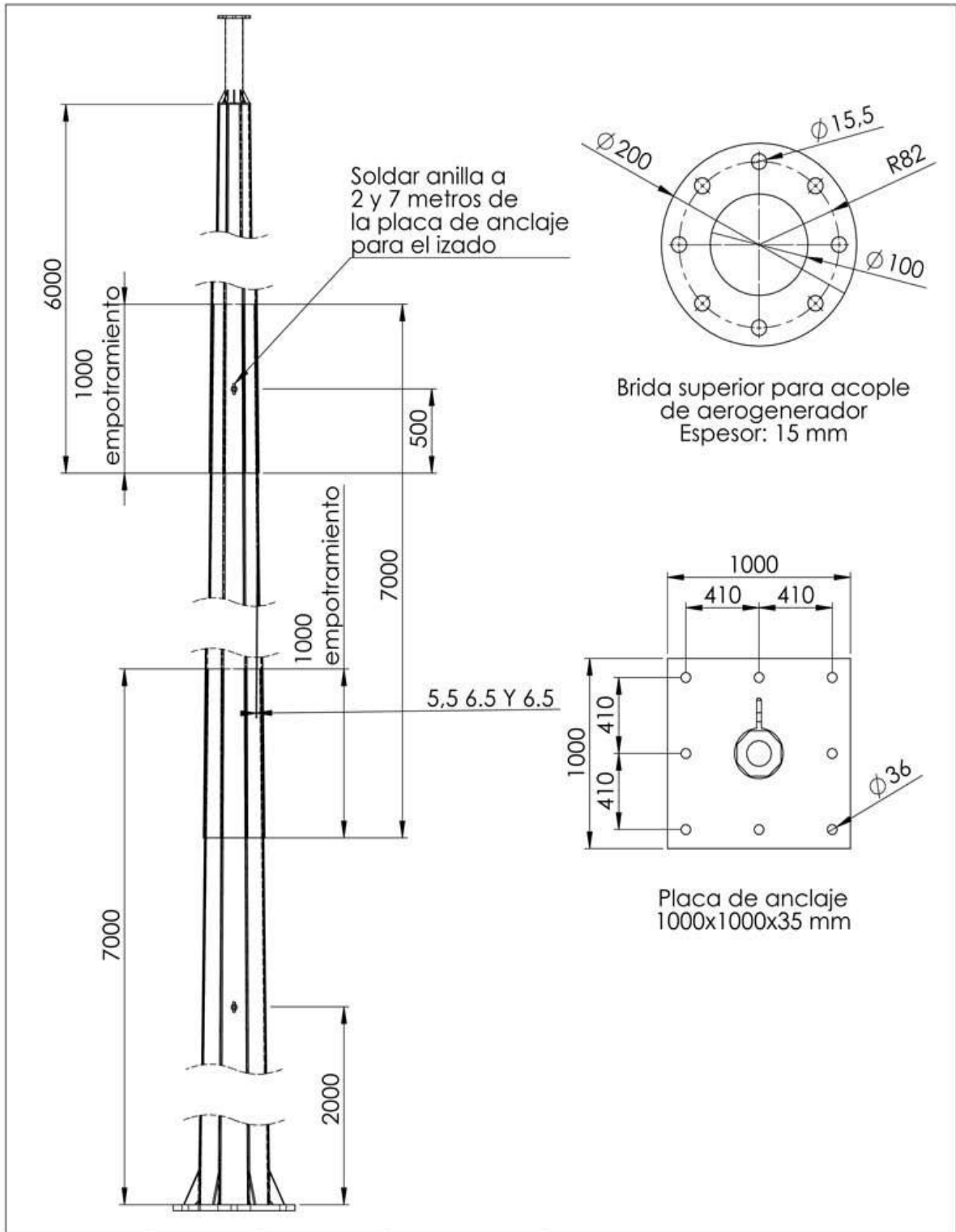
Open Circuit Voltage



Especificaciones Mecánicas	
Montaje	Vertical
Peso del PMG	96 kg
Aislamiento	Tipo F
Tamaño PMG	613x350 mm
Potencia Nominal	5.000 W

Materiales del Generador	
Eje	Acero inoxidable
Rodamientos	SKF / NSK
Carcasa:	Aluminio
Material de los imanes:	NdFeB

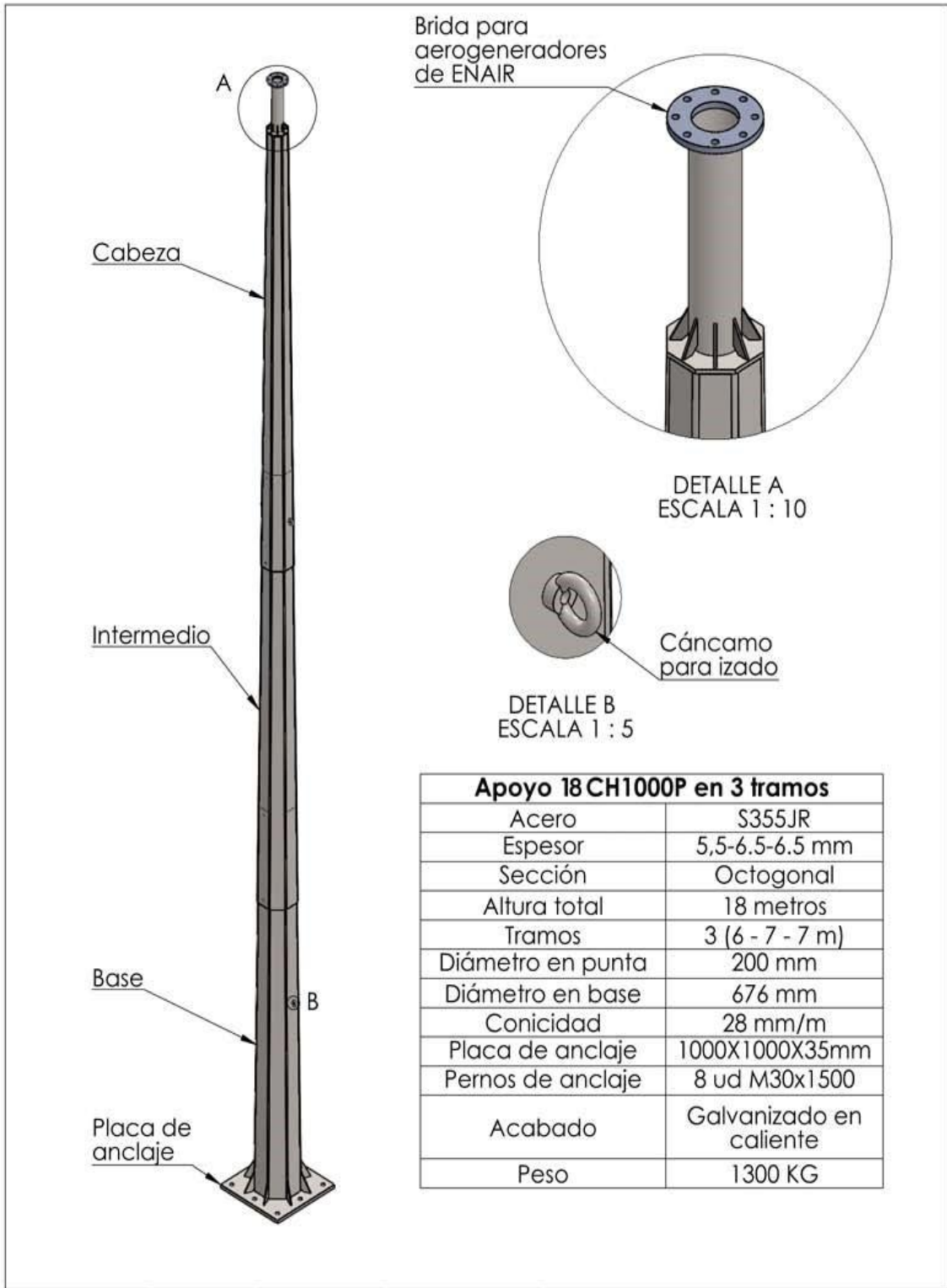





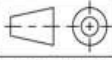
	FECHA	FIRMA	EDICIÓN	MODIFICACIONES	
DIBUJADO	06/07/2012	M.E.			
REVISADO					
VALIDADO					
Nº PLANO: ENAIR_18P CH-1000		HOJA 2 DE 2	Apoyo tubular 18 CH-1000 en 3 tramos con puntera para Aerogenerador		
SUSTITUYE A:		EDICIÓN A			ESCALA: 1:30
SUSTITUIDO POR:					

