

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Ubicación de un Parque de Energía Eólica en la Costa Ecuatoriana

Diego Andrés Maldonado Rivera
Daniel Xavier De Jerónimo Toromoreno

Tesis de grado presentada como requisito
para la obtención del título de Ingeniero Industrial

Quito, septiembre 2008

**Universidad San Francisco de Quito
Colegio Politécnico**

HOJA DE APROBACION DE TESIS

Ubicación de un Parque de Energía Eólica en la Costa Ecuatoriana

Diego Andrés Maldonado Rivera

Daniel Xavier De Jerónimo Toromoreno

Héctor Andrés Vergara, M.Sc.

Director de la Tesis y

Miembro del Comité de Tesis

.....

Ximena Córdova, Ph.D.

Miembro del Comité de Tesis

.....

Pedro Alarcón, M.Sc.

Miembro del Comité de Tesis

.....

Fernando Romo, M.Sc.

Decano del Colegio Politécnico

.....

Quito, septiembre 2008

© Derechos de autor
Diego Andrés Maldonado Rivera
Daniel Xavier De Jerónimo Toromoreno
2008

A mis padres y a mi hermana, con los cuales,
mis anhelos se convierten en realidad.

Diego Maldonado

A mis padres, por su esfuerzo, dedicación y amor de cada día.
A mis hermanas por llenar mis momentos de fortaleza y alegría.

Daniel De Jerónimo

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que hicieron posible la realización de este proyecto:

A la Corporación para la Investigación Energética y a todo el grupo de personas que lo conforman, cuya investigación eólica en el Ecuador ha enriquecido este proyecto (Capítulo 3).

A la Dirección de Energías Renovables, por su apoyo en los lineamientos iniciales de este proyecto.

A Héctor Andrés Vergara, profesor de Ingeniería Industrial de la Universidad San Francisco, por su constante apoyo.

A la Universidad San Francisco de Quito, y en especial a la carrera de Ingeniería Industrial, por aportar a mi formación profesional.

Diego Maldonado

Deseo agradecer a las personas que con su aporte, ayuda, colaboración y apoyo hicieron posible la realización de este proyecto de tesis:

A Héctor Andrés Vergara, profesor de Ingeniería Industrial de la Universidad San Francisco de Quito, por brindar su apoyo y comprensión en todo momento.

A Ximena Córdova, por su importante y oportuna labor durante el desarrollo de mi carrera.

A la Universidad San Francisco de Quito, por brindarme la oportunidad de ser un ciudadano del mundo, gracias a una educación global.

Agradezco primero a Dios y también a mis padres, por haber sido mi guía para culminar con este anhelado sueño, que hoy ya es realidad.

A mis amigos, por formar parte del inicio y la culminación de una etapa más de mi vida, llena de gratos recuerdos y experiencias que jamás se repartirán.

Daniel De Jerónimo

Resumen

El presente proyecto de tesis describe un plan industrial para generar energía eléctrica utilizando los recursos eólicos del Ecuador. En el inicio de este proyecto, se indica una breve explicación al respecto de las energías renovables, en especial, la energía proveniente del viento y su importancia. El siguiente paso es el desarrollo de un procedimiento matemático, con el fin de encontrar un sitio de óptima ubicación en el Ecuador para efectuar la construcción del parque eólico.

El proyecto continúa con una investigación de las características del mercado eléctrico situado en el área de influencia seleccionada para el parque eólico. Considerando esta información, y en base a varios parámetros de producción y diseño, se dimensionan los aerogeneradores. Adicionalmente, se realiza un plano de los terrenos donde se localizará el parque eólico, después de efectuar su análisis respectivo. Finalmente, se detallan las actividades a seguir en la fase de construcción del parque eólico.

En un futuro, se espera que la información detallada en este proyecto de tesis proporcione el suficiente conocimiento técnico para llevar a la práctica una aplicación de energía eólica en el Ecuador.

Abstract

This thesis describes an industrial plan to generate energy using wind resources in Ecuador. At the beginning of this project, there is a brief explanation about renewable energies, particularly the wind energy and its relevance. The next step is the development of a mathematical procedure in order to find an optimal location site in Ecuador for the construction of a wind plant.

The project continues with a research of the main characteristics of the energy market located in the area surrounding the wind plant site. With that information taken into consideration, and based on some production and design parameters, the wind turbines are selected. Additionally, a layout of the wind plant is made after following its respective analysis. Finally, the activities to be executed at the construction phase of the wind plant are specified.

In the future, it is expected that the guidelines detailed in this thesis will provide useful information and knowledge to put in practice a wind energy application in Ecuador.

Tabla de Contenido

	Página
1. INTRODUCCIÓN DEL PROYECTO EÓLICO	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Alcance.....	2
1.4. Objetivos del Proyecto	2
1.4.1. Objetivos Principales.....	2
1.4.2. Objetivos Secundarios.....	3
1.5. Organización del Documento.....	3
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE LA ENERGÍA EÓLICA.....	4
2.1. Energías Renovables.....	4
2.1.1. Vientos: Una Fuente Inagotable	5
2.2. Aplicaciones de la Energía Eólica.....	5
2.2.1. Beneficios.....	6
2.2.2. Inconvenientes.....	7
2.2.3. Estadísticas de Energía Eólica a Nivel Mundial.....	7
2.2.4. Energía Eólica en el Ecuador.....	9
2.3. Equipos para Generar Electricidad.....	10
2.3.1. Aerogeneradores.....	10
2.3.2. Otros Equipos.....	13
2.4. Estudio de Vientos.....	14
3. LOCALIZACIÓN DE UN PARQUE EÓLICO.....	15
3.1. Introducción.....	15
3.2. Marco Teórico de los Problemas de Localización.....	15
3.2.1. Descripción del Problema de Localización de la p-Mediana.....	16
3.2.2. Formulación matemática para el Problema de la p-Mediana.....	16
3.2.3. Algoritmo de Resolución.....	17
3.3. Aplicación de un Problema de Localización.....	18
3.3.1. Selección de un Territorio en Ecuador.....	18
3.3.2. Coordenadas de Localización de Clientes.....	20
3.3.3. Pesos Asignados a cada Cliente.....	21
3.3.4. Planteamiento Matemático del Problema de Localización.....	31
3.3.5. Norma para Medir Distancias.....	31
3.3.6. Resolución del Problema de Localización.....	31
3.4. Validación de la Localización del Parque Eólico.....	34

Tabla de Contenido (Continuación)

	Página
4. DIMENSIONAMIENTO TÉCNICO DEL PARQUE EÓLICO	35
4.1. Introducción.....	35
4.2. Demanda de Energía en la Provincia de Manabí.....	35
4.2.1. Previsión Futura de la Demanda de Energía	37
4.2.2. Otros aspectos sobre la Demanda de Energía en Manabí.....	40
4.3. Comportamiento del Viento	41
4.4. Selección de los Aerogeneradores.....	42
4.4.1. Número de los Aerogeneradores	44
4.4.2. Validación del Número de Aerogeneradores.....	45
5. DISTRIBUCIÓN DE COMPONENTES EN EL PARQUE EÓLICO	51
5.1. Introducción.....	51
5.2. Marco Teórico de la Distribución de Plantas Industriales.....	51
5.3. Diseño de Layout del Parque Eólico	52
5.4. Flujo de Operaciones	53
5.4.1. Relación de Operaciones	55
5.5. Diagrama de Relaciones	56
5.6. Distribución de Espacios	57
5.7. Análisis de la Producción en el Parque Eólico	58
6. CONSTRUCCIÓN DEL PARQUE EÓLICO.....	60
6.1. Descomposición en Actividades.....	60
6.2. Plan Logístico para el Transporte y Montaje de Equipos.....	66
6.3. Plan de Seguridad Industrial.....	68
6.3.1. Riesgos mecánicos.....	69
6.3.2. Riesgos eléctricos	69
6.3.3. Riesgos al instalar las torres en las plataformas	70
6.4. Conexión con la Red Eléctrica de la Empresa Eléctrica Manabí	70
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
7.1. Conclusiones.....	72
7.2. Recomendaciones	74
BIBLIOGRAFÍA	75

Tabla de Contenido (Continuación)

	Página
ANEXOS	80
Anexo A. Información Adicional sobre Proyectos Eólicos Ecuatorianos.....	81
Anexo A.1. Proyecto Eólico San Cristóbal	81
Anexo A.2. Proyecto Eólico Villonaco	81
Anexo A.3. Proyecto Eólico Membrillo.....	82
Anexo A.4. Proyecto Minas de Huascachaca.....	82
Anexo B. Teoría sobre los aerogeneradores.....	83
Anexo B.1. Componentes.....	83
Anexo B.2. Clasificación.....	84
Anexo B.3. Parámetros.....	84
Anexo B.4. Potencia generada.....	85
Anexo C. Mapa Eólico del Ecuador	87
Anexo D. Resolución del Modelo Matemático	88
Anexo E. Estudio de Vientos realizado en el Aeropuerto Los Perales.....	90
Anexo E.1. Medición de Velocidades de Vientos.....	90
Anexo E.2. Medición de Direcciones de Vientos.....	91
Anexo F. Características del Aerogenerador ENERCON Modelo E-53.....	93
Anexo G. Información sobre la Empresa Eléctrica Manabí.....	95

Lista de Figuras

	Página
Figura 1. Capacidad Instalada Mundial, en MW (1996 - 2007).....	7
Figura 2. Producción de Energía Eólica en MW, Latinoamérica 2007.....	8
Figura 3. Mapa Eólico de la Provincia de Manabí.	22
Figura 4. Esquema del Líneas de Transmisión y Subestaciones en Manabí.....	25
Figura 5. Ubicación Geográfica del Parque Eólico.....	33
Figura 6. Demanda Mensual de Energía Eléctrica de Clientes Regulados.	37
Figura 7. Pronóstico de la Demanda de Energía Eléctrica.....	39
Figura 8. Histograma de los Datos de Viento.....	46
Figura 9. Gráficos de Probabilidad.....	47
Figura 10. Análisis de la Potencia Efectiva del Parque Eólico.	49
Figura 11. Proceso de Producción de Energía Eléctrica.....	54
Figura 12. Tabla de Relaciones de Actividades.	56
Figura 13. Diagrama de Relaciones.....	56
Figura 14. Diagrama de Relaciones de Espacios.....	57
Figura 15. Esquema de Utilización del Terreno del Parque Eólico.....	59
Figura 16. Red del Proyecto Eólico.....	66

Lista de Figuras de Anexos

	Página
Figura 17. Componentes de un aerogenerador.	83
Figura 18. Parámetros de los Aerogeneradores.	84
Figura 19. Mapa Eólico del Ecuador	87
Figura 20. Representación de Direcciones en Rosa de Vientos.	92
Figura 21. Aerogenerador Enercon modelo E-53.....	93

Lista de Tablas

	Página
Tabla 1. Nuevos Proyectos de Generación de Energía.....	9
Tabla 2. Proyectos Eólicos en el Ecuador, al 2008	10
Tabla 3. Resumen Informativo de Proyectos Eólicos.....	11
Tabla 4. Promedios Mensuales de Velocidad de Viento	19
Tabla 5. Estadísticas Descriptivas de los Promedios Mensuales.....	19
Tabla 6. Coordenadas de Ubicación de Clientes	21
Tabla 7. Velocidades de Viento por Cabecera Cantonal.....	22
Tabla 8. Número de Viviendas sin Cobertura Eléctrica por Cantón	23
Tabla 9. Acceso a Red Vial	24
Tabla 10. Distancia a Subestaciones de la Empresa Eléctrica Manabí	26
Tabla 11. Número de Pobladores Rurales por Cantón	26
Tabla 12. Población por Cantón.	27
Tabla 13. Información Consolidada por Cantón	28
Tabla 14. Límites de Distribuciones Uniformes Para Ponderación de los Factores.....	28
Tabla 15. Calificaciones por Cantón	29
Tabla 16. Ponderaciones de Calificaciones.	30
Tabla 17. Ponderaciones Aplicadas a cada Cantón	30
Tabla 18. Datos Informativos de cada Localización del Cliente.....	32
Tabla 19. Venta de Energía E.E. Manabí	35
Tabla 20. Energía Mensual Facturada a Clientes Regulados	36
Tabla 21. Energía Mensual Pronosticada.	40
Tabla 22. Promedios Mensuales de Velocidades de Vientos en el Aeropuerto “Los Perales” desde 1978 hasta 2004.....	41
Tabla 23. Promedios Mensuales de Velocidades Máximas de Vientos en el Aeropuerto “Los Perales” desde 1978 hasta 2004.....	42
Tabla 24. Pruebas de Bondad de Ajuste.	46
Tabla 25. Cálculos de Potencia Efectiva Simulada, Aerogenerador 1.....	48
Tabla 26. Prueba t para la Potencia Efectiva.	50
Tabla 27. Características de una Distribución de Planta orientada al Producto.....	52

Lista de Tablas de Anexos

	Página
Tabla 28. Datos Iniciales del Problema de Localización.	88
Tabla 29. Resultados de las Iteraciones del Problema de Localización.	88
Tabla 30. Historial de Velocidades de Vientos, Aeropuerto “Los Perales”	90
Tabla 31. Historial de Direcciones de Vientos, Aeropuerto “Los Perales”	91
Tabla 32. Información Técnica sobre el Aerogenerador Enercon E-53	94

Addendum

Al 11 de Septiembre de 2008, el presente proyecto de tesis registra dos actualizaciones. La primera se refiere al Ministerio encargado de regular la electrificación del Sector Eléctrico Ecuatoriano. En este documento, se menciona al Ministerio de Minas y Petróleos. Actualmente, el Ministerio de Electricidad y Energías Renovables es quien regula la electrificación nacional.

La segunda actualización se refiere al Fondo para Electrificación Rural y Urbano-Marginal (FERUM). Este fondo ha dejado de estar en vigencia desde el 7 de Agosto de 2008 por mandato constitucional del Gobierno del Ecuador. Se recomienda efectuar una nueva distribución de porcentajes en los factores indicados en la Tabla 16, sección 3.3.3.

UBICACIÓN DE UN PARQUE DE ENERGÍA EÓLICA EN LA COSTA ECUATORIANA

1. INTRODUCCIÓN DEL PROYECTO EÓLICO

1.1. Antecedentes

La gran demanda de energía incrementa cada día más y más, en especial por el estilo de vida de la humanidad actual. En el caso del Ecuador, el crecimiento de la población y el aumento del número de industrias son las principales causas para el incremento de la demanda de energía. Además, existe un gasto innecesario de energía que aumenta significativamente la demanda (“Mayor Consumo” par. 3, 2007). Según la empresa generadora de energía *Termopichincha*, la demanda de energía del Ecuador tiene un crecimiento promedio anual del 6%. Esto implica que si la demanda máxima fuera de 2200 MW, anualmente debería aumentar la generación al menos 132 MW para sustentar este crecimiento (“Proyecto Gas” par. 1, 2008)

Hasta hace unos pocos años atrás era evidente el drama que vivía el Ecuador en materia de generación eléctrica. La problemática surgió debido al descuido, inacción y la falta de preocupación sus gobiernos en turno (“Delinean” par. 4, 2003). Asimismo, otros hechos que afectaron la generación energética son los siguientes:

- Obsolescencia e ineficiencia tecnológica de varias centrales térmicas del país.
- Importación del 12% del consumo de energía, desde Colombia (Guillén par. 1, 2006).
- Parque generador indisponible por mantenimientos, en promedio anual 500 MW.
- Producción de energía deficiente en varios períodos en el año, debido a estiajes, paralizaciones y apagones (Parrini par. 1, 2007).

Para afrontar dichos inconvenientes, el sector eléctrico ecuatoriano debe promover nuevos proyectos de generación de energía a corto plazo. Actualmente, una estrategia adoptada por el Ministerio de Minas y Petróleos, a través de la Subsecretaría de Electrificación, es el aprovechamiento de los recursos renovables. Este tipo de energías son prácticamente inagotables y amigables para el medio ambiente. En particular, la generación de energía en el país mediante recursos eólicos puede constituirse como una solución para satisfacer la creciente demanda de energía nacional, y de ésta manera ser una pieza clave para el desarrollo de las futuras generaciones ecuatorianas.

1.2. Justificación

Desde la perspectiva de la consecución de un título de Ingeniería Industrial, el presente proyecto es consistente con los conceptos propuestos por Maynard: “diseñar, mejorar e instalar sistemas integrados de materiales, equipos y energía, teniendo una base de conocimientos especializados en ciencias físicas y matemáticas, junto con principios de análisis de ingeniería para la satisfacción de necesidades de la sociedad, especificando y evaluando los resultados del sistema” (1.41, 2001). En este caso, el sistema es un parque eólico, y la sociedad, la ecuatoriana.