ENAIR no se responsabiliza de los posibles cambios en las medidas de los planos





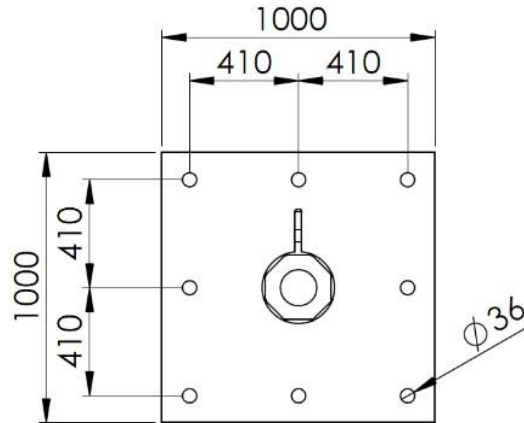
Apoyo 18CH1000P en 3 tramos	
Acero	S355JR
Espesor	5,5-6.5-6.5 mm
Sección	Octogonal
Altura total	18 metros
Tramos	3 (6 - 7 - 7 m)
Diámetro en punta	200 mm
Diámetro en base	676 mm
Conicidad	28 mm/m
Placa de anclaje	1000X1000X35mm
Pernos de anclaje	8 ud M30x1500
Acabado	Galvanizado en caliente
Peso	1300 KG

	FECHA	FIRMA	EDICIÓN	MODIFICACIONES
DIBUJADO	06/07/2012	M.E.		
REVISADO				
VALIDADO				
Nº PLANO: ENAIR_18P CH-1000		HOJA 1 DE 2	Apoyo tubular 18P CH-1000 en 3 tramos con puntera para Aerogenerador	
SUSTITUYE A:		EDICIÓN A		
SUSTITUIDO POR:				
				 ESCALA: 1:45

ENAIR no se responsabiliza de los posibles cambios en las medidas de los planos

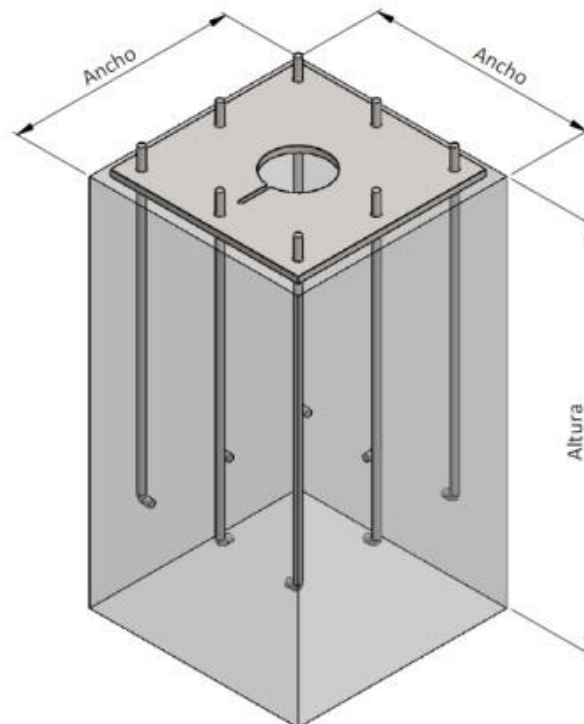


Torre de 18m
OCTOGONAL
ENAIR



Placa de anclaje
1000x1000x35 mm

Dimensiones	Tipo de terreno		
	Terreno flojo K = 8 kg/cm ³	Terreno normal K = 12 kg/cm ³	Terreno duro K = 16 kg/cm ³
Altura (H)	1,95 m	1,80 m	1,75 m
Ancho (a)	1,90 m	1,75 m	1,50 m





8 ANEXO 3: TABLAS DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO MEDIDOS EN LA GRANJA IRQUIS DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA

Datos sobre velocidad del viento para un día promedio del mes de abril de 2017

Fuente: ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca

	CANAL 1 anemómetro [m/seg]	CANAL 2 anemómetro [m/seg]	15m	26m
PROMEDIO HORA	2,266	2,784	2,266	2,784
MÁXIMO HORA	4,141	4,877	4,141	4,877
MÍNIMO HORA	0,959	1,237	0,959	1,237
HORA-DIA	Anem. 1	Anem. 2	15m	26m
0	1,09	1,46	1,09	1,46
1	1,02	1,37	1,02	1,37
2	0,98	1,25	0,98	1,25
3	0,96	1,24	0,96	1,24
4	1,10	1,40	1,10	1,40
5	1,20	1,58	1,20	1,58
6	1,32	1,75	1,32	1,75
7	1,78	2,17	1,78	2,17
8	2,47	2,91	2,47	2,91
9	3,11	3,53	3,11	3,53
10	3,64	4,19	3,64	4,19
11	3,96	4,60	3,96	4,60
12	4,14	4,83	4,14	4,83
13	4,12	4,88	4,12	4,88
14	3,99	4,84	3,99	4,84
15	3,91	4,81	3,91	4,81
16	3,38	4,21	3,38	4,21
17	2,74	3,51	2,74	3,51
18	2,16	2,78	2,16	2,78
19	1,78	2,29	1,78	2,29
20	1,57	2,04	1,57	2,04
21	1,43	1,86	1,43	1,86
22	1,32	1,73	1,32	1,73
23	1,20	1,59	1,20	1,59

Datos sobre velocidad del viento para un día promedio del mes de mayo de 2017

Fuente: ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca

	CANAL 1 anemómetro [m/seg]	CANAL 2 anemómetro [m/seg]	15m	26m
PROMEDIO HORA	2,099	2,639	2,099	2,639
MÁXIMO HORA	3,658	4,428	3,658	4,428
MÍNIMO HORA	0,847	1,214	0,847	1,214
HORA-DIA	Anem. 1	Anem. 2	15m	26m
0	1,09	1,53	1,09	1,53
1	1,15	1,60	1,15	1,60
2	1,13	1,64	1,13	1,64
3	1,00	1,35	1,00	1,35
4	0,85	1,21	0,85	1,21
5	1,06	1,45	1,06	1,45
6	1,23	1,70	1,23	1,70
7	1,72	2,20	1,72	2,20
8	2,56	3,00	2,56	3,00
9	3,20	3,59	3,20	3,59
10	3,58	4,02	3,58	4,02
11	3,66	4,22	3,66	4,22
12	3,63	4,26	3,63	4,26
13	3,61	4,43	3,61	4,43
14	3,50	4,29	3,50	4,29
15	3,33	4,18	3,33	4,18
16	3,02	3,87	3,02	3,87
17	2,74	3,54	2,74	3,54
18	2,00	2,67	2,00	2,67
19	1,64	2,17	1,64	2,17
20	1,29	1,73	1,29	1,73
21	1,18	1,60	1,18	1,60
22	1,08	1,50	1,08	1,50
23	1,12	1,60	1,12	1,60

Datos sobre velocidad del viento para un día promedio del mes de junio de 2017

Fuente: ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca

	CANAL 1 anemómetro [m/seg]	CANAL 2 anemómetro [m/seg]	15m	26m
PROMEDIO HORA	2,588	3,316	2,588	3,316
MÁXIMO HORA	4,606	5,225	4,606	5,225
MÍNIMO HORA	1,307	2,003	1,307	2,003
HORA-DIA	Anem. 1	Anem. 2	15m	26m
0	1,57	2,24	1,57	2,24
1	1,50	2,13	1,50	2,13
2	1,31	2,00	1,31	2,00
3	1,41	2,09	1,41	2,09
4	1,50	2,29	1,50	2,29
5	1,61	2,37	1,61	2,37
6	1,73	2,52	1,73	2,52
7	2,19	2,88	2,19	2,88
8	3,19	3,85	3,19	3,85
9	4,11	4,80	4,11	4,80
10	4,61	5,23	4,61	5,23
11	4,14	4,77	4,14	4,77
12	4,06	4,68	4,06	4,68
13	3,97	4,72	3,97	4,72
14	3,99	4,86	3,99	4,86
15	3,94	4,85	3,94	4,85
16	3,51	4,44	3,51	4,44
17	2,92	3,80	2,92	3,80
18	2,40	3,16	2,40	3,16
19	1,99	2,76	1,99	2,76
20	1,76	2,44	1,76	2,44
21	1,57	2,21	1,57	2,21
22	1,59	2,25	1,59	2,25
23	1,55	2,26	1,55	2,26



Datos sobre velocidad del viento para un día promedio del mes de julio de 2017
 Fuente: ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca

	CANAL 1 anemómetro [m/seg]	CANAL 2 anemómetro [m/seg]	15m	26m
PROMEDIO HORA	3,644	4,663	3,644	4,663
MÁXIMO HORA	5,435	6,340	5,435	6,340
MÍNIMO HORA	2,626	3,622	2,626	3,622
HORA-DIA	Anem. 1	Anem. 2	15m	26m
0	2,68	3,72	2,68	3,72
1	2,71	3,80	2,71	3,80
2	2,63	3,68	2,63	3,68
3	2,63	3,69	2,63	3,69
4	2,65	3,67	2,65	3,67
5	2,72	3,79	2,72	3,79
6	2,74	3,71	2,74	3,71
7	3,11	4,04	3,11	4,04
8	3,99	4,87	3,99	4,87
9	5,20	6,03	5,20	6,03
10	5,44	6,25	5,44	6,25
11	5,26	6,11	5,26	6,11
12	5,22	6,18	5,22	6,18
13	5,32	6,34	5,32	6,34
14	5,10	6,25	5,10	6,25
15	4,73	5,84	4,73	5,84
16	4,35	5,48	4,35	5,48
17	3,96	5,14	3,96	5,14
18	3,24	4,29	3,24	4,29
19	3,02	4,10	3,02	4,10
20	2,84	3,94	2,84	3,94
21	2,68	3,66	2,68	3,66
22	2,64	3,72	2,64	3,72
23	2,63	3,62	2,63	3,62



Datos sobre velocidad del viento para un día promedio del mes de agosto de 2017

Fuente: ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca

	CANAL 1 anemómetro [m/seg]	CANAL 2 anemómetro [m/seg]	15m	26m
PROMEDIO HORA	2,758	3,462	2,758	3,462
MÁXIMO HORA	5,304	5,995	5,304	5,995
MÍNIMO HORA	1,356	1,896	1,356	1,896
HORA-DIA	Anem. 1	Anem. 2	15m	26m
0	1,47	2,11	1,47	2,11
1	1,47	2,07	1,47	2,07
2	1,39	1,91	1,39	1,91
3	1,36	1,90	1,36	1,90
4	1,46	2,02	1,46	2,02
5	1,47	2,12	1,47	2,12
6	1,49	2,29	1,49	2,29
7	1,99	2,78	1,99	2,78
8	3,35	4,02	3,35	4,02
9	4,58	5,25	4,58	5,25
10	5,30	5,99	5,30	5,99
11	5,04	5,75	5,04	5,75
12	4,75	5,54	4,75	5,54
13	4,67	5,52	4,67	5,52
14	4,42	5,30	4,42	5,30
15	4,45	5,38	4,45	5,38
16	4,10	5,00	4,10	5,00
17	3,47	4,37	3,47	4,37
18	2,27	2,99	2,27	2,99
19	1,72	2,38	1,72	2,38
20	1,45	2,06	1,45	2,06
21	1,46	2,03	1,46	2,03
22	1,50	2,13	1,50	2,13
23	1,55	2,18	1,55	2,18



Datos sobre velocidad del viento para un día promedio del mes de septiembre de 2017

Fuente: ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca

	CANAL 1 anemómetro [m/seg]	CANAL 2 anemómetro [m/seg]	15m	26m
PROMEDIO HORA	2,483	3,188	2,483	3,188
MÁXIMO HORA	4,581	5,303	4,581	5,303
MÍNIMO HORA	1,113	1,675	1,113	1,675
HORA-DIA	Anem. 1	Anem. 2	15m	26m
0	1,39	2,03	1,39	2,03
1	1,45	2,05	1,45	2,05
2	1,35	1,98	1,35	1,98
3	1,30	1,96	1,30	1,96
4	1,28	1,93	1,28	1,93
5	1,34	2,06	1,34	2,06
6	1,46	2,16	1,46	2,16
7	2,00	2,68	2,00	2,68
8	3,23	3,93	3,23	3,93
9	4,38	5,02	4,38	5,02
10	4,55	5,21	4,55	5,21
11	4,58	5,30	4,58	5,30
12	4,23	5,03	4,23	5,03
13	3,81	4,72	3,81	4,72
14	3,72	4,62	3,72	4,62
15	3,56	4,39	3,56	4,39
16	3,30	4,13	3,30	4,13
17	2,85	3,74	2,85	3,74
18	2,34	3,13	2,34	3,13
19	2,09	2,69	2,09	2,69
20	1,70	2,31	1,70	2,31
21	1,24	1,78	1,24	1,78
22	1,11	1,67	1,11	1,67
23	1,34	1,96	1,34	1,96



Datos sobre velocidad del viento para un día promedio del mes de octubre de 2017

Fuente: ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca

	CANAL 1 anemómetro [m/seg]	CANAL 2 anemómetro [m/seg]	15m	26m
PROMEDIO HORA	2,441	3,037	2,441	3,037
MÁXIMO HORA	4,221	5,091	4,221	5,091
MÍNIMO HORA	0,982	1,477	0,982	1,477
HORA-DIA	Anem. 1	Anem. 2	15m	26m
0	1,12	1,62	1,12	1,62
1	0,98	1,48	0,98	1,48
2	1,12	1,62	1,12	1,62
3	1,11	1,58	1,11	1,58
4	1,27	1,77	1,27	1,77
5	1,28	1,77	1,28	1,77
6	1,36	1,82	1,36	1,82
7	1,87	2,31	1,87	2,31
8	2,97	3,50	2,97	3,50
9	3,76	4,25	3,76	4,25
10	4,10	4,65	4,10	4,65
11	3,90	4,54	3,90	4,54
12	4,11	4,85	4,11	4,85
13	4,22	5,09	4,22	5,09
14	4,19	5,06	4,19	5,06
15	4,07	5,03	4,07	5,03
16	3,56	4,46	3,56	4,46
17	3,09	3,90	3,09	3,90
18	2,72	3,45	2,72	3,45
19	2,10	2,68	2,10	2,68
20	1,82	2,33	1,82	2,33
21	1,45	1,90	1,45	1,90
22	1,25	1,71	1,25	1,71
23	1,14	1,54	1,14	1,54



Datos sobre velocidad del viento para un día promedio del mes de noviembre de 2017

Fuente: ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca

	CANAL 1 anemómetro [m/seg]	CANAL 2 anemómetro [m/seg]	15m	26m
PROMEDIO HORA	2,449	2,983	2,449	2,983
MÁXIMO HORA	5,436	6,752	5,436	6,752
MÍNIMO HORA	0,558	0,631	0,558	0,631
HORA-DIA	Anem. 1	Anem. 2	15m	26m
0	0,85	0,99	0,85	0,99
1	0,72	0,81	0,72	0,81
2	0,66	0,72	0,66	0,72
3	0,56	0,63	0,56	0,63
4	0,62	0,68	0,62	0,68
5	0,62	0,68	0,62	0,68
6	0,69	0,76	0,69	0,76
7	1,00	1,05	1,00	1,05
8	1,95	2,19	1,95	2,19
9	2,86	3,23	2,86	3,23
10	3,23	3,70	3,23	3,70
11	3,91	4,64	3,91	4,64
12	4,40	5,35	4,40	5,35
13	4,94	6,12	4,94	6,12
14	5,44	6,75	5,44	6,75
15	5,40	6,68	5,40	6,68
16	4,93	6,12	4,93	6,12
17	4,28	5,46	4,28	5,46
18	3,55	4,59	3,55	4,59
19	2,79	3,60	2,79	3,60
20	2,19	2,87	2,19	2,87
21	1,42	1,83	1,42	1,83
22	1,05	1,32	1,05	1,32
23	0,75	0,83	0,75	0,83



Datos sobre velocidad del viento para un día promedio del mes de diciembre de 2017

Fuente: ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca

	CANAL 1 anemómetro [m/seg]	CANAL 2 anemómetro [m/seg]	15m	26m
PROMEDIO HORA	2,364	2,896	2,364	2,896
MÁXIMO HORA	4,785	5,994	4,785	5,994
MÍNIMO HORA	0,734	0,915	0,734	0,915
HORA-DIA	Anem. 1	Anem. 2	15m	26m
0	1,08	1,32	1,08	1,32
1	1,04	1,34	1,04	1,34
2	0,99	1,21	0,99	1,21
3	0,93	1,20	0,93	1,20
4	0,73	0,92	0,73	0,92
5	0,79	1,04	0,79	1,04
6	0,93	1,16	0,93	1,16
7	1,24	1,46	1,24	1,46
8	2,24	2,55	2,24	2,55
9	3,08	3,50	3,08	3,50
10	3,65	4,24	3,65	4,24
11	4,02	4,75	4,02	4,75
12	4,54	5,52	4,54	5,52
13	4,61	5,70	4,61	5,70
14	4,78	5,99	4,78	5,99
15	4,66	5,83	4,66	5,83
16	3,97	5,00	3,97	5,00
17	3,37	4,24	3,37	4,24
18	2,71	3,35	2,71	3,35
19	2,11	2,57	2,11	2,57
20	1,69	2,08	1,69	2,08
21	1,23	1,57	1,23	1,57
22	1,21	1,50	1,21	1,50
23	1,12	1,46	1,12	1,46