Por otro lado, el desarrollo del presente proyecto eólico tiene beneficios ambientales, sociales y económicos, los cuales serán detallados a lo largo de este estudio. Principalmente, se brinda una solución para aumentar la capacidad de generación de energía útil para la población ecuatoriana. Por su parte, al producir este tipo de energía, proveniente de una fuente renovable, se disminuye la dependencia del uso de combustibles fósiles en cuanto a la generación energética. Finalmente, al proyectar la construcción de un parque eólico que reemplace a una central térmica de generación de energía, se presenta otro de los beneficios importantes del proyecto eólico: el ahorro sustancial en toneladas de CO₂ no emitidas, beneficiando siempre a la población nacional y mundial.

1.3. Alcance

El alcance del presente proyecto incluye la investigación acerca de los recursos naturales ecuatorianos con fines energéticos, además de las fases de identificación, investigación y diseño de un parque eólico, en un lugar de ubicación óptima en el Ecuador.

1.4. Objetivos del Proyecto

1.4.1. Objetivos Principales

- Promover una aplicación de generación de energía eólica en el Ecuador, indicando sus principales ventajas económicas, sociales y ambientales.
- Investigar acerca de los recursos eólicos que posee el Ecuador.
- Ubicar un parque eólico en un sitio óptimo en la costa ecuatoriana.
- Determinar la cantidad de energía a generar en base a los recursos eólicos del sitio seleccionado.
- Establecer un plan de construcción de un parque eólico en el Ecuador.

1.4.2. Objetivos Secundarios

- Determinar los parámetros más influyentes en la selección del sitio óptimo del parque eólico en la costa ecuatoriana.
- Organizar los componentes principales del parque eólico, de tal manera que la generación de energía sea óptima.
- Analizar el sistema de producción de energía eléctrica a través del parque eólico.

1.5. Organización del Documento

Se inicia en el Capítulo 2 con una breve explicación de las fuentes de energía renovables, en especial, la energía del viento y cómo obtenerla para el beneficio de quienes demandan de un servicio eléctrico.

Los siguientes capítulos tratan acerca del diseño de una instalación industrial para generar energía eléctrica por medio del viento. En el Capítulo 3, se investiga sobre la ubicación del parque eólico en la costa del Ecuador. En el Capítulo 4, se dimensiona la instalación industrial, en base a la demanda poblacional del consumo eléctrico y a los recursos naturales que estén disponibles. En el Capítulo 5, se construye un diseño de planta con los componentes principales de instalación. Finalmente, en el Capítulo 6, se planifican las actividades para llevar a cabo la construcción de la planta generadora de energía por medio de los recursos eólicos.

Para finalizar, las conclusiones y recomendaciones del presente proyecto de detallan en el Capítulo 7.

Es notable observar cómo organizaciones gubernamentales y no gubernamentales incentivan el uso de energías renovables, con el fin de satisfacer las necesidades de los mercados eléctricos de los cinco continentes. En particular, los proyectos de generación de energía basados en el uso de fuentes renovables pueden formar negocios rentables con visión en el presente y en el futuro.

2.1.1. Vientos: Una Fuente Inagotable

Los vientos se originan debido a diferencias de temperatura y presión (Mosquera 2, 2006). Por un lado, a partir de diferencias de temperatura, las masas de aire caliente tienden a ascender, y su lugar es ocupado por masas de aire frío, creando corrientes de aire que se desplazan en sentido horizontal. Por otro lado, a partir de diferencias de presión, se acelera el aire en la atmósfera y lo hacen descender hacia la superficie, creando los vientos. Por esta periodicidad, el viento es capaz de generar un tipo de energía continua y prácticamente inagotable.

Varias evaluaciones científicas han demostrado que los recursos eólicos son enormes y están bien dispersos por los cinco continentes (Escudero 97, 2004). En el caso de Ecuador, los vientos se producen debido a las diferencias térmicas en los valles en la zona de los Andes o en las zonas costeras (Sánchez 104, 2004). Estos antecedentes confirman el hecho de que existen vientos que pueden ser utilizados en beneficio de la generación energética del país. En el Capítulo 3 se conocerá más a fondo sobre el comportamiento de los vientos en el Ecuador.

2.2. Aplicaciones de la Energía Eólica

Antiguamente, la energía eólica se utilizó en el movimiento de barcos impulsados a través de velas y en el funcionamiento de la maquinaria de molinos de viento, empleados para la producción de harina (Sánchez 102, 2004).

En la actualidad, la generación eléctrica es la aplicación más importante de la energía eólica (“Energía Limpia”19, 2007). Esta energía se transforma en energía mecánica a través de una máquina llamada *aerogenerador* o *turbina de viento*. Dicha máquina se instala en una zona donde las condiciones climáticas favorecen los vientos. Por su parte, la explotación de la energía eólica se lleva a cabo colocando un conjunto de aerogeneradores en una instalación industrial, llamada *parque eólico*. Esta energía satisface una porción de la demanda total de electricidad de la población mundial.

2.2.1. Beneficios

Comercialmente, la energía eólica propicia nuevas oportunidades de negocio. Pese a que un parque eólico tiene un costo de inversión relativamente alto comparado con otras centrales de generación de energía, posee también un bajo costo de operación. Se estima que un aerogenerador tiene un factor de disponibilidad cercano al 98% y una vida útil mayor a los 20 años (Mosquera 7, 2006), lo cual hace que la construcción de un parque eólico sea una opción atractiva para los inversionistas.

Ambientalmente, al comparar una central térmica con un parque eólico, se verifica que el funcionamiento de la primera aumenta el consumo de derivados del petróleo y, por ende, de emisiones de contaminantes. En cambio, un parque eólico evita el ingreso aproximado de 800.000 toneladas de CO₂ equivalentes a la atmósfera (“Resumen Ejecutivo” 5, 2006). Por este motivo, al instalar los aerogeneradores para producir energía, no se modifica el equilibrio térmico del planeta y se conserva el estado de la atmósfera mundial.

Económicamente, un proyecto eólico elaborado en el Ecuador puede captar beneficios económicos al participar del programa *Mecanismo de Desarrollo Limpio* (MDL), respaldado por el Protocolo de Kyoto (Bauer pág. 1.9, 2005). En el MDL, existe la venta de Certificados de Emisiones Reducidas (CER), al mitigar la emisión o al retener gases de efecto invernadero que entran en la atmósfera. En particular, el parque eólico puede vender sus CER, al incorporar el uso de fuentes renovables en sus procesos energéticos. Paralelamente, se minimizan los impactos provocados por los gases de efecto invernadero: CO₂, NO_x y CH₄.

Socialmente, la construcción del parque eólico genera varios impactos positivos para la población. Al construir el parque eólico, aumenta la tasa de empleo de la población y mejoran los servicios básicos de la comunidad localizada en el área de influencia del proyecto (luz, agua, teléfono), así como sus caminos y carreteras. Por este motivo, los terrenos circundantes al parque eólico son más accesibles y aumentan su plusvalía.

Otro aporte importante de la construcción de un parque eólico en el Ecuador es el aporte al conocimiento tecnológico nacional. Se impulsa la educación ambiental y energética de las comunidades locales, que poco o nada conocen acerca de energías renovables. Además se promueve la investigación, desarrollo y uso de tecnologías energéticas renovables en futuros proyectos nacionales.

2.2.2. Inconvenientes

Pese a que la energía eólica es inagotable y limpia, presenta varios inconvenientes. Algunos de ellos se relacionan con la fuente natural de esta energía. Dado que el viento generalmente es disperso, intermitente y aleatorio, unas veces no es suficientemente fuerte y otras, es tan fuerte que puede destruir a los aerogeneradores (Escudero 141, 2004). Por su parte, a mayor cantidad de viento, aumentan los problemas de corrosión, de erosión, de esfuerzo y de orientación de los aerogeneradores. Para mitigar estos inconvenientes, es necesario llevar a cabo un profundo estudio de los recursos eólicos antes de iniciar la instalación de los aerogeneradores.

Adicionalmente, la producción eléctrica en base a recursos eólicos puede causar ciertos impactos ambientales, como los cambios visuales en el paisaje, la generación de ruido y el daño a especies de aves (Mosquera 15, 2006).

2.2.3. Estadísticas de Energía Eólica a Nivel Mundial

La energía eólica ha crecido sustancialmente dentro de los mercados de generación de energía a nivel mundial. Para verificar la relevancia que tiene el viento como una fuente de generación de energía, se observa en la Figura 1 el crecimiento de la capacidad instalada de energía eólica en el mundo (“US, China” par. 2, 2008).

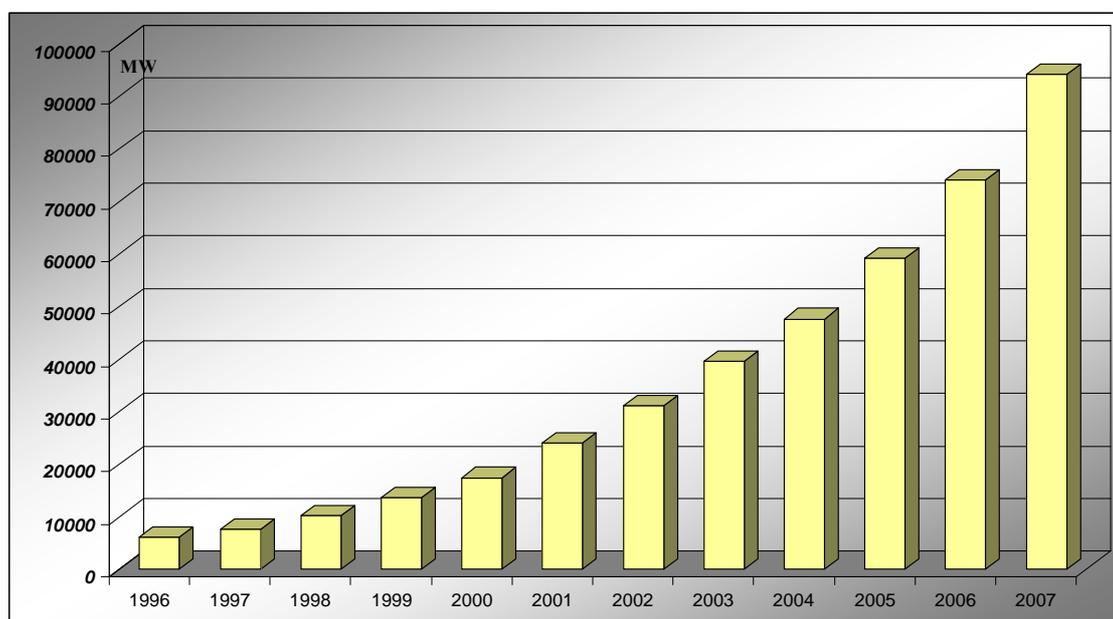


Figura 1. Capacidad Instalada Mundial, en MW (1996 - 2007)

Algunos datos destacables de la Figura 1, la capacidad instalada fue de 6.100 MW en el año 1996, y su valor máximo alcanzó los 94.100 MW en el año 2007. Además, el mayor porcentaje de incremento de capacidad instalada mundial de energía eólica se produjo entre en los años 2006 y 2007, y se calcula en un 27%.

A continuación se indica el aporte regional a nivel de continentes a la industria eólica mundial, según un reporte de *Christian Kjaer*, ejecutivo en jefe de la *European Wind Energy Association EWEA* (“US, China” par. 3-10, 2008):

- Europa aporta el 75% de la energía eólica mundial, siendo Alemania (22.100 MW) y España (15.100 MW) sus países líderes en el año 2007. Además el aprovechamiento europeo de la energía eólica se incrementa más que cualquier otra forma de energía (40% de las nuevas instalaciones de generación de energía).
- En los Estados Unidos, la capacidad instalada total en el año 2007 llegó a 16.800 MW, creciendo en un 45% de su capacidad instalada en el año 2006. A finales del año 2009, este país podría ser el líder mundial en energía eólica.
- En Asia, la capacidad instalada total de India en el año 2007 llegó a 8.000 MW, ocupando la cuarta posición mundial, mientras que en China, llegó a 6.000 MW, dejando a este país en una quinta posición mundial de capacidad instalada.
- Entre Latinoamérica, se destacan Brasil, Costa Rica y México son los mercados eólicos con más destacables con algunos proyectos concretados. Para inicios del año 2008, la producción de energía eólica en Latinoamérica se distribuye en cada país, tal como se indica en la Figura 2 (“Global Installed” 1, 2008).

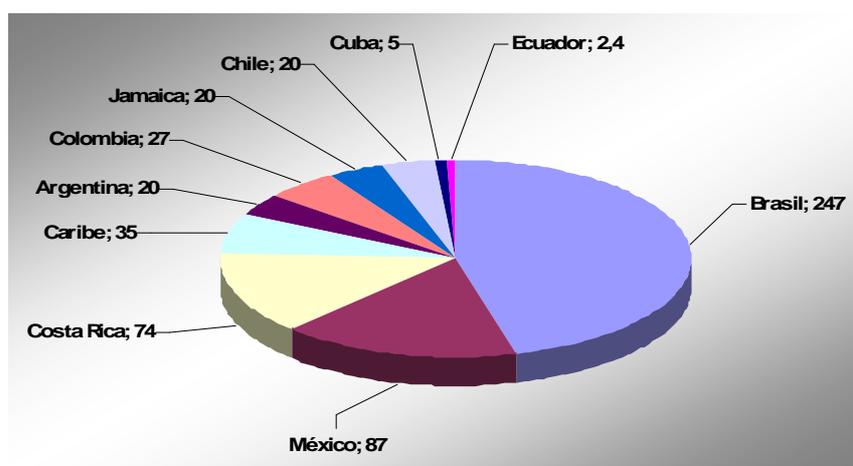


Figura 2. Producción de Energía Eólica en MW, Latinoamérica 2007.

A futuro, los países europeos esperan que la energía eólica sea utilizada en el 50% de la producción de electricidad. La instalación de 50.000 turbinas eólicas en los mares europeos podría generar suficiente energía para satisfacer las necesidades de 150 millones de hogares europeos. De hecho, hay un compromiso a cumplir en el año 2020 para que la energía eólica satisfaga el 12% del consumo mundial de energía (Sánchez 102, 2004).

2.2.4. Energía Eólica en el Ecuador

Actualmente, el Ecuador produce la mayoría de su electricidad haciendo uso de sus recursos hídricos. Adicionalmente, existen nuevos proyectos de electrificación que maneja el Ministerio de Minas y Petróleos. Un resumen de estos proyectos, por tipo de generación de energía, se presenta en la Tabla 1 (“Nuevos Proyectos” 1, 2008).

Tabla 1. Nuevos Proyectos de Generación de Energía.

Generación de Energía	Potencia (MW)
Hidroeléctrica	1.865,0
Interconexión COL	250,0
Interconexión PERU	80,0
Térmica	400,0
Otros Proyectos	60,0
Total General	2.655,0

Más aún, el Ecuador posee otros recursos pueden ser explotados en beneficio de la generación eléctrica. Este es uno de los lineamientos que sigue la Dirección Nacional de Energías Renovables y Eficiencia Energética del Ecuador. Su responsable, el Ing. Jimmy Pesantes, destaca que el aprovechamiento de recursos no convencionales debe aumentar con miras a satisfacer las necesidades futuras del país en el desarrollo del sector energético (Pesantes, 2008). Adicionalmente, la Organización Latinoamericana de Energía, OLADE, ha reportado positivamente el potencial energético ecuatoriano. Destaca el hecho que el Ecuador promueve el aprovechamiento de fuentes naturales para la generación de energía limpia, como la hidroeléctrica, eólica, geotérmica, mareomotriz y de biomasa, que tienen grandes posibilidades de ser aplicadas en el país (“Ecuador” par. 8, 2008).

No obstante, la industria eólica en el Ecuador está viendo sus primeros proyectos ponerse en marcha, con el fin de aprovechar sus fuentes renovables de energía y de atender la demanda de energía de sus territorios. Actualmente se ha investigado acerca de los siguientes proyectos eólicos en el Ecuador, los cuales se muestran en la Tabla 2:

Tabla 2. Proyectos Eólicos en el Ecuador, al 2008

Proyecto Eólico	Potencia (MW)
San Cristóbal	2,4
Villonaco	25
Membrillo	45
Minas de Huasachaca	30

En la Tabla 3, se presenta un resumen técnico de los cuatro proyectos eólicos ecuatorianos indicados (“Acerca Proyecto” par. 1; “Resumen Ejecutivo” 1, 2006; “Resumen Informativo” 1, 2006; “Proyecto Minas” par. 3). Además, se presenta una descripción más amplia en el Anexo A. En general, se observa que estos proyectos son auspiciados por organismos nacionales e internacionales, gubernamentales y privados; y tienen como objetivo común la utilización de recursos naturales para electrificar a zonas urbanas o rurales.

2.3. Equipos para Generar Electricidad

2.3.1. Aerogeneradores

Un aerogenerador es una máquina capaz de transformar la fuerza cinética del viento en electricidad (Mosquera 3, 2006). El funcionamiento de esta máquina se basa en el movimiento de su hélice, la cual aprovecha la energía eólica proveniente del aire y mientras más pesado se encuentra el aire, más fuerza podrá entregar el aerogenerador (Sánchez 109, 2004). Debido a que la velocidad del viento aumenta con la altura respecto a la superficie, se ubica al aerogenerador tan alto como sea posible.

Un aerogenerador moderno de gran potencia alcanza un rendimiento del 50%. Comienza a funcionar con una velocidad del viento entre 3 y 4 m/s, gracias al desarrollo de hélices de fibra de carbono y a mejoras aerodinámicas. Alcanza su potencia nominal para velocidades entre 12 y 15 m/s. Luego, se interrumpe su funcionamiento para velocidades del viento entre 20 y 25 m/s (Escudero 138, 2004).

Tabla 3. Resumen Informativo de Proyectos Eólicos

		San Cristóbal	Villonaco
	Localización	Isla San Cristóbal	Cerro Villonaco
	Provincia	Galápagos	Loja
	Sistema empleado	Eólico – diesel	Parque eólico
	Costo aproximado	9,8 millones USD	24 millones USD
Especificaciones Técnicas	Altura sobre nivel del mar	50 msnm	2600 - 2700 msnm
	Velocidad media anual	-	10,5 - 11 m/s
	Torres de medición	1	3
	Altura de medición	50 m	50 m
	# aerogeneradores	3	14
	Diámetro de las aspas	59 m	31 - 35 m
	Potencia TOTAL	2,4 MW	15 MW
Fechas	Inicio de fase de medición	Diciembre 2001	Diciembre 2003
	Fin de fase de instalación	Agosto del 2007	2007
	Inicio de fase de operación	Octubre del 2007	2008
Empresas Involucradas	Empresa Ecuatoriana	Elecgalápagos S.A.	Enerloja S.A.
	Miembros Internacionales	Grupo empresarial e8 Fundación Naciones Unidas	Protocol Energy Inc. (Canadá) Normawind (España)
	Modalidad	Fideicomiso mercantil	Conformación de empresa, Villonaco Wind Power S.A.
Objetivos	Institucional	Generar el 70% de la energía en las Islas	Mejorar la calidad de vida de habitantes
	Ambiental	Reducir la dependencia de diesel importado	Manejar los impactos que podrían generar al medio físico

Tabla 3. Resumen Informativo de Proyectos Eólicos (Continuación)

		Membrillo	Huascachaca
	Localización	Cerro Membrillo	Minas de Huascachaca
	Provincia	Loja	Azuay
	Sistema empleado	Parque eólico	Parque eólico
	Costo aproximado	380.000 USD (estudio de factibilidad)	n/e*
Especificaciones Técnicas	Altura sobre nivel del mar	2600 msnm	1100 msnm
	Velocidad media anual	9,1 m/s	5.9 m/s 6,7 m/s altura eje
	Torres de medición	3	3
	Altura de medición	40 m (x2) y 70 m	26 m
	# aerogeneradores	-	20
	Diámetro de las aspas	-	71 m
	Potencia TOTAL	45 MW	30 MW
Fecha	Inicio de fase de medición	Marzo del 2003	1978
Empresas Involucradas	Empresa Ecuatoriana	Enerloja S.A.	Corporación para la Investigación Energética, CIE
	Miembros Internacionales	Normawind (España)	-
	Modalidad	En busca de financiamiento de organismos internacionales	Medición en sitio y estudio de factibilidad
Objetivos	Institucional	Contribuir al desarrollo de energías renovables	Fomentar proyectos de generación eléctrica
	Ambiental	Preservar las áreas protegidas provinciales	-

* n/e: No especificado.

Se estima que la vida útil de un aerogenerador dura de 20 a 25 años, efectuando un mantenimiento preventivo cada 3500 horas, es decir, cada 6 meses, aproximadamente. Lo cual indica que su factor de disponibilidad es alrededor del 98% (Mosquera 7, 2006). En el Anexo B, se proporciona más información sobre la teoría de los aerogeneradores.

2.3.2. Otros Equipos

Para la generación de energía de un parque eólico, se indica una lista de componentes que complementan el funcionamiento de los aerogeneradores (Escudero 150, 2004):

- **Cables:** transmiten la electricidad desde el aerogenerador.
- **Baterías:** almacenan la electricidad producida para usarla cuando se necesite, independientemente de la existencia de viento. El tamaño del conjunto de baterías está relacionado con la potencia a instalar.
- **Regulador de carga:** protege a las baterías de sobrecargas de energía, detectando el estado de la carga de la batería en cada momento y regulando el paso de la energía.
- **Inversor:** transforma la electricidad continua en trifásica alterna.
- **Convertidor:** interconecta la producción del aerogenerador con la red eléctrica, manteniendo el voltaje de conexión estable y variando los amperios de salida.
- **Edificio de control:** posee los siguientes componentes para regular el funcionamiento de los aerogeneradores y controlar la energía generada:
 - *Interruptor trifásico:* crea un cortocircuito en el alternador del aerogenerador actuando de modo de freno.
 - *Piloto:* indica que el aerogenerador está produciendo electricidad.
 - *Detector de fallo de red:* verifica que el circuito está cerrado.
 - *Sensor de tensión del aerogenerador:* cierra el circuito al producirse corriente.
 - *Amperímetro:* da lectura de la corriente producida
 - *Transformador:* convierte la electricidad alterna producida.
 - *Rectificador:* pasa a continua la electricidad alterna producida.
 - *Inversor:* organiza el paso de corriente y transforma en trifásica alterna la electricidad continua rectificada.
 - *Contador:* registra la potencia producida por el sistema.

- **Línea eléctrica:** Efectúa la conexión desde el edificio de control del parque a la red eléctrica que, a su vez, distribuye la energía a sus clientes.

2.4. Estudio de Vientos

Para el desarrollo de proyectos eólicos, es necesario conducir un estudio de vientos, en el cual se investigue los siguientes aspectos (Escudero 81, 2004):

- Velocidad media del viento.
- Distribución de frecuencias en las diferentes direcciones.
- Variación del viento con respecto a la altura y posición
- Estadística de ráfagas.
- Velocidad máxima
- Distribución del día típico medio (diurno y nocturno)

En este estudio, se miden las velocidades de los vientos utilizando un anemómetro. Este es un equipo que tiene tres brazos, separados por ángulos de 120° , y se mueven alrededor de un eje vertical. Los brazos giran con el viento y permiten medir su velocidad (Sánchez 115, 2004). Por su parte, se determinan las direcciones de los vientos utilizando una veleta, la cual marca la dirección resultante en grados en una rosa de vientos.

Por otro lado, el estudio de vientos se realiza a través de un proceso largo y costoso. Antes de invertir en un sistema eólico, se efectúa una campaña de registro de datos eólicos, en la cual se investigan aquellos parámetros básicos para el desempeño del parque eólico. Por este motivo, la campaña se extiende al menos durante un año de forma ininterrumpida (Escudero 222, 2004).

Al concluir este estudio, se determinan las características del viento y se analizan sus condiciones por medio de un análisis estadístico de los datos obtenidos en la campaña. Con este análisis, se asegura que el lugar escogido para la construcción del parque eólico tiene condiciones adecuadas respecto a sus recursos eólicos.

3. LOCALIZACIÓN DE UN PARQUE EÓLICO

3.1. Introducción

En el Capítulo 2, se han mencionado los beneficios más importantes que tienen las energías renovables en materia de generación energética. En el presente capítulo, se inicia la propuesta de generar energía a través de los recursos eólicos ecuatorianos. Partiendo desde este esquema, se conceptualiza al parque eólico como una planta de producción que brinda su servicio a la sociedad ecuatoriana.

Por su parte, una nueva instalación industrial cuenta con dos definiciones: su localización y su diseño. Antes de iniciar con la fase de diseño, se planifica la localización de un nuevo centro con el objetivo de conseguir la mayor cuota de mercado posible (Fernández 2, 2005). De esta manera, el objetivo de este capítulo es localizar un nuevo parque eólico para generar energía eléctrica. Más adelante, en el Capítulo 4 se definirán las componentes que serán incluidas en esta nueva instalación.

3.2. Marco Teórico de los Problemas de Localización

Para conocer cómo ubicar el nuevo parque eólico en el Ecuador, se acude a un problema matemático de localización, el mismo que se puede describir de la siguiente manera. En una región determinada, se escoge un sitio donde se construirá la instalación que prestará su servicio a un conjunto de clientes (Villegas 1, 2005). Adicionalmente, en los problemas de localización se identifican tres elementos. Las *instalaciones*, que denotan un conjunto de objetos que serán localizados para prestar su servicio. Las *localizaciones*, que se refieren al conjunto de posibles puntos para situar las instalaciones. Finalmente, los *clientes*, que son los usuarios de las instalaciones que demandan ciertos servicios.

Un problema de localización de una instalación se modela matemáticamente para optimizar la relación de una o más instalaciones con respecto a su conjunto de clientes potenciales (Fernández 2, 2005). El proceso de decisión establece dónde se deben ubicar las instalaciones en un territorio deseado, tomando en cuenta los requerimientos de los clientes y las restricciones geográficas.

3.2.1. Descripción del Problema de Localización de la p -Mediana

El problema de localización de la p -mediana es uno de los problemas de localización de instalaciones, donde la mediana geométrica actúa como un estimador de localización óptima (Martínez 2, 2007). Este problema se caracteriza por las instalaciones a ubicar, por la localización y por la relación con el cliente, de la siguiente manera:

- Las instalaciones ofrecen el mismo tipo de servicio y su número se fija mediante un parámetro p .
- La relación con las localizaciones se expresa a través de una función de la distancia desde las localizaciones hasta la instalación.
- Los clientes requieren una cantidad de servicios y son servidos por la instalación más cercana a su ubicación.

La búsqueda de p medianas se puede limitar a un número finito de opciones. Este hecho es importante porque hace posible que se estudie el problema de una manera discreta.

3.2.2. Formulación matemática para el Problema de la p -Mediana

En adición al parámetro p , el problema de la p -mediana considera los siguientes parámetros (Fernández 4, 2005):

X	localización de la instalación	$X = (x, y)$
C	conjunto de clientes	$C = \{c_1, \dots, c_i, \dots, c_m\}$
m	número total de clientes	
P	conjunto de localizaciones	$P = \{P_1, \dots, P_i, \dots, P_m\}$
P_i	localización del cliente i	$P_i = (a_i, b_i)$ para $i = 1, \dots, m$
w_i	peso asignado a la localización P_i	
$d(X, P_i)$	distancia entre la localización P_i y la instalación	
$f(X)$	función no negativa	

Si se escoge como parámetro $p = 1$, es decir, si se busca una localización para una sola instalación, entonces el objetivo es encontrar la localización de la instalación, que minimiza la suma ponderada de distancias, representada por la siguiente función:

$$f(X) = \sum_{i=1}^m w_i d(X, P_i) \quad (1)$$

Por su parte, para resolver el problema de la p -mediana, es necesario seleccionar una norma de medición de distancias. Existen dos normas principales para medir distancias entre dos puntos, notados como $P_1 = (x_1, y_1)$ y $P_2 = (x_2, y_2)$, las cuales son (Loria 2, 2007):

- Rectilínea $d(P_1, P_2) = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|$ con $k = 1$ (2)
 - Norma utilizada en la localización de una instalación en grandes áreas urbanas. Considera la suma de las distancias de sus componentes en los ejes “x” y “y”.
- Euclidiana $d(P_1, P_2) = \left(|x_1 - x_2|^2 + |y_1 - y_2|^2 \right)^{1/2}$ con $k = 2$ (3)
 - Norma utilizada en la localización de una instalación en áreas rurales abiertas. Considera que la distancia más corta entre dos puntos es la recta que los une.

3.2.3. Algoritmo de Resolución

El problema de la p -mediana se puede solucionar mediante procedimientos heurísticos que ofrecen soluciones aproximadas (Martínez 3, 2007). Es importante notar que los procedimientos heurísticos encuentran una solución suficientemente cercana al óptimo, pero no garantizan encontrar el óptimo global.

En esta tesis se utiliza el algoritmo de Weiszfeld (1937), el cual proporciona soluciones factibles para el problema de la p -mediana. El algoritmo se basa en un proceso iterativo en el cual cada iteración produce una solución aproximada más cercana al óptimo. Algunas características de este algoritmo se presentan a continuación (Cánovas 1, 1999).

- Se tienen m puntos diferentes (vértices), cada uno tiene una localización dentro del conjunto $P = (P_1, \dots, P_m)$, definido en el espacio bidimensional, \mathfrak{R}^2
- Se tienen m pesos, representados por $w_i > 0, i = 1, \dots, m$
- Se tienen m distancias desde los vértices a la instalación, representados por $d(X, P_i)$
- Un punto $X \in \mathfrak{R}^2$ minimiza la suma ponderada de sus distancias a los vértices.

El algoritmo de Weiszfeld inicia calculando una solución inicial:

$$X^0 = \left(x^0 = \frac{\sum_{i=1}^m w_i a_i}{\sum_{i=1}^m w_i}, y^0 = \frac{\sum_{i=1}^m w_i b_i}{\sum_{i=1}^m w_i} \right) \quad (4)$$

Luego, la iteración k calcula una nueva solución $X^{k+1} = (x^{k+1}, y^{k+1})$ a partir de la solución actual $X^k = (x^k, y^k)$. Para ello, el algoritmo utiliza la siguiente fórmula:

$$X^{k+1} = \left(x^{k+1} = \frac{\sum_{i=1}^m a_i g_i(x^k, y^k)}{\sum_{i=1}^m g_i(x^k, y^k)}, y^{k+1} = \frac{\sum_{i=1}^m b_i g_i(x^k, y^k)}{\sum_{i=1}^m g_i(x^k, y^k)} \right) \quad (5)$$

Siendo
$$g_i(x^k, y^k) = \frac{w_i}{d(X^k, P_i)} \quad (6)$$

La sucesión de puntos del plano definida por las coordenadas de X^{k+1} converge a la mediana del conjunto P , a menos que en algún momento coincida en algún punto del conjunto P . Por ello, se añade un valor ε dentro de la fórmula de la distancia $d(X^k, P_i)$. Al tratarse de un procedimiento iterativo, se detienen las iteraciones del algoritmo de Weiszfeld cuando dos soluciones consecutivas están muy próximas una de otra.

3.3. Aplicación de un Problema de Localización

Utilizando la teoría de los problemas de localización, se procede a una aplicación práctica, cuyo objetivo es minimizar la suma ponderada de distancias que se recorren desde el parque eólico hasta llegar a sus clientes. En este caso, la distancia recorrida es aquella en la cual se transporta la energía producida a través del Sistema Nacional Interconectado hasta los puntos de demanda de energía eléctrica. Para obtener las ponderaciones de las distancias, se utilizará una calificación en base a factores de transporte y de producción de energía.

Como primera definición para el problema, se localizará una sola instalación ($p = 1$), debido a que se quiere centralizar la instalación de aerogeneradores en un solo parque eólico. Sin embargo, se espera que las experiencias adquiridas en la aplicación de este modelo matemático sirvan para localizar en el Ecuador otros parques eólicos a corto y mediano plazo.

3.3.1. Selección de un Territorio en Ecuador

En primer lugar, se define el territorio donde el parque eólico brindará sus servicios. Este estudio se ha enfocado en la región costa del Ecuador, debido a los siguientes factores:

- Los recursos eólicos en los llanos, donde no existe la presencia de montañas, presentan características uniformes de velocidad y dirección a través de amplias extensiones de terreno (Escudero 179, 2004).
- La producción de energía es superior, debido a que a nivel del mar los vientos son más fuertes y constantes (Mosquera 12, 2006).

El primer criterio para seleccionar la provincia en la cual el parque eólico tendrá su funcionamiento se basa en el potencial eólico de las provincias de la región costa. A mayor potencial eólico se encuentre en la provincia, se espera obtener una mejor la producción energética en el parque eólico (Alarcón, 2008).

Para determinar la provincia con mejores recursos eólicos, se analizan las mediciones de velocidades de viento obtenidas en algunas de sus ciudades. Las mediciones recopiladas en la Tabla 4 fueron obtenidas en varios aeropuertos de la costa, y se obtuvieron gracias a la Corporación para la Investigación Energética. En la Tabla 4, se presenta los promedios mensuales de las mediciones de velocidad de viento, a través del año (“Historiales” 1, 2008).