Datos sobre velocidad del viento para un día promedio del mes de enero de 2018

Fuente: ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca

	CANAL 1 anemómetro [m/seg]	CANAL 2 anemómetro [m/seg]	15m	26m	PROM
PROMEDIO HORA	2,265	2,708	2,265	2,708	2,487
MÁXIMO HORA	5,027	6,166	5,027	6,166	5,597
MÍNIMO HORA	0,637	0,743	0,637	0,743	0,690
HORA-DIA	Anem. 1	Anem. 2	15m	26m	PROM.
0	0,85	1,06	0,85	1,06	0,95
1	0,90	1,09	0,90	1,09	1,00
2	0,84	1,04	0,84	1,04	0,94
3	0,75	0,93	0,75	0,93	0,84
4	0,71	0,80	0,71	0,80	0,75
5	0,64	0,74	0,64	0,74	0,69
6	0,65	0,80	0,65	0,80	0,72
7	1,06	1,11	1,06	1,11	1,08
8	1,92	1,93	1,92	1,93	1,92
9	2,59	2,77	2,59	2,77	2,68
10	2,88	3,13	2,88	3,13	3,00
11	3,51	4,02	3,51	4,02	3,76
12	4,03	4,73	4,03	4,73	4,38
13	4,71	5,66	4,71	5,66	5,18
14	5,03	6,17	5,03	6,17	5,60
15	4,89	5,98	4,89	5,98	5,44
16	3,94	4,90	3,94	4,90	4,42
17	3,14	3,93	3,14	3,93	3,54
18	2,63	3,30	2,63	3,30	2,97
19	2,40	2,98	2,40	2,98	2,69
20	2,10	2,71	2,10	2,71	2,40
21	1,74	2,21	1,74	2,21	1,97
22	1,32	1,65	1,32	1,65	1,48
23	1,14	1,37	1,14	1,37	1,26

Datos sobre velocidad del viento para un día promedio del mes de febrero de 2018

Fuente: ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca

	CANAL 1 anemómetro [m/seg]	CANAL 2 anemómetro [m/seg]	15m	26m
PROMEDIO HORA	2,629	3,318	2,629	3,318
MÁXIMO HORA	5,824	7,429	5,824	7,429
MÍNIMO HORA	0,545	0,575	0,545	0,575
HORA-DIA	Anem. 1	Anem. 2	15m	26m
0	1,77	2,28	1,77	2,28
1	1,31	1,58	1,31	1,58
2	0,87	1,19	0,87	1,19
3	0,85	1,05	0,85	1,05
4	0,55	0,57	0,55	0,57
5	0,76	0,87	0,76	0,87
6	0,56	0,63	0,56	0,63
7	0,63	0,69	0,63	0,69
8	1,00	1,00	1,00	1,00
9	1,76	2,07	1,76	2,07
10	2,40	2,91	2,40	2,91
11	4,20	5,23	4,20	5,23
12	5,40	6,84	5,40	6,84
13	5,77	7,32	5,77	7,32
14	5,82	7,43	5,82	7,43
15	4,93	6,44	4,93	6,44
16	4,38	5,69	4,38	5,69
17	3,86	4,98	3,86	4,98
18	3,73	4,79	3,73	4,79
19	3,41	4,35	3,41	4,35
20	2,80	3,58	2,80	3,58
21	2,44	3,21	2,44	3,21
22	1,90	2,46	1,90	2,46
23	1,99	2,47	1,99	2,47



Datos sobre velocidad del viento para un día promedio del mes de marzo de 2018

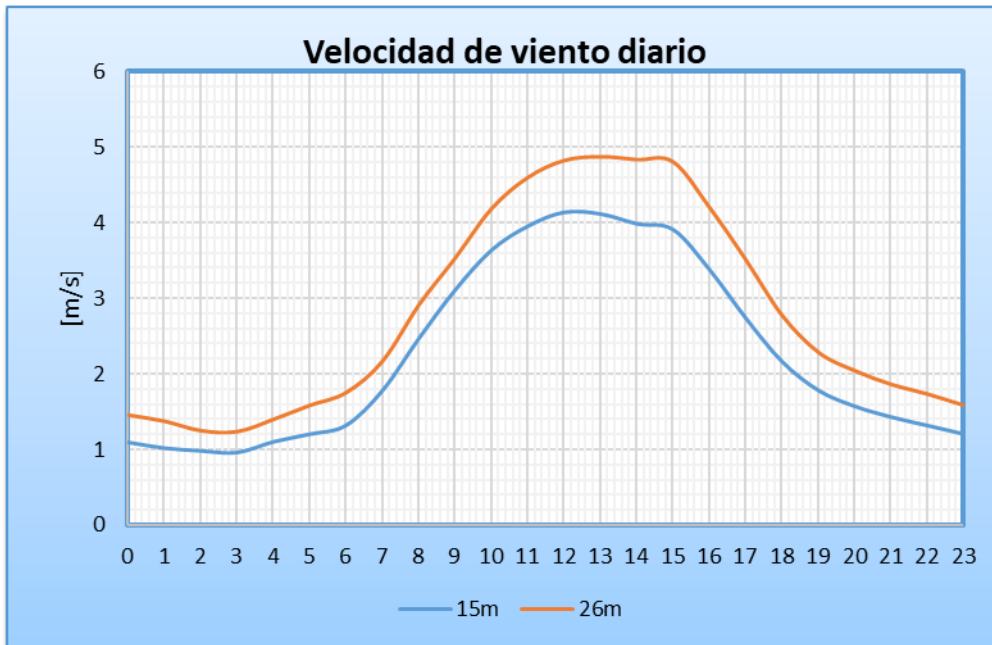
Fuente: ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca

	CANAL 1 anemómetro [m/seg]	CANAL 2 anemómetro [m/seg]	15m	26m
PROMEDIO HORA	2,700	3,420	2,700	3,420
MÁXIMO HORA	5,218	6,013	5,218	6,013
MÍNIMO HORA	1,266	1,724	1,266	1,724
HORA-DIA	Anem. 1	Anem. 2	15m	26m
0	1,44	2,01	1,44	2,01
1	1,39	1,90	1,39	1,90
2	1,47	2,03	1,47	2,03
3	1,27	1,72	1,27	1,72
4	1,28	1,84	1,28	1,84
5	1,41	1,98	1,41	1,98
6	1,49	2,01	1,49	2,01
7	1,96	2,51	1,96	2,51
8	3,00	3,68	3,00	3,68
9	4,54	5,23	4,54	5,23
10	5,22	6,01	5,22	6,01
11	4,94	5,79	4,94	5,79
12	4,73	5,66	4,73	5,66
13	4,47	5,47	4,47	5,47
14	3,96	5,02	3,96	5,02
15	3,68	4,65	3,68	4,65
16	3,88	4,88	3,88	4,88
17	3,20	4,11	3,20	4,11
18	2,67	3,62	2,67	3,62
19	2,27	3,07	2,27	3,07
20	1,78	2,46	1,78	2,46
21	1,67	2,26	1,67	2,26
22	1,59	2,14	1,59	2,14
23	1,49	2,01	1,49	2,01

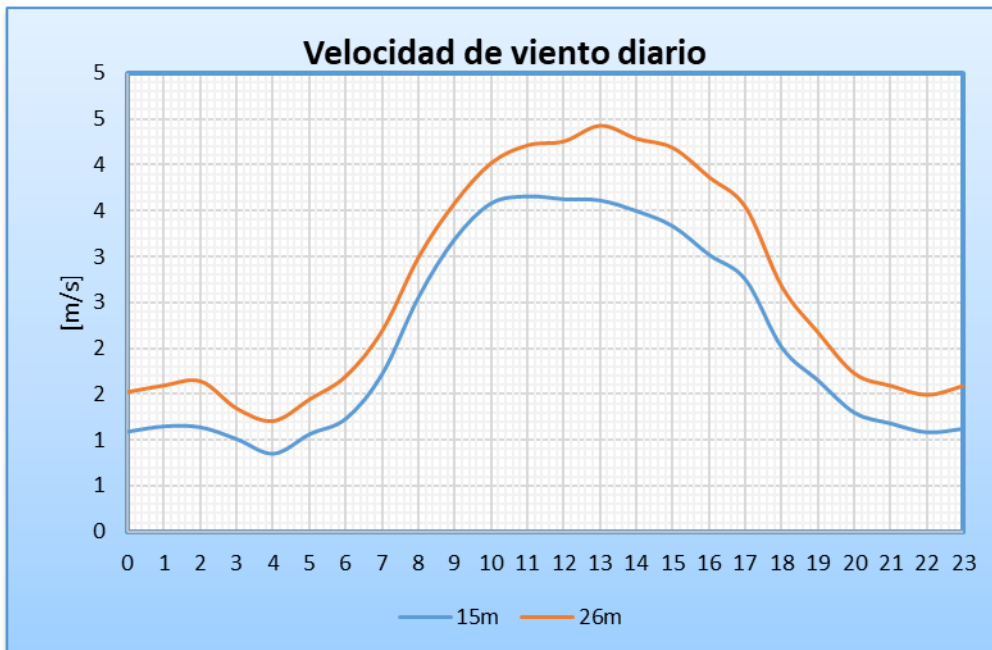


9 ANEXO 4. CURVAS DE LA VELOCIDAD DE VIENTO DE LA GRANJA IRQUIS DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA

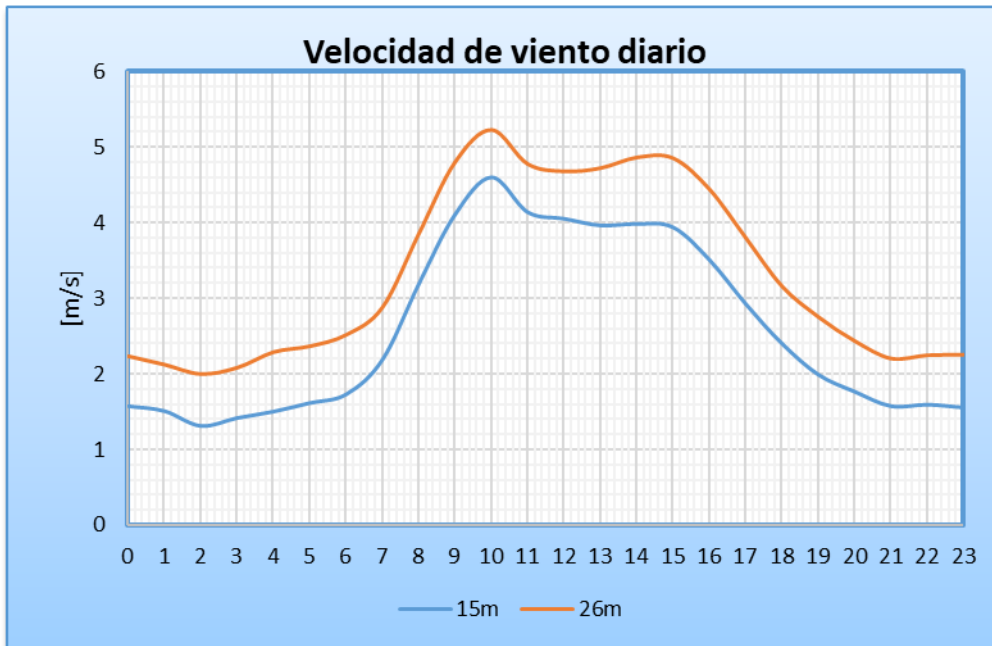
Curva de velocidad del viento para un día promedio del mes de abril de 2017
Fuente: ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca



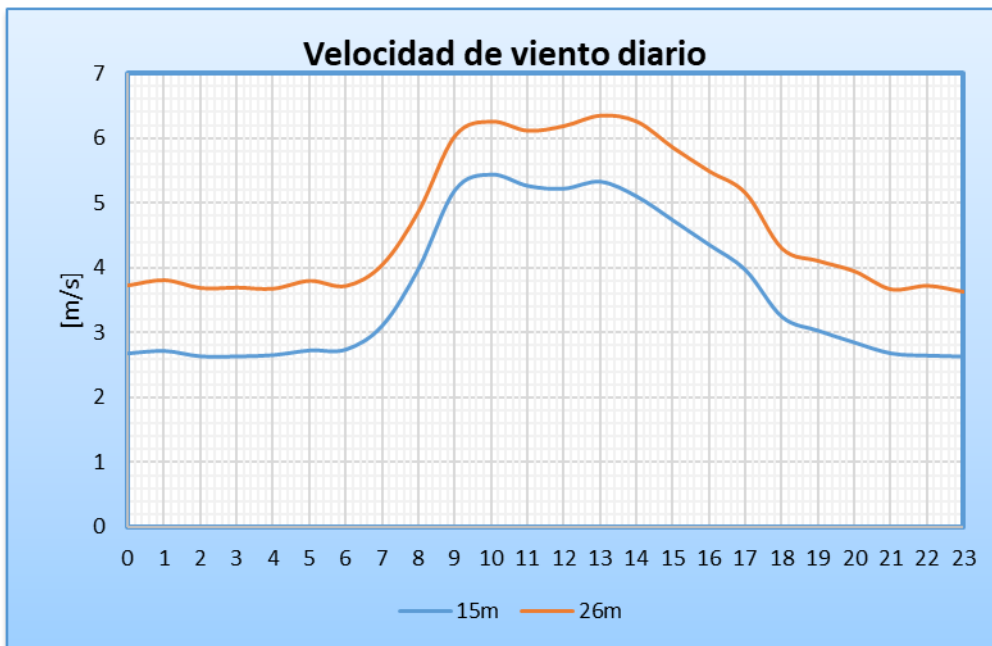
Curva de velocidad del viento para un día promedio del mes de mayo de 2017
Fuente: ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca



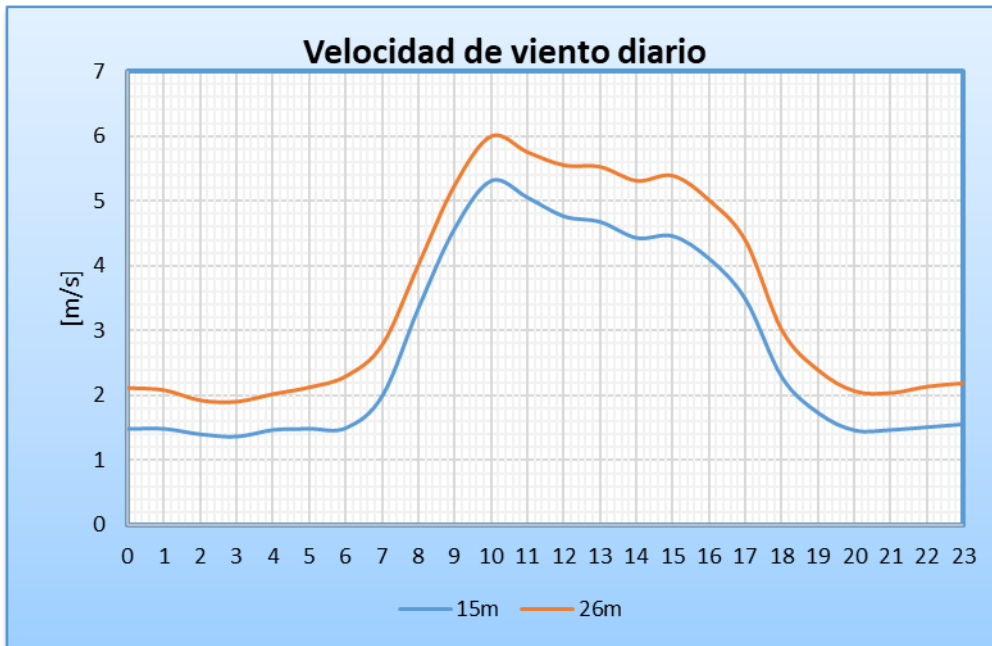
Curva de velocidad del viento para un día promedio del mes de junio de 2017
Fuente: ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca



Curva de velocidad del viento para un día promedio del mes de julio de 2017
Fuente: ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca

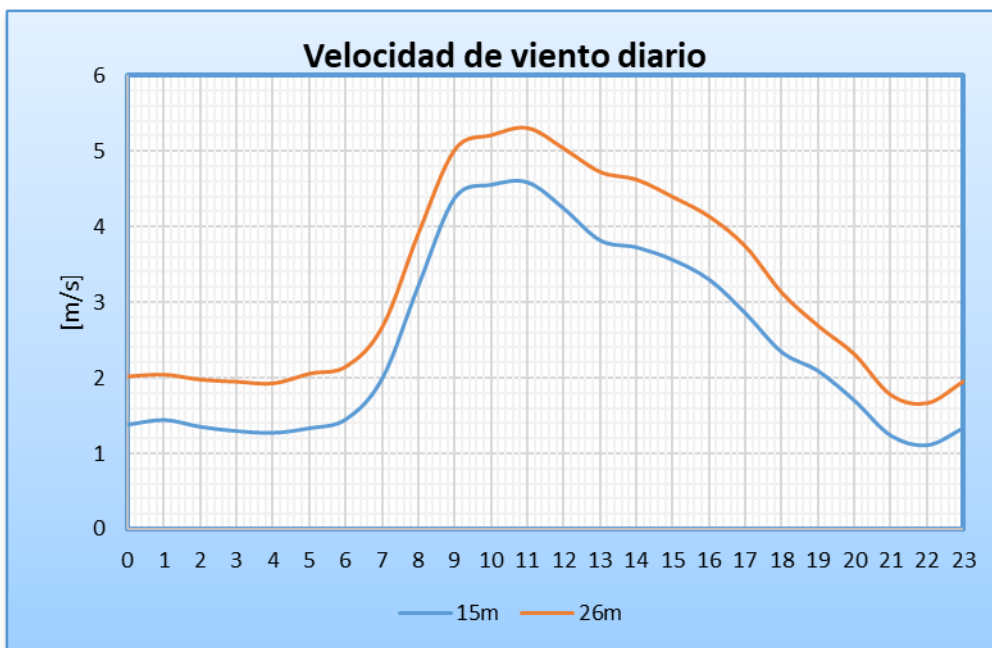


Curva de velocidad del viento para un día promedio del mes de agosto de 2017
Fuente: ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca



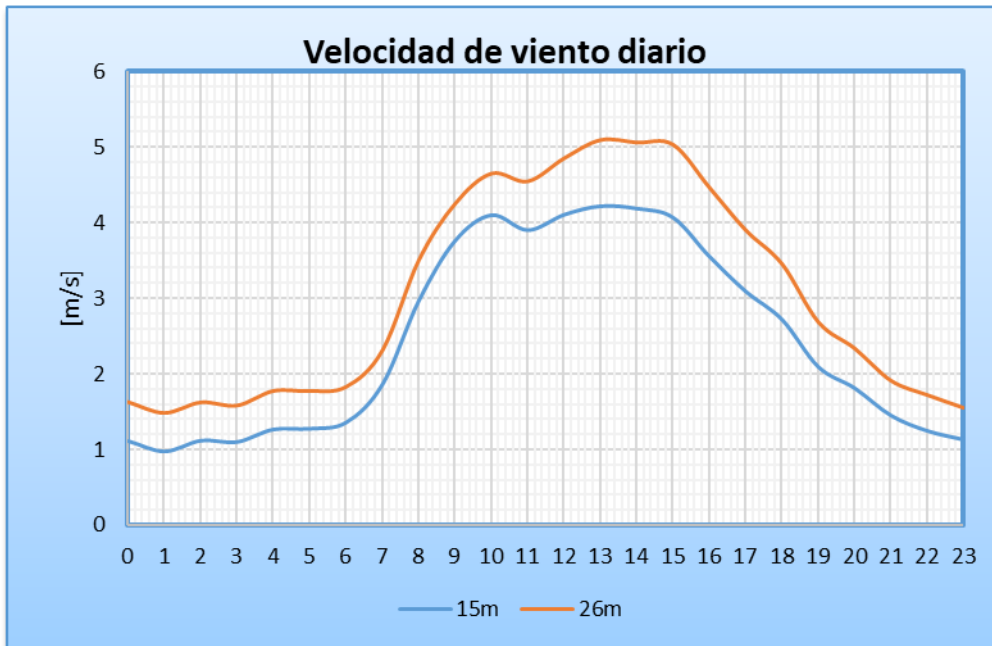
Curva de velocidad del viento para un día promedio del mes de septiembre de 2017

Fuente: ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca



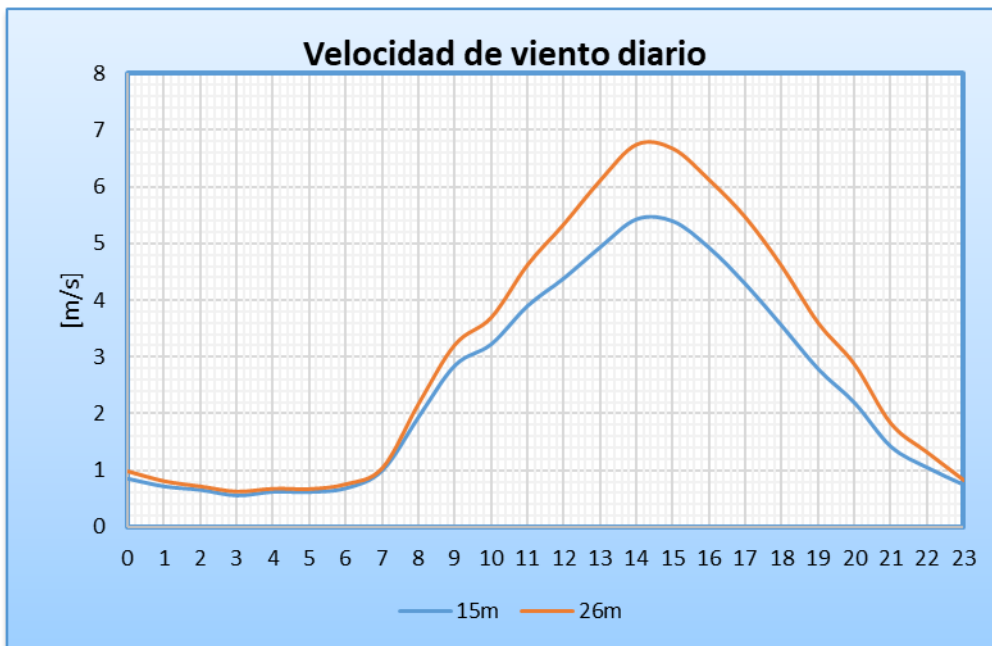
Curva de velocidad del viento para un día promedio del mes de octubre de 2017

Fuente: ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca



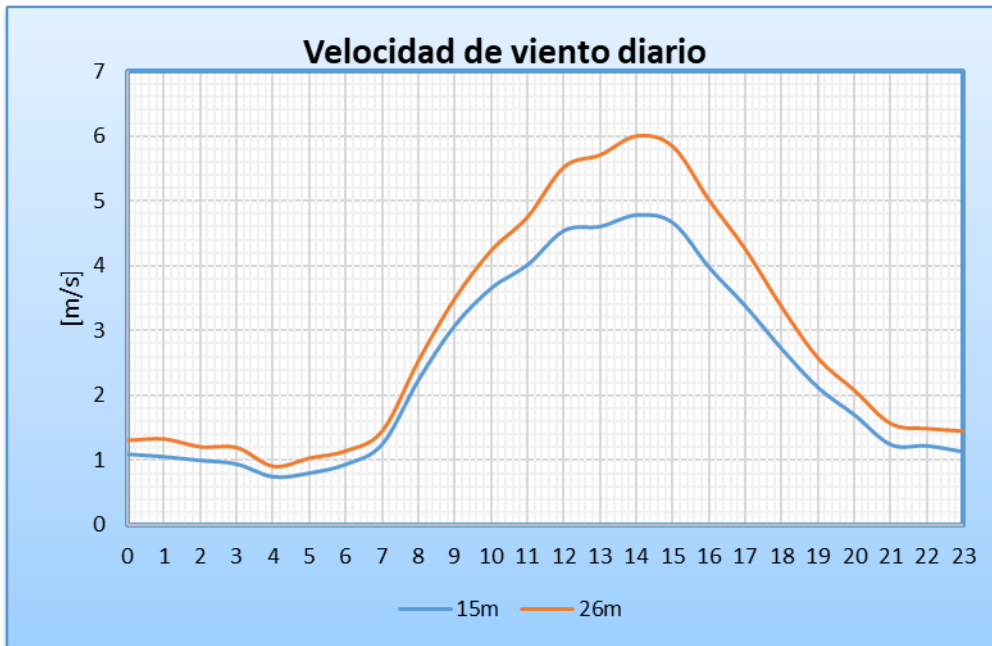
Curva de velocidad del viento para un día promedio del mes de noviembre de 2017