Tabla 4. Promedios Mensuales de Velocidad de Viento

Provincia	Ciudad	Altura medida (m)	Velocidad del viento (m/s)											
			Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Manabí	San Vicente	3	4.1	3.9	3.9	4.0	4.0	4.1	4.2	4.3	4.3	4.3	4.4	4.3
Manabí	Manta	12	3.8	3.5	3.4	3.7	3.7	3.5	3.7	3.8	4.0	3.9	3.8	4.1
Guayas	Guayaquil	5	2.8	2.3	2.6	2.7	3.2	3.6	3.9	4.1	4.1	4.1	3.9	3.6
Esmeraldas	Tachina	7	3.0	2.5	2.7	2.8	2.9	2.7	2.9	3.1	3.3	3.2	3.3	3.1
Manabí	Portoviejo	44	3.0	2.8	3.1	3.0	2.8	2.5	2.5	2.8	3.1	3.0	3.0	3.0
El Oro	Machala	4	2.9	2.9	3.0	2.9	2.9	2.7	2.8	2.8	2.6	2.8	2.8	2.9

En la Tabla 5 se muestra algunas estadísticas descriptivas importantes obtenidas a partir de las mediciones de la Tabla 4.

Tabla 5. Estadísticas Descriptivas de los Promedios Mensuales

Provincia	Ciudad	Velocidad del viento (m/s)				
		Promedio anual	Desv. Estándar	Coficiente de Variabilidad	Máximo Mensual	Mínimo mensual
Manabí	San Vicente	4.2	0.18	0,0431	4.4	3.9
Manabí	Manta	3.7	0.23	0,0603	4.1	3.4
Guayas	Guayaquil	3.4	0.65	0,1923	4.1	2.3
Esmeraldas	Tachina	3.0	0.26	0,0873	3.3	2.5
Manabí	Portoviejo	2.9	0.20	0,0691	3.1	2.5
El Oro	Machala	2.8	0.12	0,0419	3.0	2.6
PROMEDIOS		3.3	0.27	0,0823	4.4	2.3

* Generación propia.

Otro criterio importante a considerar en la selección del territorio se basa en el análisis de la variabilidad de las mediciones de velocidades de viento. Un parque eólico no necesita tener vientos muy fuertes todo el tiempo. En su lugar, necesita que la velocidad del viento sea constante a lo largo de su funcionamiento (Alarcón, 2008).

En una entrevista personal con el Ing. Jimmy Pesantes, responsable de la Dirección Nacional de Energías Renovables y Eficiencia Energética del Ecuador, se afirma el hecho de que es importante contar con una velocidad del viento constante para que funcionen a plenitud los aerogeneradores (Pesantes, 2008). Por lo tanto, se prefiere un territorio que tenga una baja variabilidad en sus mediciones de velocidades de vientos.

Al observar las estadísticas de la Tabla 5, las mediciones de viento en las ciudades de San Vicente y Manta reflejan que Manabí es la provincia que registra la mayor velocidad del viento. Por su parte, San Vicente, Manta y Portoviejo registran coeficientes de variabilidad menores en cuanto a las mediciones de velocidad del viento, en comparación con los coeficientes de otras ciudades de la costa (a excepción de Machala en la provincia de El Oro). En consecuencia, la provincia de Manabí es el territorio seleccionado para ubicar el parque eólico en la costa ecuatoriana.

Cabe mencionar que el modelo matemático surge de la necesidad de localizar un parque eólico de tal manera que sus clientes accedan de forma óptima al servicio eléctrico ofrecido. Una vez seleccionado como territorio la provincia de Manabí, a continuación, se define a los clientes localizados en dicha provincia, para luego buscar la mejor ubicación del parque eólico.

3.3.2. Coordenadas de Localización de Clientes

Siguiendo la metodología del problema de la p -mediana, se necesitan las coordenadas bidimensionales de las localizaciones de los clientes en Manabí. Se ha modelado este problema de tal forma que los clientes se sitúan en puntos específicos de la provincia. Por ello, se han seleccionado las coordenadas de 19 cabeceras cantonales manabitas, las mismas que se presentan en la Tabla 6.

Cabe mencionar que se han obtenido las longitudes y las latitudes de las cabeceras cantonales utilizando unos mapas geográficos correspondientes a Manta, Portoviejo y Santo Domingo, propiedad del Instituto Geográfico Militar (“Mapas”, 1988).

Tabla 6. Coordenadas de Ubicación de Clientes

Cantón	Cabecera cantonal	Longitud (grados)	Latitud (grados)
Chone	Chone	-79,99	-0,77
Pedernales	Pedernales	-80,05	0,08
Flavio Alfaro	Flavio Alfaro	-79,78	-0,45
Tosagua	Tosagua	-80,15	-0,87
Bolívar	Calceta	-80,07	-0,94
Junín	Junín	-80,11	-1,03
Paján	Paján	-80,36	-1,71
Jama	Jama	-80,18	-0,22
Manta	Manta	-80,69	-1,05
Portoviejo	Portoviejo	-80,39	-1,16
Sucre	Bahía de Caráquez	-80,36	-0,67
Montecristi	Montecristi	-80,62	-1,15
24 de Mayo	Sucre	-80,35	-1,41
Jipijapa	Jipijapa	-80,53	-1,49
Santa Ana	Santa Ana	-80,30	-1,33
Rocafuerte	Rocafuerte	-80,38	-1,02
San Vicente	San Vicente	-80,34	-0,65
Olmedo	Olmedo	-80,12	-1,53
Puerto López	Puerto López	-80,79	-1,73

* Fuente: Instituto Geográfico Militar (1988)

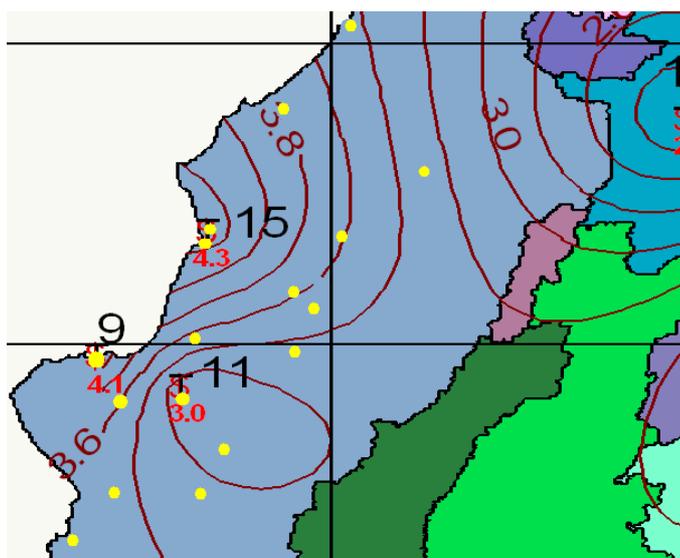
3.3.3. Pesos Asignados a cada Cliente

En esta sección, se asigna un peso a cada una de los 19 clientes situados en las distintas cabeceras cantonales de Manabí. Este peso se compone de varios factores, los mismos que indican la cantidad de servicio eléctrico requerido, la accesibilidad de la posible localización para ubicar el parque eólico y los incentivos económicos que puede captar el proyecto.

Para determinar los parámetros más influyentes con respecto a la ubicación del parque eólico, el presente proyecto contó con la participación del experto en energías renovables, Pedro Alarcón (Alarcón, 2008). Luego de identificar los valores de cada factor que afecta al peso de cada cantón, se asignará el peso correspondiente a cada cliente de la provincia de Manabí.

3.3.3.1. Estadísticas de Velocidad de Viento

La producción energética con aerogeneradores depende de la velocidad del viento. Esta característica es un factor importante para la localización del parque eólico. La Figura 3 presenta una parte del mapa eólico del Ecuador, la cual corresponde a la provincia de Manabí (“Velocidad”, 2005). El mapa eólico completo del Ecuador se encuentra en el Anexo C. En la Figura 3, se incluyen las localizaciones aproximadas de las cabeceras cantorales de Manabí.



* Fuente: Corporación para la Investigación Energética (2005).
Figura 3. Mapa Eólico de la Provincia de Manabí.

Por su parte, la Tabla 7 presenta un resumen de las velocidades de viento identificadas en cada cabecera cantonal, según lo observado en las curvas de nivel de la Figura 3.

Tabla 7. Velocidades de Viento por Cabecera Cantonal

Cantón	Cabecera	Velocidad	Cantón	Cabecera	Velocidad
San Vicente	San Vicente	4.3 m/s	Flavio Alfaro	Flavio Alfaro	3.3 m/s
Manta	Manta	4.1 m/s	Paján	Paján	3.3 m/s
Sucre	Bahía Caráquez	4.1 m/s	Chone	Chone	3.2 m/s
Jama	Jama	3.8 m/s	Junín	Junín	3.2 m/s
Montecristi	Montecristi	3.6 m/s	Olmedo	Olmedo	3.2 m/s
Tosagua	Tosagua	3.6 m/s	Pedernales	Pedernales	3.2 m/s
Rocafuerte	Rocafuerte	3.5 m/s	24 de Mayo	Sucre	3.0 m/s
Pto. López	Pto. López	3.5 m/s	Portoviejo	Portoviejo	3.0 m/s
Bolívar	Calceta	3.4 m/s	Santa Ana	Santa Ana	2.8 m/s
Jipijapa	Jipijapa	3.4 m/s			

* Generación propia.

3.3.3.2. Estadísticas de Viviendas No Electrificadas

Pese a que el sector eléctrico ecuatoriano cuenta con planes de ampliar su cobertura, existen aún sectores de la población ecuatoriana que no disponen de servicio eléctrico. A través del número de viviendas no electrificadas, el presente modelo matemático cuenta con un indicador de las poblaciones que demandan de mayor atención energética (Aларcon, 2008).

La Tabla 8 presenta las estadísticas de viviendas no electrificadas en el año 2006, proporcionadas por el Consejo Nacional de Electricidad (“Estadística” 263, 2007). Estas estadísticas incluyen viviendas urbanas y rurales en sus cantones respectivos.

Tabla 8. Número de Viviendas sin Cobertura Eléctrica por Cantón

Cantón	Viviendas no Electrificadas	Cantón	Viviendas no Electrificadas
Chone	9.072	Sucre	2.130
Pedernales	5.598	Montecristi	1.766
Flavio Alfaro	5.591	24 de mayo	1.679
Tosagua	3.842	Jipijapa	1.544
Bolívar	3.681	Santa Ana	1.532
Junín	2.740	Rocafuerte	974
Paján	2.370	San Vicente	473
Jama	2.281	Olmedo	458
Manta	2.206	Puerto López	357
Portoviejo	2.152	TOTAL Provincial:	50.446

* Fuente: Consejo Nacional de Electricidad (2007).

Si se tiene un promedio de 4 personas por vivienda en Manabí, la cantidad de personas que no reciben el servicio eléctrico equivale a doscientos mil personas.

3.3.3.3. Estadísticas de Accesos Viales

El parque eólico utiliza dos infraestructuras existentes en su fase de operación y en su fase de construcción: una red de carreteras y una red eléctrica (Mosquera 5, 2006). En la construcción del parque eólico, se transportarán vehículos y maquinarias pesadas desde y hacia su terreno, utilizando la red de carreteras de la provincia de Manabí.

Si existen vías cercanas a las posibles ubicaciones del parque eólico, el proyecto no incurrirá en mayores gastos de tiempo y de dinero. De esta manera, no será necesario cimentar nuevas vías por donde transiten camiones y maquinaria pesada al construir el parque eólico.

El presente proyecto no requiere de carreteras de primer orden para acceder hasta el terreno de la instalación. En su lugar, se pueden usar vías de segundo o tercer orden. Lo que si se necesita es ubicar el parque eólico sobre algún cerro o loma, debido a que los vientos que transitan sobre las elevaciones no encuentran obstáculos que interfieren y frenan su velocidad (Mosquera 9, 2006). Con estos antecedentes, se calcula el factor de accesos viales como sigue:

- Mediante el uso de mapas geográficos de la provincia de Manabí, se selecciona una elevación o uno de los sitios de mayor altitud en cada cantón. Esta elevación servirá como una referencia de la cercanía de las carreteras al terreno del parque eólico.
- Luego, se toma la medida desde el punto referencial escogido en cada cantón hasta el punto más cercano por el cual pasa una carretera, indistinta de su orden.
- Finalmente, se convierte la medida tomada a escala en el mapa a kilómetros.

La Tabla 9 presenta las distancias desde cada elevación hasta su carretera cercana.

Tabla 9. Acceso a Red Vial

Cantón	Elevación	Altura	Km.	Cantón	Elevación	Altura	Km.
Jama	Infancia	500	0.50	Rocafuerte	Los Cerecitos	200	1.25
San Vicente	Cerro San Vicente	200	0.75	Bolívar	San Pablo	400	1.50
Jipijapa	La Mona	630	1.00	Paján	Camposano	350	1.50
Montecristi	Chorrillo	500	1.00	Santa Ana	Cerro Cuscol	410	1.50
Portoviejo	Picoaza	435	1.00	Sucre	Loma de Viento	300	1.50
Tosagua	Loma Atravesada	150	1.00	Chone	Loma de Pachicha	150	2.00
Flavio Alfaro	Ciriaco Abajo	340	1.25	Olmedo	Loma El Encanto	330	2.00
Junín	Loma La Torre	100	1.25	Pedernales	Palmar	380	2.25
Manta	Santa Marianita	330	1.25	24 de mayo	El Pueblito	480	2.50
Puerto López	Cerro Chuchón	230	1.25				

* Generación propia.

3.3.3.4. Estadísticas de Sistema Nacional Interconectado

El parque eólico será ubicado cerca de la red eléctrica manabita, para distribuir su producción a través del Sistema Nacional Interconectado (SNI) de Energía. Para ello, se diseña una línea de transmisión que conduce la energía generada en el parque eólico hasta el SNI. El impacto que tiene esta línea de transmisión en el proyecto es que representa costos en función de la distancia que debe cubrir. A mayor distancia cubierta, mayores costos.

Por su parte, la distancia que debe cubrir la línea de transmisión inicia en el parque eólico y llega hasta una subestación de energía de la *Empresa Eléctrica Manabí*, empresa distribuidora y generadora de energía en su provincia. En total, existen 23 subestaciones de transmisión en Manabí, repartidos en 15 cantones. La Figura 4, tomada del Boletín de Estadísticas del Consejo Nacional de Electricidad del año 2006, muestra la ubicación referencial de cada subestación (261, 2007).



* Fuente: Consejo Nacional de Electricidad (2007)

Figura 4. Esquema del Líneas de Transmisión y Subestaciones en Manabí

Para tener una referencia de la distancia que se debe cubrir a través de la línea de transmisión, se calcula el factor de cercanía al SNI, de la siguiente manera:

- Mediante el uso de mapas geográficos de la provincia de Manabí, se mide desde la elevación seleccionada en la Tabla 9 hasta la ubicación de la subestación más cercana.
- Si no existe una subestación de energía en alguno de los cantones, se mide desde su elevación respectiva hasta la subestación del cantón más cercano.

La Tabla 10 presenta las distancias a las subestaciones que funcionan en Manabí.

Tabla 10. Distancia a Subestaciones de la Empresa Eléctrica Manabí

Cantón	Parroquia	Subestación	Km.	Cantón	Parroquia	Subestación	Km.
Montecristi	Montecristi	Montecristi	2.00	Tosagua	Tosagua	Tosagua	7.5
24 de Mayo	Barranco Colorado	Barranco Colorado	2.50	Rocafuerte	Rocafuerte	Rocafuerte	8.0
Jipijapa	Jipijapa	Jipijapa	3.25	Sucre	Leonidas Plaza	Bahía	9.0
Chone	San Antonio	Chone	3.75	Jama	Jama	Jama	10.0
Paján	Colimes	Colimes	3.75	Bolívar	Calceta	Calceta	16.0
Manta	Tarqui	Miraflores	5.00	Cantones que no tienen subestación propia			
Santa Ana	Lodana	Lodana	6.25	Junín	-	Calceta (Calceta)	8.5
Portoviejo	Portoviejo	Portoviejo	6.25	Flavio Alfaro	-	Sesme (Chone)	18.5
San Vicente	San Vicente	San Vicente	7.00	Olmedo	-	Lodana (Santa Ana)	22.5
Puerto López	Machalilla	Machalilla	7.50	Pedernales	-	Jama (Jama)	50.0

* Generación propia.