Fuente: ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca

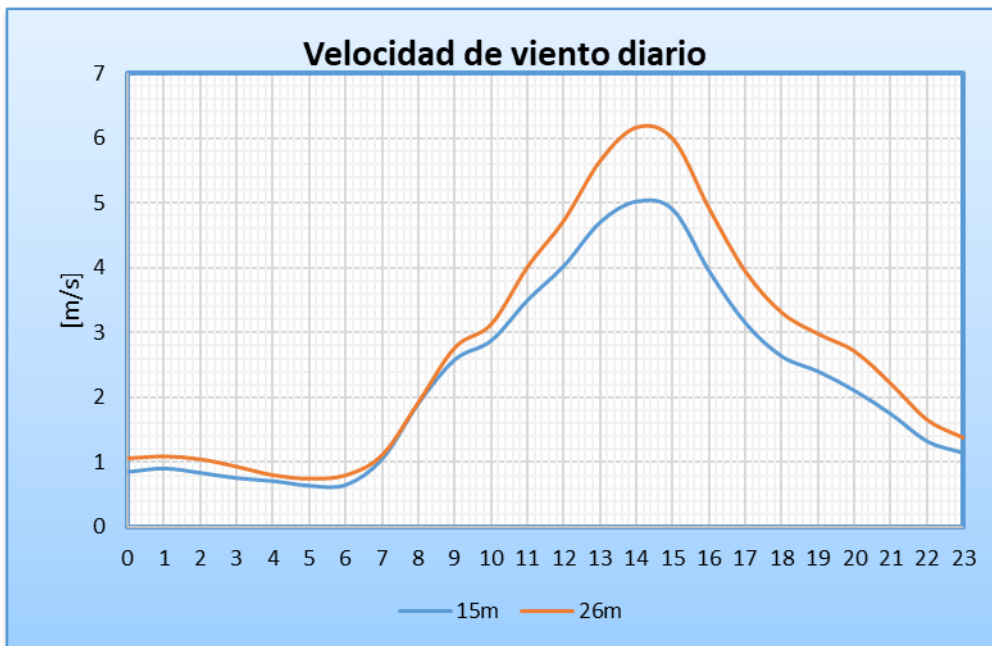


Curva de velocidad del viento para un día promedio del mes de diciembre de 2017

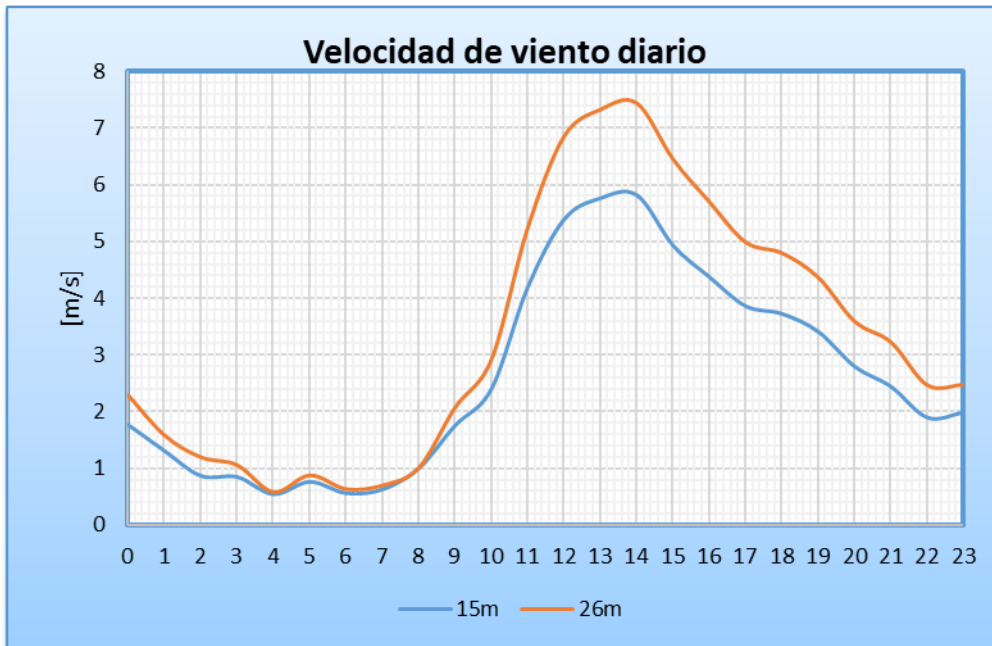
Fuente: ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca



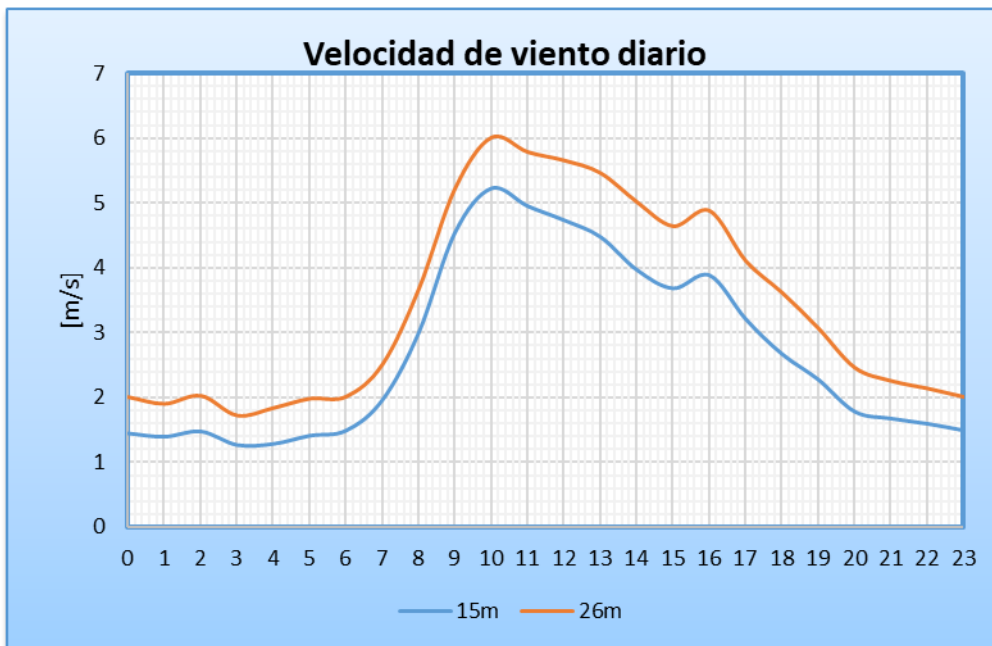
Curva de velocidad del viento para un día promedio del mes de enero de 2018
Fuente: ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca



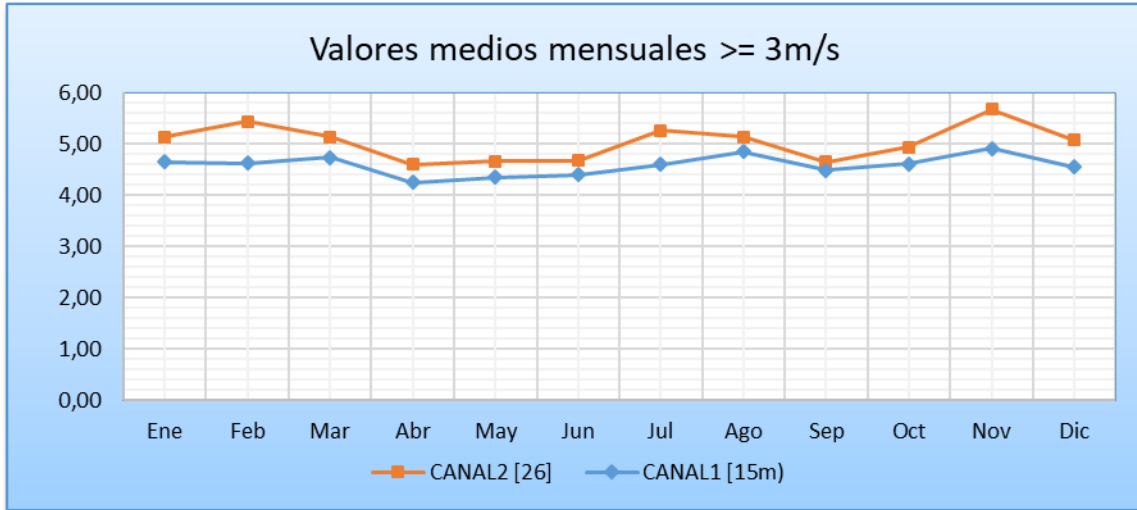
Curva de velocidad del viento para un día promedio del mes de febrero de 2018
Fuente: ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca



Curva de velocidad del viento para un día promedio del mes de marzo de 2018
 Fuente: ELECAUSTRO S.A, Universidad de Cuenca



Adicionalmente, se presenta un resumen para los valores medios mensuales para velocidades del viento mayores a 3 m/s.





10 BIBLIOGRAFÍA

- American Wind Energy Association . (2013). Small & Community Wind. Obtenido de <https://www.awea.org/small-and-community-wind>
- Ammonit. (26 de Junio de 2017). Energía Eólica. Obtenido de Cronología de los pioneros de la energía eólica: <http://www.ammonit.com/es/informacion-eolica/energia-eolica>
- ARCONEL. (2016). Estadística Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano.
- ARCONEL. (2017). Atlas del Sector Electrico Ecuatoriano 2016. Atlas Del Sector Electrico Ecuatoriano, 1, 113. Obtenido de http://www.regulacioneolica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/08/Atlas2016BajaV6_baja_113_1era_parte.pdf
- Bahrain World Trade Center. (2015). Architecture, Design & Awards. Obtenido de <http://www.bahrainwtc.com/content/architecture-design-awards>
- Bajaña, M. A. (2013). Análisis de Generación de Energía de un Mini-Parque Eólico. Universidad Católica de Cuenca.
- Barnett, D., & Bjornsgaard, K. (2000). Electric Power Generation.
- Blog de CEMAER. (31 de Marzo de 2011). Energía Eólica a Pequeña Escala. Obtenido de Aerogeneradores: <http://www.gstriatum.com/energiasolar/blog/2011/03/31/energia-eolica-a-pequena-escala/>
- Briefing, B., Small, S., & Energy, W. (2015). Small Wind Energy Systems. Montana The Magazine Of Western History, (July 2015). <https://doi.org/10.1080/15325008.2015.1029057>
- CIEMAT. (2009). Fomento de la Tecnología Eólica de Pequeña Potencia. Obtenido de <http://minieolica.ciemat.es/MINIEOLICAportal/>
- D'Ambrosio, M., & Medaglia, M. (2010). Vertical Axis Wind Turbines: History, Technology and Applications. Universidad de Halmstad (Högskolan Halmstad).
- Danish Wind Industry Association. (s.f.). Obtenido de <http://www.windpower.org/en>
- Danish Wind Industry Association. (12 de Mayo de 2013). Historia. Obtenido de Los aerogeneradores de la Cour: <http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/pictures/lacour.htm>
- Diario "El Mundo". (20 de Septiembre de 2011). Los daños reales de los molinos sobre las aves. Obtenido de <http://www.elmundo.es/elmundo/2011/09/20/natura/1316513879.html>