3.3.3.5. Estadísticas de Zonas Rurales

En el Ecuador tiene vigencia el Fondo de Electrificación Rural y Urbano FERUM, regulado por el Consejo Nacional de Electricidad CONELEC. Este Fondo promueve el uso de energías no convencionales (por ejemplo, la energía eólica), con el fin de abastecer de energía a poblaciones rurales (Calero 3, 2008). Al localizar el parque eólico cerca de poblaciones rurales no cubiertas por el servicio eléctrico actual y abastecerlas de energía a futuro, se busca obtener los ingresos otorgados por el FERUM.

La Tabla 11 presenta el número de habitantes rurales en cada cantón de la provincia Manabí, para cuantificar sus poblaciones rurales (“Estadística” 263, 2007).

Tabla 11. Número de Pobladores Rurales por Cantón

Cantón	Población Rural	Cantón	Población Rural	Cantón	Población Rural
Portoviejo	52958	Jipijapa	23164	Flavio Alfaro	7457
Chone	50.545	Pedernales	22222	Bolívar	6.696
Junín	32656	24 de Mayo	16647	San Vicente	6153
Sucre	28257	Olmedo	9566	Manta	4126
Jama	26101	Rocafuerte	9541	Montecristi	2268
Paján	25681	Tosagua	9294	TOTAL Rural: 366.915	
Santa Ana	25209	Puerto López	8374		

* Fuente: Consejo Nacional de Electricidad (2007).

3.3.3.6. Estadísticas de Conflictividad Poblacional

A pesar de que este proyecto de generación de energía tiene como objetivo beneficiar al desarrollo de la población manabita, pueden existir conflictos ocasionados por grupos que se oponen a la construcción del parque eólico, debido a distintos motivos: afectación de sus terrenos, ruido, razones estéticas, etc.

Se considera la conflictividad poblacional como un factor a tener en cuenta para localizar el parque eólico. Para medir este factor, se considera que la conflictividad está en función del número de habitantes por cantón. A mayor número de habitantes, mayor conflictividad potencial.

La Tabla 12 presenta el número de habitantes en cada cantón de la provincia Manabí (“Estadística” 263, 2007).

Tabla 12. Población por Cantón.

Cantón	Población	Cantón	Población	Cantón	Población
Olmedo	9.566	Paján	41.468	Montecristi	72.430
Puerto López	17.915	Bolívar	47.277	Jipijapa	73.774
San Vicente	19.338	Tosagua	48.321	Chone	132.083
Jama	26.101	Rocafuerte	49.470	Portoviejo	265.837
Junín	32.656	Sucre	57.668	Manta	222.518
24 de mayo	35.586	Santa Ana	58.082	TOTAL: 1.309.754	
Flavio Alfaro	41.373	Pedernales	58.291		

* Fuente: Consejo Nacional de Electricidad (2007).

3.3.3.7. Resumen de Datos Informativos

Utilizando los datos presentados en las Tablas 7 a 12, se construye la Tabla 13, la cual consolida los datos de cada cantón. Los datos de la Tabla 13 serán utilizados para asignar los pesos de cada una de las localizaciones del modelo de localización del parque eólico.

Antes de establecer los pesos por cada cantón, se ha asignado a cada uno de los factores que afectan la localización del parque eólico una escala relativa de puntajes del uno a diez (Alarcón, 2008). Debido a la amplitud del rango de valores que presenta cada factor, se ha establecido un límite superior y un límite inferior en cada factor, cada uno de los cuales se relaciona al puntaje mínimo (1) o al puntaje máximo (10). De esta manera, los datos de la Tabla 13 se utilizan para formar una distribución uniforme por cada factor.

Tabla 13. Información Consolidada por Cantón

	Velocidad del viento (m/s)	No. Viviendas no Electrificadas	Distancia a Carreteras (Km.)	Distancia al SNI (Km.)	No. Habitantes Rurales	No. Habitantes Totales
Chone	3,2	9072	2	3,75	50545	132083
Pedernales	3,2	5598	2,25	50	22222	58291
Flavio Alfaro	3,3	5591	1,25	19	7457	41373
Tosagua	3,6	3842	1	7,5	9294	48321
Bolívar	3,4	3681	1,5	16	6696	47277
Junín	3,2	2740	1,25	8,5	32656	32656
Paján	3,3	2370	1,5	3,75	25681	41468
Jama	3,8	2281	0,5	10	26101	26101
Manta	4,1	2206	1,25	5	4126	222518
Portoviejo	3	2152	1	6,25	52958	265837
Sucre	4,1	2130	1,5	9	28257	57668
Montecristi	3,6	1766	1	2	2268	72430
24 de mayo	3	1679	2,5	2,5	16647	35586
Jipijapa	3,4	1544	1	3,25	23164	73774
Santa Ana	2,8	1532	1,5	6,25	25209	58082
Rocafuerte	3,5	974	1,25	8	9541	49470
San Vicente	4,3	473	0,75	7	6153	19338
Olmedo	3,2	458	2	23	9566	9566
Puerto López	3,5	357	1,25	7,5	8374	17915

La Tabla 14 presenta la información referente a los límites de cada distribución, junto con los puntajes que se asignan a cada límite:

Tabla 14. Límites de Distribuciones Uniformes Para Ponderación de los Factores

Factor	Límite inferior		Límite Superior	
	Valor mínimo	Puntaje Asignado	Valor máximo	Puntaje Asignado
Velocidad del viento	3,2	1	4,3	10
Viviendas no Electrificadas	1532	1	9072	10
Accesos Viales	0,5	10	1,5	1
Cercanía al SIN	2	10	7,5	1
Servicio Rural	16647	1	52958	10
Conflictividad	9566	10	48321	1

* Generación propia.

Los factores individuales de cada localización obtienen cero puntos como calificación, si sus valores se encuentran fuera de los límites mínimos o máximos establecidos en la Tabla 14. De esta manera, la Tabla 15 presenta las calificaciones resultantes para cada factor.

Tabla 15. Calificaciones por Cantón

	Velocidad del viento (m/s)	No. Viviendas no Electrificadas	Distancia a Carreteras (Km.)	Distancia al SNI (Km.)	No. Habitantes Rurales	No. Habitantes Totales
Chone	0	10	0	7	10	0
Pedernales	0	6	0	0	2	0
Flavio Alfaro	1	6	3	0	0	2
Tosagua	4	4	5	0	0	0
Bolívar	2	3	0	0	0	1
Junín	0	2	3	0	5	5
Paján	1	2	0	7	3	2
Jama	6	1	10	0	3	6
Manta	9	1	3	5	0	0
Portoviejo	0	1	5	3	10	0
Sucre	9	1	0	0	4	0
Montecristi	4	1	5	10	0	0
24 de mayo	0	1	0	10	0	4
Jipijapa	2	1	5	8	2	0
Santa Ana	0	0	0	3	3	0
Rocafuerte	3	0	3	0	0	0
San Vicente	10	0	8	0	0	8
Olmedo	0	0	0	0	0	10
Puerto López	3	0	3	0	0	8

3.3.3.8. Ponderaciones de cada Factor

El siguiente paso consiste en ponderar los valores de la Tabla 15, en función de la importancia relativa de cada factor con respecto al modelo. Para ello, se siguen las instrucciones de Pedro Alarcón, quien recomienda el uso de las ponderaciones en cada factor (Alarcón, 2008). De esta manera, se indica en la Tabla 16 la importancia relativa de cada factor. Posteriormente, se presenta en la Tabla 17 tanto las calificaciones ponderadas como la suma de calificaciones para cada cantón, con lo cual se forman los pesos de cada cantón.

Tabla 16. Ponderaciones de Calificaciones.

Factor	%	Explicación
Velocidad del viento	50	Factor principal para el rendimiento de los aerogeneradores
Viviendas no Electrificadas	20	El cliente requiere el servicio eléctrico, pero no siempre está interesado en el lugar donde se genera la energía.
Accesos Viales	10	Se necesita examinar el estado de las vías seleccionadas.
Cercanía al SNI	10	La distancia desde el parque eólico hasta la subestación puede aumentar.
Servicio Rural	5	El aporte económico a conseguir mediante el FERUM puede ser muy bajo
Conflictividad	5	Factor sujeto a la percepción de los pobladores de cada cantón con respecto a la construcción del Parque Eólico.

Tabla 17. Ponderaciones Aplicadas a cada Cantón

	Velocidad viento (m/s)	Viviendas no Electrificadas	Distancia a Carreteras (Km.)	Distancia al SNI (Km.)	Habitantes Rurales	Habitantes Totales	PESO
Chone	0	2	0	0,7	0,5	0	3,2
Pedernales	0	1,2	0	0	0,1	0	1,3
Flavio Alfaro	0,5	1,2	0,3	0	0	0,1	2,1
Tosagua	2	0,8	0,5	0	0	0	3,3
Bolívar	1	0,6	0	0	0	0,1	1,7
Junín	0	0,4	0,3	0	0,3	0,3	1,2
Paján	0,5	0,4	0	0,7	0,2	0,1	1,9
Jama	3	0,2	1	0	0,2	0,3	4,7
Manta	4,5	0,2	0,3	0,5	0	0	5,5
Portoviejo	0	0,2	0,5	0,3	0,5	0	1,5
Sucre	4,5	0,2	0	0	0,2	0	4,9
Montecristi	2	0,2	0,5	1	0	0	3,7
24 de mayo	0	0,2	0	1	0	0,2	1,4
Jipijapa	1	0,2	0,5	0,8	0,1	0	2,6
Santa Ana	0	0	0	0,3	0,2	0	0,5
Rocafuerte	1,5	0	0,3	0	0	0	1,8
San Vicente	5	0	0,8	0	0	0,4	6,2
Olmedo	0	0	0	0	0	0,5	0,5
Puerto López	1,5	0	0,3	0	0	0,4	2,2

En función del problema de localización del parque eólico, las sumas de calificaciones por cada cantón serán incluidas como los *pesos asignados a cada localización de los clientes*.

3.3.4. Planteamiento Matemático del Problema de Localización

La aplicación del problema de localización eólico tiene los siguientes parámetros:

- Número de instalaciones $p = 1$
- Localización de la instalación. $X = (x, y)$
- Número total de clientes $m = 19$
- Conjunto de clientes $C = \{c_1, \dots, c_{19}\}$
- Localización del cliente i $P_i = (a_i, b_i)$ para $i = 1, \dots, 19$
- Conjunto de localizaciones $P = \{P_1, \dots, P_{19}\}$
- Peso asignado a la localización P_i w_i para $i = 1, \dots, 19$
- Distancia entre la localización P_i y la instalación $d(X, P_i)$
- Función Objetivo No Negativa $f(X)$

Aún queda por determinar la localización de X . Para ello, se debe encontrar la localización del parque eólico que minimiza la suma ponderada de distancias $d(X, P_i)$, representada por la siguiente ecuación (Fernández 4, 2005):

$$f(X) = \sum_{i=1}^m w_i d(X, P_i) \quad (7)$$

3.3.5. Norma para Medir Distancias

El problema de localización del parque eólico se modela a través de la *norma euclidiana*. Se escoge esta norma de medida porque el problema se modela en áreas rurales abiertas de la provincia de Manabí. Cabe recordar que para determinar la medida de la distancia euclidiana entre dos puntos, P_1 y P_2 , se tiene la fórmula (3) (Loria 2, 2007):

$$d(P_1, P_2) = \left((x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

3.3.6. Resolución del Problema de Localización

Para resolver el problema de localización planteado se recurre al Algoritmo de Weiszfeld (1937). Este algoritmo utiliza tanto las localizaciones de los clientes como sus respectivos pesos. La Tabla 18 muestra las coordenadas de localización y los pesos de cada cliente. En cuanto a las coordenadas, a representa longitud (medida en grados) y b representa latitud (medida en grados). Los pesos w_i son adimensionales.

Tabla 18. Datos Informativos de cada Localización del Cliente.

Cliente	i	a _i	b _i	w _i	Cliente	i	a _i	b _i	w _i
Chone	1	-79,99	-0,77	3,2	Sucre	11	-80,36	-0,67	4,9
Pedernales	2	-80,05	0,08	1,3	Montecristi	12	-80,62	-1,15	3,7
Flavio Alfaro	3	-79,78	-0,45	2,1	24 de mayo	13	-80,35	-1,41	1,4
Tosagua	4	-80,15	-0,87	3,3	Jipijapa	14	-80,53	-1,49	2,6
Bolívar	5	-80,07	-0,94	1,7	Santa Ana	15	-80,30	-1,33	0,5
Junín	6	-80,11	-1,03	1,2	Rocafuerte	16	-80,38	-1,02	1,8
Paján	7	-80,36	-1,71	1,9	San Vicente	17	-80,34	-0,65	6,2
Jama	8	-80,18	-0,22	4,7	Olmedo	18	-80,12	-1,53	0,5
Manta	9	-80,69	-1,05	5,5	Puerto López	19	-80,79	-1,73	2,2
Portoviejo	10	-80,39	-1,16	1,5					

El algoritmo inicia al calcular una solución inicial, mediante el uso de (4), como sigue:

$$X^0 = \left(x^0 = \frac{\sum_{i=1}^m w_i a_i}{\sum_{i=1}^m w_i}, y^0 = \frac{\sum_{i=1}^m w_i b_i}{\sum_{i=1}^m w_i} \right)$$

$$X^0 = (x^0 = -4016,76/50, y^0 = -45,01/50) \quad X^0 = (-80,33, -0,90)$$

Desde la iteración 0, se calcula una nueva solución $X^1 = (x^1, y^1)$ a partir de la solución actual $X^0 = (x^0, y^0)$, aplicando las fórmulas (5) y (6):

$$X^1 = \left(x^1 = \frac{\sum_{i=1}^m a_i g_i(x^0, y^0)}{\sum_{i=1}^m g_i(x^0, y^0)}, y^1 = \frac{\sum_{i=1}^m b_i g_i(x^0, y^0)}{\sum_{i=1}^m g_i(x^0, y^0)} \right) \quad (8)$$

Siendo $g_i(x^0, y^0) = \frac{w_i}{d(X^0, P_i)}$ (9)

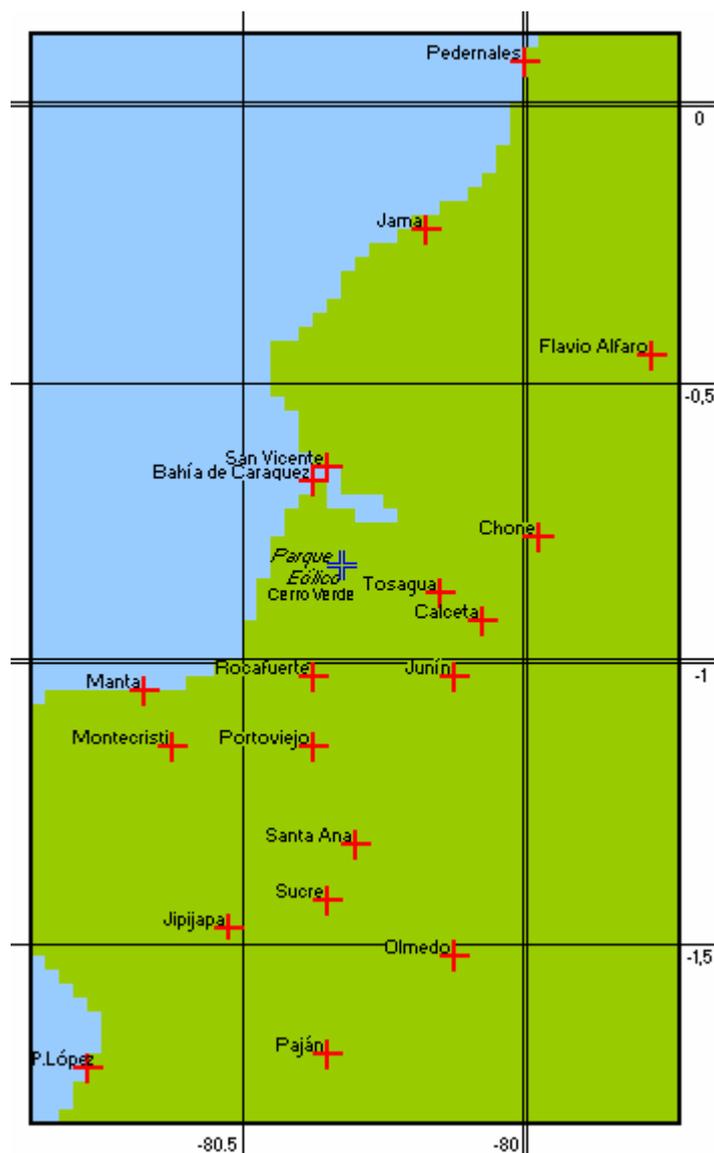
Como este problema mide distancia a través de una *norma euclidiana*, se utiliza la fórmula (3) y se reemplaza en (9), de la siguiente manera:

$$g_i(x^0, y^0) = \frac{w_i}{\left((x^0 - a_i)^2 + (y^0 - b_i)^2 \right)^{1/2}} \quad (10)$$

Para evitar que la localización del parque eólico coincida con la localización de un cliente, lo cual haría que la fórmula (10) sea indeterminada, se agrega un valor ε dentro de la fórmula de la distancia, obteniendo la siguiente fórmula:

$$g_i(x^0, y^0) = \frac{w_i}{\left((x^0 - a_i)^2 + (y^0 - b_i)^2 + \varepsilon \right)^{1/2}} \quad (11)$$

Con las fórmulas (5) y (11), junto con un $\varepsilon = 0.000001$, se procede a calcular las iteraciones del algoritmo de Weiszfeld (1937). Los cálculos de cada iteración se presentan en el Anexo D. Al obtener una solución estable en el algoritmo, se determina la ubicación óptima para el parque eólico. La solución corresponde a las coordenadas ($x = -80,3188$; $y = -0.8473$), que pertenecen al sitio “Cerro Verde”, del cantón Sucre. En la Figura 5, se muestra la ubicación geográfica óptima de la instalación en un mapa representativo de Manabí.