- ECOVIVE. (24 de Noviembre de 2016). Energías Renovables. Obtenido de Los Aerogeneradores según el Número de Palas: <http://ecovive.com/los-aerogeneradores-segun-el-numero-de-palas/>
- ENAIR. (s.f.). Aerogenerador ENAIR 70 PRO. Obtenido de <https://www.enair.es/es/aerogeneradores/e70pro>
- Fernández, L. R. (2017). La energía micro eólica y sus potencialidades en la diversificación de la matriz energética en el Ecuador. *Revista Ingeniería Química Y Desarrollo*, (December 2015).
- Fluke Corporation. (2012). Catalogo Fluke 434-II/435-II/437-II. Obtenido de <http://www.fluke.com/fluke/coes/support/manuals/default.htm>
- Franco, A. A., Puruncajas, L., & Ortiz, M. (2014). Estudio Exploratorio del Potencial de Generación de Energía Eólica y Fotovoltaica en el Distrito Metropolitano de Quito. *Medioambiente Y Gestión Del Riesgo*, 19–24.
- González, J. A. C., Pérez, R. C., Santos, A. C., & Gil, M. A. C. (2009). Centrales de energías renovables.
- GWEC. (18 de Diciembre de 2016). Global Statistics. Obtenido de <http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/Global-Cumulative-Installed-Wind-Capacity-2001-2016.jpg>
- Idrovo, P. X., & Romero, M. R. (2017). Análisis de Eficiencia Energética de la Granja Irquis de la Universidad de Cuenca. Universidad de Cuenca.
- INER. (2011). Informe técnico proyecto eólico, 1, 1–26.
- INER. (2013). Plan de Desarrollo Eólico en la Región Sur del País. Instituto Nacional de Eficiencia Energética Y Energías Renovables (INER). “Taller Sobre Energía Eólica,” 19–20.
- Kjellin, J., Bülow, F., Eriksson, S., Deglaire, P., Leijon, M., & Bernhoff, H. (2011). Power coefficient measurement on a 12 kW straight bladed vertical axis wind turbine. *Renewable Energy*, 36(11), 3050–3053. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.031>
- Lascorz, E. S., & CIEMAT, D. de E. R. (2014). Energía eolica de pequeña potencia.
- Lecuona Neumann, A. (2002). La Energía Eólica: Principios básicos y tecnología. Universidad Carlos III de Madrid, 81. Obtenido de http://www.agenergia.org/files/resourcesmodule/@random49917eec3c3bd/1234272455_eolica_ALecuona.pdf
- Magariño, J. F. (29 de Octubre de 2008). Un miniparque eólico para iluminar el rascacielos de Sacyr. Obtenido de https://cincodias.elpais.com/cincodias/2008/10/29/empresas/1225291206_850215.html
- Martínez, B. Q. (24 de Mayo de 2017). twenergy. Obtenido de Generación distribuida: Una puerta hacia la autogeneración:



<https://twenergy.com/a/generacion-distribuida-una-puerta-hacia-la-autogeneracion-2647>

- MEER. (20 de Enero de 2017). Planificación Estratégica. Obtenido de Valores/Misión/Visión: <http://www.energia.gob.ec/valores-mision-vision/>
- MEER. (2017). Plan Maestro de Electricidad 2016 - 2025. Quito.
- MEER-BID. (2016). Plan Nacional de Eficiencia Energética 2016-2035. Obtenido de <http://www.energia.gob.ec/biblioteca/>
- Menet, J. L. (2004). A double-step Savonius rotor for local production of electricity: A design study. *Renewable Energy*, 29(11), 1843–1862. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.02.011>
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (1 de Mayo de 2017). Electrificación rural con energías renovables. Obtenido de <http://www.energia.gob.ec/electrificacion-rural-con-energias-renovables/>
- Montesdeoca, L. (2011). Soberanía energética en Ecuador. Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales Sede Ecuador. Obtenido de <http://repositorio.flacsoandes.edu.ec/bitstream/10469/7638/2/TFLACSO-2011LCME.pdf>
- Moragues, J., & Rapallini, A. (2003). Instituto Argentino de la Energía. *Energía Eólica*, 22. Obtenido de http://www.iae.org.ar/renovables/ren_eolica.pdf
- Mosquera, M. C., Burneo, A. S., Villafuerte, L. M., Sarzosa, P. C., Idrovo, E. R., Dávalos, S., ... Salazar, C. O. (2013). Atlas Eólico. Ministerio De Electricidad Y Energía Renovable, 1, 56; QUITO-ECUADOR.
- National Geographic. (5 de Septiembre de 2010). National Geographic. Obtenido de Medio Ambiente: <http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/el-poder-del-viento>
- Opex Energy. (2017 de Mayo de 2017). Eólica. Obtenido de Tipos de Aerogeneradores: https://web.archive.org/web/*/http://opex-energy.com/eolica/tipos_aerogeneradores.html#1._SEGUN_EL_EJE_DE_GIRO_DEL_ROTOR.
- Paniello, V. (4 de Mayo de 2010). Todo Sobre Construcción Sostenible. Obtenido de Energía Eólica de Pequeña Potencia: <https://www.construible.es/2010/05/04/energia-eolica-de-pequena-potencia>
- Pitteloud, J.-D., & Gsänger, S. (2017). 2017 Small Wind World Report Summary. Obtenido de http://www.wwindea.org/wp-content/uploads/filebase/small_wind_/SWWR2017-SUMMARY.pdf
- Portillo, G. (21 de Junio de 2017). Renovables Verdes. Obtenido de <https://www.renovablesverdes.com/aerogeneradores-verticales/#Aerogeneradoresnbspvverticales>



- ProViento S.A. (2017). Energía para Garupamba. Obtenido de <http://www.proviento.com.ec/gamma.html>
- ProViento S.A. (2017). Sistema Híbrido del Pululahua. Obtenido de <http://www.proviento.com.ec/pululauhua.html>
- Raja, A. ., & Dwivedi, M. (n.d.). Power Plant Engineering.
- Repsol Innovación. (17 de Octubre de 2014). Blog de Innovación Tecnológica. Obtenido de Un proyecto del Fondo de Emprendedores ganador de The South Summit 2014: <http://blogs.repsol.com/innovacion/un-proyecto-del-fondo-de-emprendedores-ganador-de-the-south-summit-2014/>
- Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico. (30 de Enero de 2017). Capacidad instalada de energía eólica de China sigue creciendo en 2016. Obtenido de <https://www.evwind.com/2017/01/30/capacidad-instalada-de-energia-eolica-de-china-sigue-creciendo-en-2016/>
- Riofrio, D. (31 de Octubre de 2016). Energía Eólica. Obtenido de <https://www.slideshare.net/dannyrioerio/elica-1>
- Rodríguez, M. (2013). Beneficios de la generación distribuida mediante autoconsumo eléctrico. INESEM.
- Rudnick, H. (2010). Energía Eólica: La Generación Eólica- Capítulo 4. Energías Renovables No Convencionales: Energía Sustentable Para Chile, 83–99.
- Salazar, G., & Panchi, B. (2014). Análisis de la Evolución de la Demanda Eléctrica en el Ecuador Considerando el Ingreso de Proyectos de Eficiencia Energética, 33(3).
- SEO/BirdLife. (9 de Junio de 2015). Aerogeneradores sin palas, una solución para las aves y el clima. Obtenido de <https://www.seo.org/2015/06/09/aerogeneradores-sin-palas-una-solucion-para-las-aves-y-el-clima/>
- Sumba H, Elecaustro S.A. (1 de marzo de 2018). Entrevista personal Ing. Hector Sumba. ELECAUSTRO S.A
- Tech4CDM. (2008). La Energía Eólica en Ecuador. Tech4CDM. Obtenido de www.tech4cdm.com
- Torres, D. (2015). Diseño De Un Generador Eólico De Eje Vertical De Baja Potencia. Universidad Tecnológica de Pereira. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Torroglosa, D. (2013). Diseño de un aerogenerador. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Toyoda Technology Group. (s.f.). 5KW Vertical Axis Wind Turbine. Obtenido de <http://www.wptyd.com/product/77.html>
- Tullis, S., Fiedler, A., McLaren, K., & Ziada, S. (2008). Medium-solidity Vertical Axis Wind Turbines for use in Urban Environments. VII World Wind Energy Association Conference.



Uclm. (2011). Energía Eólica. Energía eólica.

<https://doi.org/http://www.energia.inf.cu/iee-mep/www/www.conae.gob.mx/renovables/eolica.html#Ehecatl>

Universidad Politécnica de Cartagena. (2008). Recursos Energéticos Distribuidos. In Generación Distribuida (p. 40).

WINDSPOT. (s.f.). Aplicaciones de las Turbinas Eolicas Windspot. Obtenido de <http://www.windspot.es/es/aplicaciones-energia-minieolica>

World Architecture News. (08 de Abril de 2008). BWTC turbines spin for first time. Obtenido de <http://www.worldarchitecturenews.com/project/2008/2133/atkins/bahrain-world-trade-center.html>