* Generación propia.

Figura 5. Ubicación Geográfica del Parque Eólico

3.4. Validación de la Localización del Parque Eólico

El sitio “Cerro Verde” pertenece al cantón Sucre, cuya cabecera cantonal es la ciudad de Bahía de Caráquez. Para conocer más acerca del sitio escogido, se realizó una investigación a través de una entrevista telefónica con la Prefectura de la Provincia de Manabí, específicamente con la Sra. Kira González, Secretaria General de dicha dependencia gubernamental, y también con la especial colaboración del Sr. Mariano Zambrano, Prefecto de la Provincia (González, 2008). Se logró conocer que existe la posibilidad de realizar la construcción del parque eólico en Cerro Verde, lugar el cual mediante el modelo matemático antes planteado, fue escogido como la ubicación óptima para la construcción e implementación de dicho parque.

La construcción del parque como tal es posible de ser realizada en “Cerro Verde”, siempre y cuando las bases estructurales del parque sean lo suficientemente estables y consolidadas, así como también se realice previamente un estudio de suelos para verificar la estabilidad y condición del terreno, tal como se indicó por parte de la Sra. González y sus colaboradores.

Por su parte, en una visita de campo efectuada en el sitio “Cerro Verde”, se constató que existen tres elevaciones principales, “Loma de Viento”, “Loma Las Pavas” y “Cerro Verde”. En la cima del sitio “Cerro Verde” se verificó que no existen obstáculos significativos, tales como casas, árboles de gran tamaño, torres, etc., que interfieran con el flujo de los vientos. Al no existir dichos obstáculos, se valida la localización del parque eólico en el sitio “Cerro Verde”.

En el futuro, se espera que el parque eólico no sufra de invasiones ilegales dentro de sus perímetros. Se permitirá que el terreno del parque eólico sea utilizado solamente con fines ganaderos, porque esta actividad no interfiere con la producción de energía.

Antes de iniciar la fase de construcción del parque eólico, se deben obtener los permisos legales para utilizar los terrenos en la zona seleccionada. Adicionalmente, se debe alcanzar acuerdos con los propietarios de terrenos potencialmente afectados de la zona de influencia del parque eólico, para asegurar el normal desarrollo de la fase de construcción.

4. DIMENSIONAMIENTO TÉCNICO DEL PARQUE EÓLICO

4.1. Introducción

Una de las decisiones importantes que afronta el presente proyecto se refiere a la cantidad de energía eléctrica que se desea producir en el parque eólico. En forma general, se utiliza un pronóstico estadístico para proyectar la producción de una planta industrial y, de esta manera, dimensionar la capacidad de la instalación (Narasimhan 25, 1996).

En base a estos lineamientos se realiza en el presente capítulo. Primero, se realiza un análisis de la demanda de energía eléctrica en la provincia de Manabí. Luego, se identifica el comportamiento de los vientos en la ubicación escogida en el Capítulo 3. Con estos antecedentes, se definen las características de los aerogeneradores para alcanzar el nivel de producción requerido. Finalmente, se determina el número de aerogeneradores necesarios para responder a la capacidad de producción, que será definida en este capítulo.

4.2. Demanda de Energía en la Provincia de Manabí

Para conocer sobre la demanda de energía de la población en la provincia de Manabí, se recurre a la información histórica de la Empresa Eléctrica Manabí, empresa que transmite, distribuye y comercializa energía eléctrica a su provincia. Por su parte, los clientes de la E.E. Manabí se encuentran divididos en dos grupos: clientes con consumo regulado (residenciales, industriales, comerciales, y otros) y clientes con consumo no regulado (facturan servicios de peaje de distribución). En la Tabla 19 se presentan los datos sobre la energía vendida de la E.E. Manabí en el 2007 para los grupos regulados y no regulados (“Estadística” 296, 2008).

Tabla 19. Venta de Energía E.E. Manabí

Cliente / Grupo de Consumo	Energía Vendida (MWh)	Peajes (MWh)	Total Energía (MWh)	Total Factura (USD)	Precio Medio (USD ¢/KWh.)	Total Recaudación (USD)
Residencial	223.250	-	223.250	24'328.474	10,90	17'211.942
Industrial	64.022	-	64.022	5'288.332	8,26	5'346.602
Comercial	105.470	-	105.470	9'766.255	9,26	9'063.496
A. Público	107.473	-	107.473	14'998.401	13,96	10'149.568
Otros	122.865	-	122.865	9'409.193	7,66	4'710.859
No Regulado	-	22.152	22.152	91.955	0,42	22.045
Total	599.079	22.152	621.231	63'882.611	9,90	46'504.512

* Fuente: Consejo Nacional de Electricidad (2008).

Para fines del proyecto, se verificará el comportamiento histórico de la demanda de los clientes regulados de Manabí. Se ha definido a los clientes regulados como el grupo al cual se distribuirá la energía generada del parque eólico. En la Tabla 20 se presentan las estadísticas de energía mensual de la E.E. Manabí a sus clientes regulados (“Estadística”, 2003 – 2007).

Tabla 20. Energía Mensual Facturada a Clientes Regulados

Año	No	Mes	Clientes	Energía Facturada (MWh)	Año	No.	Mes	Clientes	Energía Facturada (MWh)	
2003	1	Enero	178.512	42.904	2005	31	Julio	198.778	44.421	
	2	Febrero	179.161	43.425		32	Agosto	199.933	42.362	
	3	Marzo	179.896	42.483		33	Septiembre	200.785	47.361	
	4	Abril	180.471	43.358		34	Octubre	201.786	43.797	
	5	Mayo	180.935	47.878		35	Noviembre	202.686	44.022	
	6	Junio	181.434	44.195		36	Diciembre	203.505	47.729	
	2004	7	Julio	182.144	43.895	2006	37	Enero	204.112	46.521
		8	Agosto	182.687	42.792		38	Febrero	205.026	48.951
		9	Septiembre	183.524	42.742		39	Marzo	205.349	44.323
		10	Octubre	184.524	45.515		40	Abril	206.276	44.597
		11	Noviembre	185.485	42.981		41	Mayo	206.800	49.373
		12	Diciembre	186.212	44.646		42	Junio	205.945	49.448
2005		13	Enero	186.684	45.059		43	Julio	206.135	48.688
		14	Febrero	187.232	46.046		44	Agosto	207.192	48.070
		15	Marzo	187.688	44.975		45	Septiembre	207.427	48.174
		16	Abril	188.299	48.330		46	Octubre	208.084	49.693
		17	Mayo	188.883	47.254		47	Noviembre	207.911	50.488
		18	Junio	189.665	46.769		48	Diciembre	207.648	50.352
	2006	19	Julio	190.351	47.790	49	Enero	207.565	50.483	
		20	Agosto	190.639	44.145	50	Febrero	208.075	52.108	
		21	Septiembre	191.154	47.370	51	Marzo	206.841	46.890	
		22	Octubre	192.419	46.986	52	Abril	207.233	47.868	
		23	Noviembre	192.904	45.928	53	Mayo	207.663	50.149	
		24	Diciembre	193.825	47.613	54	Junio	208.292	51.606	
2007		25	Enero	194.044	46.440	55	Julio	208.842	50.694	
		26	Febrero	194.778	47.751	56	Agosto	209.411	48.243	
		27	Marzo	195.720	45.435	57	Septiembre	209.544	51.594	
		28	Abril	196.504	43.717	58	Octubre	210.057	49.531	
		29	Mayo	197.703	45.991	59	Noviembre	210.530	49.486	
		30	Junio	198.419	48.152	60	Diciembre	210.775	50.426	
								Promedios	47.052	
								Totales	2.823.107	

* Fuente: Consejo Nacional de Electricidad (2003 – 2007).

Para analizar los datos históricos de la Tabla 20, se recurre al análisis de una serie de tiempo, la cual se presenta a continuación en la Figura 6.

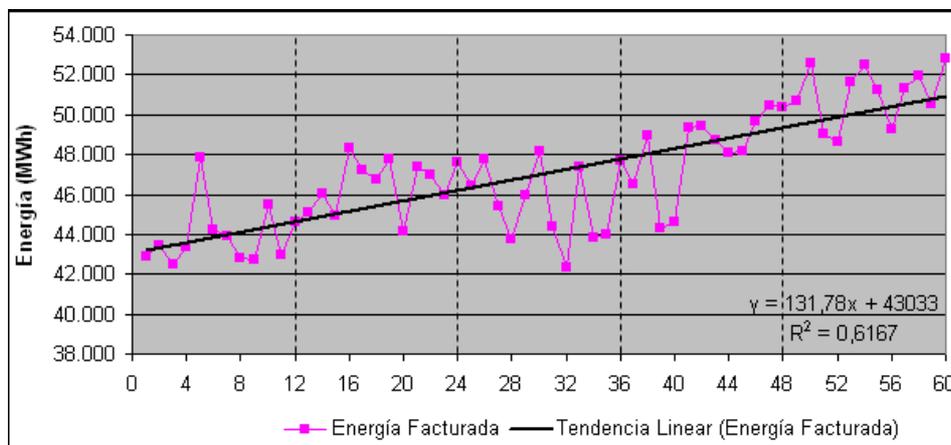


Figura 6. Demanda Mensual de Energía Eléctrica de Clientes Regulados.

En la Figura 6, se observa que existe una tendencia creciente entre los años 2003 y 2007, en cuanto a la cantidad de energía facturada a los clientes regulados de Manabí. Por otro lado, se observa en los datos mensuales oscilan de forma aleatoria alrededor de la línea de tendencia. Por este motivo, no existe evidencia suficiente para afirmar que la serie de tiempo presenta un comportamiento periódico.

Sin embargo, lo que se puede determinar a través de los datos de la Tabla 20 es la cantidad de energía que aumenta anualmente. Para ello, se recurre a un pronóstico de la variable “cantidad de energía demandada”. Cabe indicar que el resultado del pronóstico será utilizado como la cantidad de energía que se espera generar en el parque eólico. Es decir, esta cantidad será el objetivo de producción durante un año de funcionamiento del parque eólico.

4.2.1. Previsión Futura de la Demanda de Energía

Los procedimientos de serie de tiempo se utilizan para analizar un conjunto de datos obtenidos en un período de tiempo seleccionado (Nelson 19, 1973). Estos procedimientos incluyen métodos de pronósticos simples y suavizamientos, métodos de análisis de correlación y modelamiento ARIMA.

Los métodos de pronósticos simples y suavizamientos se basan en la obtención de pronósticos confiables, al modelar patrones en los datos que usualmente se encuentran visibles en un gráfico de series de tiempo, y después al extrapolar esos patrones hacia el futuro (Nelson 168, 1973).

Estos métodos descomponen los datos en sus partes, también llamadas componentes, utilizando un gráfico de series de tiempo de los datos. Después, extienden los estimados de los componentes hacia el futuro para generar los pronósticos (Buffa 45, 1981). Por lo general son métodos fáciles y rápidos de aplicar.

Según Narasimhan (45, 1996), la selección de uno de estos métodos depende de las siguientes características:

- Si los patrones son estáticos (constantes en el tiempo) o dinámicos (cambian en el tiempo).
- La naturaleza de la tendencia y de los componentes estacionales.
- La cantidad de los datos que se desea pronosticar.

Los métodos de pronósticos simples y suavizamientos se clasifican en: métodos con patrones estáticos (análisis de tendencias y descomposición) y métodos con patrones dinámicos (promedio móvil, suavizamiento exponencial simple y doble, y el método de Winters). En el caso de los métodos con patrones dinámicos, los estimados son actualizados utilizando los valores vecinos (valores más cercanos) (Nelson 169, 1973).

Con el fin de generar un pronóstico de la variable “cantidad de energía demandada”, se ha seleccionado el método de Winters, tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- El patrón de comportamiento es dinámico, es decir, la cantidad de energía demandada cambia con respecto al avance del tiempo. Esto se puede evidenciar en la Figura 6.
- La tendencia que presenta la serie de tiempo es creciente. En la Figura 6, se obtiene a través de Microsoft Excel[®] una ecuación de regresión simple ($y = 131,78 x + 43033$), en la cual el valor de la pendiente (131,78) es positivo.
- Se desea generar 12 datos de energía demandada como pronóstico, cantidad que el método de Winters puede generar con relativa precisión, debido a que se adapta al método de suavizamiento exponencial simple (Nelson 169, 1973).

Adicionalmente, para el método de Winters seleccionado, se asume que el tamaño de la estacionalidad es igual a 12 periodos (meses). Esta suposición está basada en el criterio experto del Ing. Raúl Maldonado, funcionario del Empresa Eléctrica Manabí, quien indica que la demanda energética en la provincia presenta ciclos que se repiten aproximadamente cada año (Maldonado, 2008).

El método de Winters descompone la variable en una tendencia, una variación cíclica, una variación estacional, y una variación aleatoria (Narasimhan 28, 1996). La variación estacional puede ser aditiva o multiplicativa, según lo siguiente. Si la variación estacional depende del nivel de datos de un periodo de tiempo determinado, dicha variación es multiplicativa; caso contrario, dicha variación es aditiva (Narasimhan 28, 1996).

Para cuantificar la magnitud de los errores generados en un pronóstico, existen tres medidas de precisión (Narasimhan 43, 1996):

- MAPE (*mean absolute percentage error*) mide la precisión de los valores ajustados, relacionando el error promedio de los valores ajustados con la demanda promedio.
- MAD (*mean absolute deviation*) promedia la cantidad de error absoluto, entre la demanda del periodo t y el valor ajustado para el periodo t
- MSD (*mean squared deviation*) promedia las desviaciones al cuadrado.

Se considera que entre más pequeños sean los valores de estas tres medidas, mejor se ajustan los datos en el modelo utilizado.

A continuación, se realiza un pronóstico de la variable “cantidad de energía demandada”, utilizando el software Minitab®. Para ello, se escoge un modelo aditivo para ajustar los datos, debido a que la amplitud de oscilación de los datos mensuales alrededor de la línea de tendencia, observada en la Figura 6, se mantiene relativamente constante. De esta manera, se presenta el gráfico generado en el software Minitab® en la Figura 7.

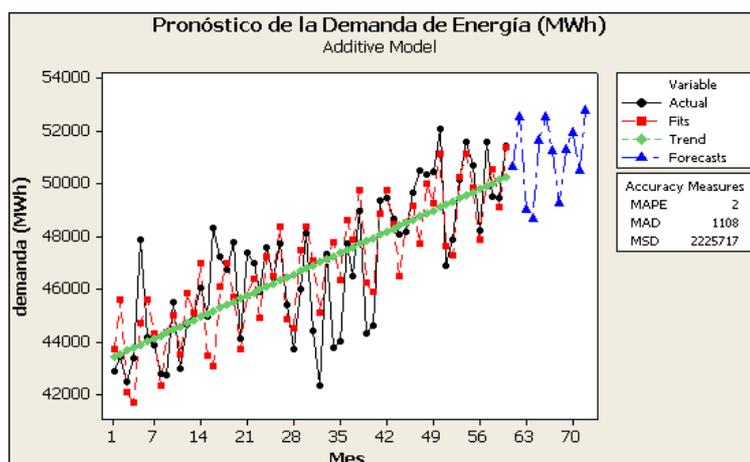


Figura 7. Pronóstico de la Demanda de Energía Eléctrica

La Figura 7 presenta el comportamiento de cuatro componentes: los datos originales, la tendencia, los valores ajustados y los valores pronosticados.

En la Figura 7, el modelo utilizado presenta un valor MAPE igual a 2%, el cual es considerado relativamente bajo. Además, se observa que la línea de tendencia se ajusta bien a la tendencia general del modelo y el patrón de oscilación de los valores pronosticados se ajusta bien al patrón de oscilación de los primeros 60 datos. Por lo tanto, estas características validan el modelo seleccionado.

Con el fin de determinar el incremento de la demanda poblacional de energía eléctrica en la provincia de Manabí, se realiza una comparación entre las cantidades de energía demandada en el año 2007 y pronosticada para el 2008. La Tabla 21 presenta las cantidades pronosticadas de energía demandada para el año 2008, según el gráfico de la Figura 7.

Tabla 21. Energía Mensual Pronosticada.

Año	Mes	Energía (MWh)	Año	Mes	Energía (MWh)
2008	Enero	50.668	2008	Julio	51.261
	Febrero	52.553		Agosto	49.264
	Marzo	49.018		Septiembre	51.302
	Abril	48.661		Octubre	51.950
	Mayo	51.640		Noviembre	50.493
	Junio	52.533		Diciembre	52.799
Promedio					51.014
Total					612.172

Por su parte, en la Tabla 19, se indicó que la cantidad de energía demandada por los clientes regulados sumó 599.078 MWh en el año 2007. Como la cantidad de energía proyectada para el año 2008 asciende a 612.172 MWh, se registra un incremento de energía eléctrica de **13.094 MWh**.

En consecuencia, el objetivo del parque eólico es contar con suficiente capacidad en sus aerogeneradores para producir una cantidad de energía igual o superior a los 13000 MWh, durante el primero de sus años de funcionamiento.

4.2.2. Otros aspectos sobre la Demanda de Energía en Manabí

La población de la provincia de Manabí (1'300.000 habitantes, aproximadamente) demanda un servicio eléctrico eficiente para su desarrollo y crecimiento. Además, la provincia cuenta con proyectos que requieren una alta producción energética, como el nuevo puerto marítimo en la ciudad de Manta y la nueva refinería de petróleos ("Proyectan" par. 3, 2007).

Para que el servicio eléctrico sea efectivo, el parque eólico se encarga del aumento de producción de energía. Más aún, este servicio se complementa con la labor de la E.E. Manabí, quien tiene entre sus planes la ampliación de su infraestructura de distribución de energía eléctrica. Se conoce que la E.E. Manabí ampliará sus instalaciones eléctricas para atender la demanda eléctrica creciente, ocasionada por el desarrollo económico provincial (“Aspectos Técnicos” 4, 2008). Con este hecho, la nueva capacidad de generación de energía eléctrica proyectada en Manabí, a través del parque eólico, llegará con éxito a sus clientes regulados.

4.3. Comportamiento del Viento

El segundo paso antes de dimensionar los aerogeneradores del parque eólico es determinar el comportamiento del viento en cuanto a su velocidad y dirección. El estudio realizado en el Capítulo 3 indica que la instalación de los aerogeneradores debe realizarse en un cerro del cantón Sucre de la provincia de Manabí. Por ello, los recursos eólicos que se encuentran en el sitio “Cerro Verde” serán explotados en beneficio de la generación eléctrica.

Para desarrollar el presente proyecto, se han obtenido datos de los vientos de varios aeropuertos del Ecuador (“Historiales”, 2008). El aeropuerto más cercano a la ubicación del parque eólico es el aeropuerto “Los Perales”, en San Vicente, Manabí. Por su distancia relativamente cercana con respecto al sitio “Cerro Verde”, las mediciones de viento del aeropuerto “Los Perales” serán utilizadas como referenciales de los vientos del sitio indicado.

Por su parte, el Anexo E.1 presenta la información obtenida sobre el estudio de vientos efectuado en “Los Perales”. Al contar con un registro histórico de velocidades de vientos, se calculan los promedios mensuales de las velocidades de viento desde 1978 hasta el año 2004. Estos promedios mensuales se indican en la Tabla 22 (“Historiales”, 2008).

Tabla 22. Promedios Mensuales de Velocidades de Vientos en el Aeropuerto “Los Perales” desde 1978 hasta 2004.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Velocidad (m/s)	4.1	3.9	3.9	4.0	4.0	4.1	4.2	4.3	4.3	4.3	4.4	4.3

* Generación Propia

Adicionalmente, se tiene un registro histórico de las velocidades *máximas* de los vientos mensuales del aeropuerto “Los Perales”. La Tabla 23 presenta los promedios mensuales de velocidades máximas de vientos desde 1978 hasta el año 2004.

Tabla 23. Promedios Mensuales de Velocidades Máximas de Vientos en el Aeropuerto “Los Perales” desde 1978 hasta 2004.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Velocidad (m/s)	7.8	7.9	8.1	7.5	7.8	7.9	8.0	8.0	8.4	8.0	8.0	8.1

* Generación Propia

El registro histórico de la Tabla 23 indica que, entre los años 1978 y 2004, el promedio anual de velocidades mensuales máximas de vientos es igual a **8,0 m/s**. Para fines del proyecto, se espera contar con éste promedio anual de velocidades de viento. Este valor debe ser comprobado mediante mediciones de velocidades del viento en el sitio “Cerro Verde” del cantón Sucre. Sin embargo, el hecho de contar con una velocidad mayor de vientos favorece directamente a la producción energética de los aerogeneradores.

Por otro lado, para que los aerogeneradores se sitúen en un espacio con vientos más veloces, se debe colocarlos a una altura considerable sobre el nivel del terreno. Esta característica se ha presentado en otros proyectos, como por ejemplo, en el proyecto eólico “Minas de Huascachaca” (Anexo A.4). En dicho sitio, el promedio de velocidades de vientos a 10 m. sobre el terreno es 5.1 m/s, mientras que el promedio de velocidades de vientos a 60 m. sobre el terreno es 6.7 m/s. Con lo cual, se observa que las velocidades de vientos son crecientes en función de la altura de sobre el nivel del terreno.

Con estas consideraciones, el parque eólico de la provincia de Manabí debe aprovechar los recursos eólicos a una altura de 50 m. o más sobre el nivel del terreno, donde las velocidades registradas de los vientos sean notablemente mayores. Tal como se indicó anteriormente, en una fase posterior a la elaboración del presente proyecto se deben efectuar las mediciones de velocidades de vientos en el sitio “Cerro Verde”, para confirmar el potencial eólico de dicho sitio.

4.4. Selección de los Aerogeneradores

Mediante las características de diseño de los aerogeneradores, presentadas de manera conceptual en el Anexo B, se inicia la selección de los aerogeneradores. Para el presente proyecto eólico, los criterios de diseño aplicados a los aerogeneradores se refieren al tipo de ejes y al número de palas; mientras que los criterios de producción, se refieren a la cantidad de energía a producir y a la velocidad anual del viento.

- Tipo de ejes: Ejes Horizontales
 - Contar con aerogeneradores diseñados con ejes horizontales permite un mejor funcionamiento de las hélices para la producción de energía.
- Número de palas: Tres
 - Contar con aerogeneradores cuya hélice tenga tres palas permite una producción óptima con vientos bajos o altos.
- Cantidad de energía a producir: 13.000 MWh anuales o más.
 - Incremento en la cantidad de energía eléctrica demandada por los clientes regulados de la E.E. Manabí entre los años 2007 y 2008 (según proyección)
- Velocidad anual del viento: 8,0 m/s
 - Promedio anual de velocidades máximas de viento.

En primer lugar, se selecciona a un fabricante de aerogeneradores, cuyos modelos de aerogeneradores cumplan con los criterios de diseño y de producción. Al investigar acerca de algunos fabricantes de aerogeneradores en el mercado mundial y sus modelos respectivos, se selecciona al fabricante alemán “Enercon”. Este fabricante europeo de aerogeneradores cuenta con una amplia gama de modelos, cuyas potencias varían entre los 30 y los 1500 kW de capacidad. Por su parte, sus aerogeneradores utilizan eficientemente los recursos eólicos con tasas medias y bajas de velocidad del viento (Escudero 420, 2004).

De un catálogo reciente de productos del fabricante Enercon, se selecciona el aerogenerador modelo E-53. El Anexo F presenta las características de dicho modelo, entre las cuales se destacan (“Aerogeneradores” 2, 2008):

- Tipo de Ejes: Horizontales
- Número de palas: 3
- Potencia Nominal: 0,8 MW
- Velocidad de viento: 13 m/s (a potencia nominal)
- Diámetro del Rotor: 52,9 m
- Altura del buje: 73 m
- Área barrida: 2.198 m²

4.4.1. Número de los Aerogeneradores

Existen dos factores que determinan la producción energética de los aerogeneradores: los recursos eólicos existentes en el parque y las características de la maquinaria a utilizar. Más aún, el rendimiento de los aerogeneradores del parque eólico depende de dos parámetros principales: la velocidad del viento y el diámetro de su hélice (Sánchez 105, 2004).

Para determinar el número de aerogeneradores que funcionarán en el parque eólico, en primer lugar se calcula la *potencia efectiva* de un aerogenerador Enercon modelo E-53. Este cálculo se realiza a través de la siguiente fórmula, la cual se demuestra en el Anexo B.4:

$$P = C_p \left(\frac{\rho}{2} \right) (\pi) \left(\frac{D^2}{4} \right) (V^3) \quad (12)$$

Se utilizan los siguientes datos en este cálculo de la potencia efectiva de un aerogenerador E-53, y a continuación se calcula en (12):

- El coeficiente de potencia (C_p) es de 0,488, para el aerogenerador E-53 (Anexo F)
- La densidad del aire (ρ) es 1,225 kg/m³, a nivel costa.
- El diámetro de las hélices (D), es de 52,9 m para el aerogenerador E-53
- El promedio anual de velocidad del viento (V) es de 8 m/s

$$P = 0,488 \left(\frac{1,225}{2} \right) (\pi) \left(\frac{52,9^2}{4} \right) (8^3) \quad [\text{Watts}]$$

$$P = 336.354 \quad [\text{Watts}]$$

$$P = 0,336 \quad [\text{MW}]$$

De esta manera, la potencia efectiva que se proyecta entregar en cada aerogenerador Enercon E-53 del parque eólico de Manabí es igual a 0,336 MW. En seguida, se calcula la energía que cada aerogenerador produce durante el lapso de un año.

Debido a que las operaciones de producción de energía en los aerogeneradores se interrumpen, por concepto de labores de mantenimiento, se asume una tasa de funcionamiento del 90% de las horas disponibles en un año. Tomando en cuenta este factor, las horas de funcionamiento en el año son 7.780. Al multiplicar dicho número de horas por la potencia efectiva, se obtiene un total de 2.620 MWh de energía eléctrica, cantidad proyectada anual por cada aerogenerador.

Para generar una cantidad mínima de energía de 13.000 MWh anuales, el parque eólico debe contar con *cinco* aerogeneradores Enercon modelo E-53, de 0,8 MW de potencia nominal, cada uno. De esta manera, la *potencia nominal* del parque eólico sería 4,0 MW.

4.4.2. Validación del Número de Aerogeneradores

En la sección anterior, se ha determinado que se necesita cinco aerogeneradores en el parque eólico de Manabí, tomando como un promedio anual de velocidad del viento igual a 8 m/s. Además, se utilizó la ecuación (12) para calcular la potencia efectiva que entrega cada aerogenerador, de acuerdo a la velocidad de viento seleccionada para tal efecto. Entonces, el cálculo de la potencia efectiva de cada aerogenerador resultó igual a 0,336 MW, lo cual equivale a 1,68 MW de potencia efectiva para todo el parque eólico. Con este nivel de producción, se espera alcanzar el objetivo de potencia del parque eólico, igual a 1,65 MW.

En la presente sección se realiza una validación más exhaustiva acerca del número de aerogeneradores, con el fin de determinar si los cinco aerogeneradores son suficientes para producir 1,65 MW de potencia efectiva. Por tal motivo, se elabora una simulación estática simple, utilizando el método de Monte Carlo, el cual representa a un sistema en un punto particular del tiempo y es utilizado para aproximar expresiones matemáticas complejas y costosas de evaluar con exactitud (Banks 13, 2005). En este tipo de simulación, se requiere utilizar números aleatorios de cierta distribución de probabilidad con el fin de obtener valores estimados de cierta medida de desempeño (Banks 13, 2005).

A continuación, se desarrolla un método para validar el dimensionamiento técnico del parque eólico de la provincia de Manabí, en el cual se requiere determinar una distribución de probabilidad para la velocidad del viento en el sitio “Cerro Verde”. Con esto, se genera una gran cantidad de valores de velocidades de vientos aleatorios, los cuales serán utilizados para obtener un estimado de potencia efectiva que podrían producir los aerogeneradores del parque.

4.4.2.1. Identificación de una Distribución de Probabilidad

Tal como se mencionó en la sección 4.3 “Comportamiento del Viento”, el presente proyecto eólico cuenta con un estudio de vientos efectuado en el aeropuerto Los Perales de la provincia de Manabí. Mediante los datos de las velocidades de viento de dicho estudio, presentados en el Anexo E.1, se puede identificar la distribución de probabilidad que describe las velocidades de viento en la zona seleccionada para el parque eólico.

En primer lugar, utilizando el software Minitab® se elabora un histograma en base a los 300 datos del Anexo E.1. El histograma de la Figura 8 contiene una curva que representa el aspecto que tiene la distribución de las mediciones de velocidades de viento. Además, sus estadísticas descriptivas proveen una información acerca de la dispersión de sus datos.

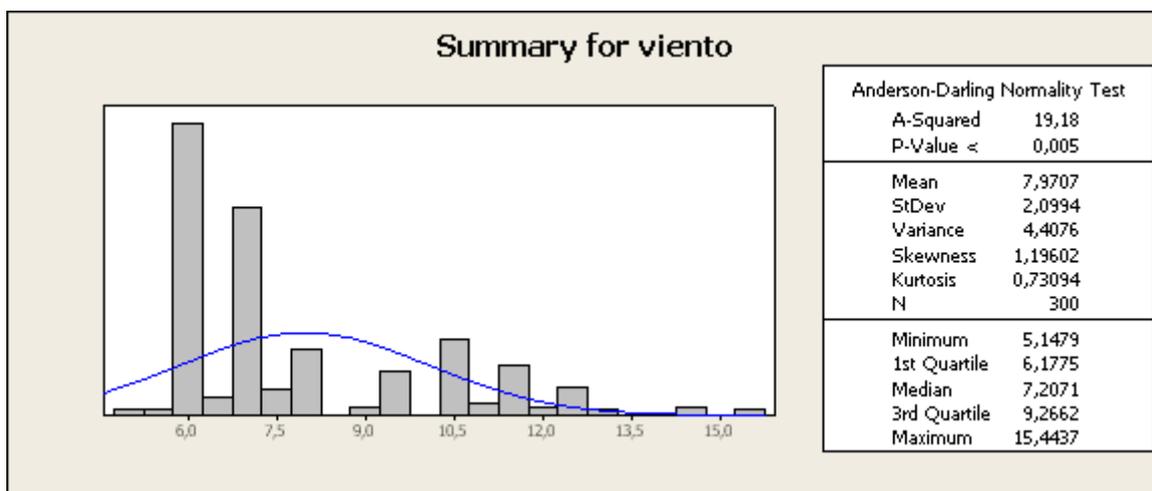


Figura 8. Histograma de los Datos de Viento

A continuación, se realizan pruebas de bondad de ajuste a distintas distribuciones hipotéticas para los datos del Anexo E.1, utilizando el software Minitab®. Los resultados de las pruebas se presentan en la Tabla 24.

Tabla 24. Pruebas de Bondad de Ajuste.

Distribución	AD	<i>p</i>
Weibull	18,653	<0,01
2-Parameter Exponential	19,718	<0,01
3-Parameter Weibull	11,940	<0,005
Loglogistic	14,230	<0,005
Lognormal	15,443	<0,005
Gamma	16,604	<0,005
Logistic	17,181	<0,005
Normal	19,184	<0,005
Exponential	82,758	<0,003

Para cada distribución de la Tabla 24, se tienen dos estadísticos obtenidos a partir de las pruebas de bondad de ajuste: el valor de la prueba Anderson – Darling (AD) y el valor *p*. En estas pruebas de bondad de ajuste se espera obtener un valor *p* alto para no rechazar la hipótesis de que los datos siguen una distribución específica (Banks 327, 2005).

En este caso, las distribuciones *Weibull* y *Exponencial de dos Parámetros* son las posibles distribuciones que se ajustarían a los datos de velocidades de viento.

En el proceso de identificación de la distribución que describa de mejor manera los datos, se analizan los gráficos de probabilidades correspondientes a las dos distribuciones identificadas anteriormente. Este análisis determina de manera visual si alguna de las distribuciones se ajusta adecuadamente a los datos (Montgomery 388 1996). En este análisis, se observa que los datos de velocidades de viento estén alineados con respecto a la línea que forman los datos teóricos de la distribución en función del porcentaje de probabilidad. Se observa también que los datos se ubiquen dentro de los intervalos de confianza para el nivel de significancia seleccionado.

La Figura 9 presenta los gráficos de probabilidades, obtenidos en el software Minitab®, para las distribuciones Weibull y Exponencial de dos parámetros, para un nivel de significancia del 99%.

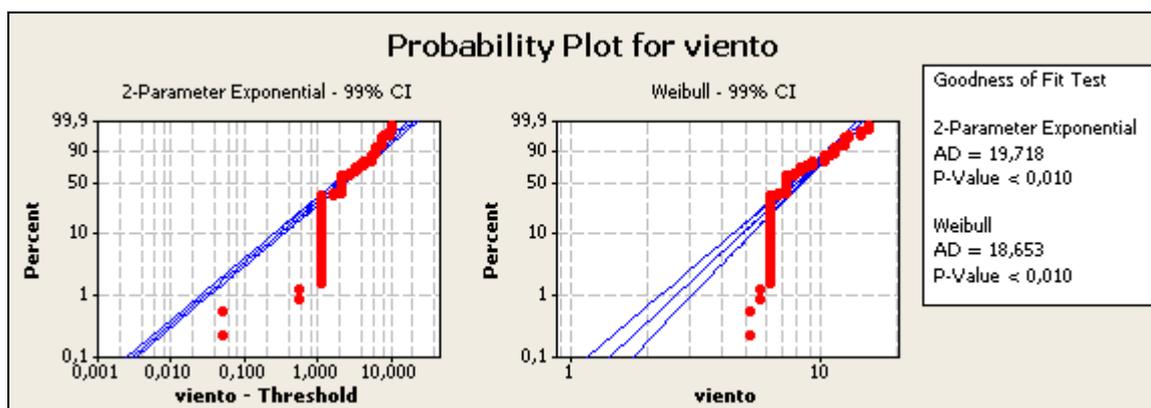


Figura 9. Gráficos de Probabilidad

Del análisis de los gráficos de probabilidades, se indica que no existe evidencia objetiva para concluir que una de las dos distribuciones, Weibull o Exponencial de dos Parámetros, es la que más se ajusta a los datos de velocidades de viento. Sin embargo, se recurre al siguiente criterio técnico para analizar el viento aprovechable: en base a la curva de distribución de probabilidades Weibull se calcula la energía que puede producir el aerogenerador durante un periodo, generalmente de un año (Sánchez 102, 2004).

A continuación, se identifican los parámetros de la distribución Weibull, con el fin de ajustar a los datos de las velocidades de viento. Según las pruebas de bondad de ajuste efectuadas en Minitab®, los parámetros de la distribución Weibull son los siguientes: 3,79816 (forma) y 8,78558 (escala).

4.4.2.2. Generación de Nuevos Datos de Velocidades de Viento

Para obtener un mejor estimado de la potencia efectiva que podrían generar los aerogeneradores de acuerdo a la velocidad promedio del viento que recibe cada uno de ellos, se efectúa una simulación estática mediante el uso de datos pseudos-aleatorios que representen la velocidad del viento que experimentan los aerogeneradores en un instante particular del tiempo. Con este mejor estimado de velocidad promedio del viento, se procederá a utilizar las fórmulas de cálculo de la potencia efectiva y poder de esta manera determinar si la selección de los cinco aerogeneradores satisface la cantidad de energía que se pronosticó el parque debería producir. Este procedimiento es una alternativa factible para alcanzar el objetivo propuesto, dado que preferiblemente se debería contar con un software para la simulación dinámica del viento como un fluido.

El método utilizado en la presente simulación Monte Carlo toma en cuenta la generación de datos pseudo-aleatorios que provienen de la distribución de probabilidad que describe las velocidades de viento, la cual se determinó en la sección anterior. Para ello, se utiliza la función “Datos Aleatorios” del software Minitab[®], seleccionando la distribución Weibull y los parámetros previamente identificados. En total, se generan 50.000 nuevos datos pseudo-aleatorios, a través de 5 corridas independientes de 10.000 nuevos datos pseudo-aleatorios cada uno, para evitar la correlación.

Luego, se aplica la ecuación (12) utilizando los nuevos datos de velocidades de viento generados y se calculan las cantidades de potencia efectiva que entrega cada aerogenerador. La Tabla 25 presenta una muestra de los cálculos realizados por cada aerogenerador.

Tabla 25. Cálculos de Potencia Efectiva Simulada, Aerogenerador 1.

	Cp	ρ (kg/m ³)	π	D (m)	D ² (m) ²	V * (m/s)	V ³ (m/s) ³	Potencia Efectiva (watts)
1	0,488	1,225	3,142	52,9	2.798,41	10,28	1.087,90	714.685,04
2	0,488	1,225	3,142	52,9	2.798,41	8,96	719,49	472.664,47
3	0,488	1,225	3,142	52,9	2.798,41	9,19	777,37	510.686,06
...	0,488	1,225	3,142	52,9	2.798,41
10.000	0,488	1,225	3,142	52,9	2.798,41	5,50	166,12	109.131,91

* Datos pseudos-aleatorios de velocidades de viento obtenidos en Minitab[®].

Los cálculos presentados en la Tabla 25 corresponden a la muestra de 10.000 valores de potencia efectiva producidos por uno de los cinco aerogeneradores. Cálculos similares se ejecutan con respecto a las muestras de potencia efectiva de los cuatro

aerogeneradores restantes. Luego, se suma la potencia efectiva que producen los cinco aerogeneradores obteniendo la potencia efectiva total que produce el parque eólico (Escudero 127, 2004).

Una vez que se han obtenido los 10.000 datos de potencia efectiva del parque eólico, se genera el gráfico presentado en la Figura 10. Este gráfico incluye un histograma de los datos de potencia efectiva del parque eólico, los intervalos de confianza para la media y para la mediana y las estadísticas descriptivas basadas los datos de potencia efectiva.

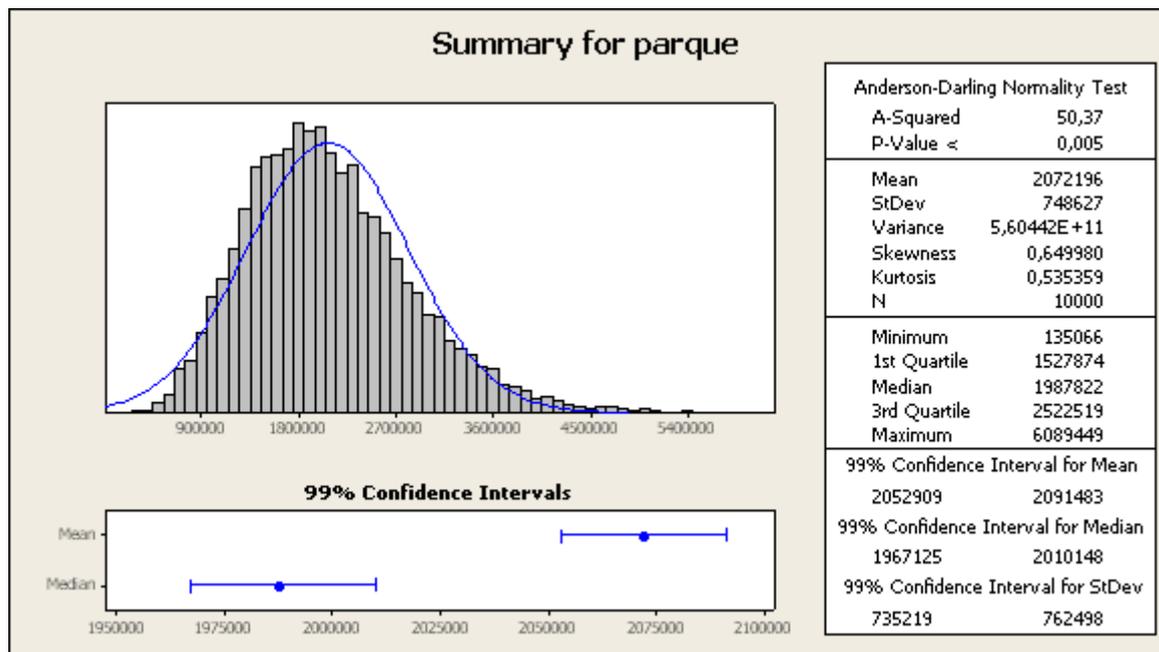


Figura 10. Análisis de la Potencia Efectiva del Parque Eólico.

4.4.2.3. Elaboración de Pruebas Estadísticas de la Potencia Efectiva

El último paso consiste en validar que la potencia efectiva media generada en el parque eólico sea mayor a 1,65 MW, con lo cual se puede alcanzar una producción de energía de 13.000 MWh anuales. Para corroborar este hecho, se observa en la Figura 10 los intervalos de confianza para el valor promedio de la potencia efectiva del parque eólico. Los límites de este intervalo de confianza permiten afirmar que la media de la potencia efectiva se encuentra entre 2,05 MW y 2,09 MW, para un nivel de significancia del 99%.

De la misma manera, se lleva a cabo una prueba de hipótesis para comprobar estadísticamente que la potencia efectiva promedio sea mayor a 1,65 MW. Esta prueba se basa en la muestra de los datos de la Figura 10, que se asume siguen una distribución normal.

Para realizar este análisis, se selecciona la prueba t de las medias, debido a que se desconoce la desviación estándar poblacional de los datos de potencia efectiva del parque eólico (Montgomery 404, 1996). Luego, la prueba t se plantea tal como sigue:

$$H_0: \mu = \mu_0 \quad (\text{Hipótesis nula})$$

$$H_1: \mu > \mu_0 \quad (\text{Hipótesis alternativa})$$

En este caso, μ es la media de la población y μ_0 es el valor hipotético de la media de la población (igual a 1'650.000 Watts). Seleccionando un nivel de significancia del 95%, la prueba t genera los siguientes resultados en el software Minitab®, los cuales se presentan en la Tabla 26.

Tabla 26. Prueba t para la Potencia Efectiva.

Variable	N	Promedio	StDev	SE Mean	95% Lower Bound	T	p
parque	10.000	2'072.196	748.627	7.486	2'059.881	56,40	0,000

De acuerdo a los datos presentados en la Tabla 26, se interpreta lo siguiente:

- El valor p , o el nivel de significancia más pequeño que conduce al rechazo de la hipótesis nula H_0 (Montgomery 388, 1996), es igual a 0,000.
- Debido a que el valor p es menor al valor del nivel de significancia, 0,050, entonces hay una evidencia significativa para indicar que la variable no es igual a 1'650.000 Watts.
- De esta manera, existe la suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula (H_0) en favor de la hipótesis alternativa ($H_1: \mu > 1'650.000$ Watts).

Cabe indicar que el procedimiento de la prueba t ofrece precisión en sus resultados, debido a que se cuenta con 10.000 datos, obtenidos en la simulación de la potencia efectiva para el parque eólico.

En conclusión, serán cinco los aerogeneradores que conforman al parque eólico de la provincia de Manabí porque tienen una suficiente capacidad para producir el nivel requerido de energía anual.

5. DISTRIBUCIÓN DE COMPONENTES EN EL PARQUE EÓLICO

5.1. Introducción

En el presente capítulo, se analiza la manera óptima de colocar los componentes principales del parque eólico: los aerogeneradores y los equipos eléctricos. Para lograr esto, se presenta el proceso de funcionamiento de los equipos eléctricos del parque eólico, enlistando las operaciones relacionadas con la generación de energía. A continuación, se realiza un análisis sobre la distribución en planta en el parque eólico. Luego, se determinan las dimensiones del terreno, indicando sus características principales. Finalmente, se construye un plano de ubicación de los aerogeneradores.

5.2. Marco Teórico de la Distribución de Plantas Industriales

La creación de una distribución es un paso importante en la planificación de una nueva planta industrial. Esto se debe a que los planes de manejo de productos, fabricación, comercialización, distribución, administración y recursos humanos afectan y están afectados por la distribución de la planta (Tompkins 298, 2006). Es necesario contar con un plan de coordinación global de la planta en el cual se busque la mejor ubicación de todas sus unidades.

Adicionalmente, la planificación de la distribución depende de las relaciones de las actividades y los requerimientos de espacio en la planta. Es necesario indicar que las actividades de operación impactan en la eficacia de una disposición de la planta. Así, por ejemplo, un problema de la distribución de planta debe considerar el mejor modo de mover los materiales del proceso A al proceso B, si éste último ocurre inmediatamente después del proceso A. Por ello, en el análisis de la distribución de una planta se debe identificar una configuración adecuada, entre las cuales se encuentran las siguientes (Tompkins 302, 2006):

- Distribución por productos fijos
 - La estación de trabajo se coloca alrededor del material o del producto.
- Distribución por línea de producción
 - Los materiales fluyen de una estación de trabajo a otra, a través de una secuencia de procesamiento.
 - Algunas de las ventajas y desventajas que tiene una distribución por línea de producción se presentan en la Tabla 27.

Tabla 27. Características de una Distribución de Planta orientada al Producto.

Ventajas	Desventajas
1. Se generan líneas de flujo uniformes, sencillas, lógicas y directas	1. El paro de una máquina detiene la línea
2. Deben producirse inventarios pequeños del trabajo en proceso.	2. Los cambios en el diseño de productos pueden provocar que la disposición se vuelva obsoleta
3. El tiempo total de producción por unidad es breve	3. La estación más lenta marca el ritmo de la línea
4. Se reducen los requerimientos de manejo de materiales	4. Se requiere supervisión general.
5. Se demandan menos conocimientos del personal	5. Se suele provocar una mayor inversión de equipo
6. Es posible un control sencillo de la producción	
7. Se puede utilizar equipo para propósitos especiales	

* Fuente: Tompkins (2006).

- Distribución por familias de productos
 - Agrupa varias estaciones de trabajo para formar familias de productos.
- Distribución por procesos
 - Agrupa procesos similares y mantiene departamentos de procesos individuales relacionados entre sí con base en el flujo entre los departamentos

Existen varias técnicas para generar una distribución de planta. A través de una de estas técnicas, se genera una distribución por bloques, en la cual se presentan las ubicaciones y los tamaños relativos de los departamentos incluidos en la planificación, basándose en el flujo de operaciones. Esta técnica será desarrollada en las siguientes secciones de este capítulo.

5.3. Diseño de Layout del Parque Eólico

El parque eólico tiene una distribución en planta, o layout, orientado al producto debido a su generación de energía eléctrica en alto volumen. Tal como se indicó en la sección previa, esta configuración permite que los componentes de la instalación estén ordenados en función de las etapas por las cuales se genera el producto (Vaneskahian 3, 2005).

Para optimizar la producción en el parque eólico, se deben posicionar adecuadamente sus departamentos de producción. Por medio de la técnica conocida como “Planificación Sistemática de la Disposición”, o SLP, por sus siglas en inglés, se definirá la ubicación de los seis departamentos.

Según el procedimiento definido en el SLP, se realiza lo siguiente (Tompkins 306, 2006):

- Análisis del flujo de operaciones.
- Análisis de la relación de las operaciones.
- Desarrollo de un diagrama de relaciones.

Cabe indicar que la técnica SLP a ser aplicada en las próximas secciones, implica el desarrollo de una nueva distribución de planta. Posteriormente, se puede aplicar otra técnica con la cual se mejore la distribución propuesta, a través de la generación de diferentes alternativas.

Inicialmente, se definen los departamentos que ingresan en el layout del parque eólico. Existen cinco departamentos de producción, cada uno de los cuales está formado por un aerogenerador. Por su parte, existe un edificio de control donde serán instalados todos los equipos eléctricos que operan en la generación de energía, a excepción de los aerogeneradores.

5.4. Flujo de Operaciones

A nivel general, el flujo de operaciones inicia con la captación del viento en los aerogeneradores. Luego, continúa en el edificio de control, el cual está conectado a través de cables eléctricos con cada aerogenerador. Posteriormente, se despacha toda la energía transformada en energía útil a través de una línea de transmisión, la cual conecta con la red de distribución de la Empresa Eléctrica Manabí.

En la Figura 11, se presenta un flujo descriptivo de la producción de energía en el parque eólico. A continuación, se detallan las actividades presentadas en el Macroproceso de la Figura 11 (Escudero 150, 2004):

Aerogenerador

1. Captar el viento en sus hélices.
2. Transformar la energía cinética del viento en electricidad, a través del movimiento de un rotor en el aerogenerador en energía rotacional y luego en energía eléctrica.

Cables

3. Conducir la energía trifásica y alterna desde el aerogenerador hasta el regulador de carga de las baterías.

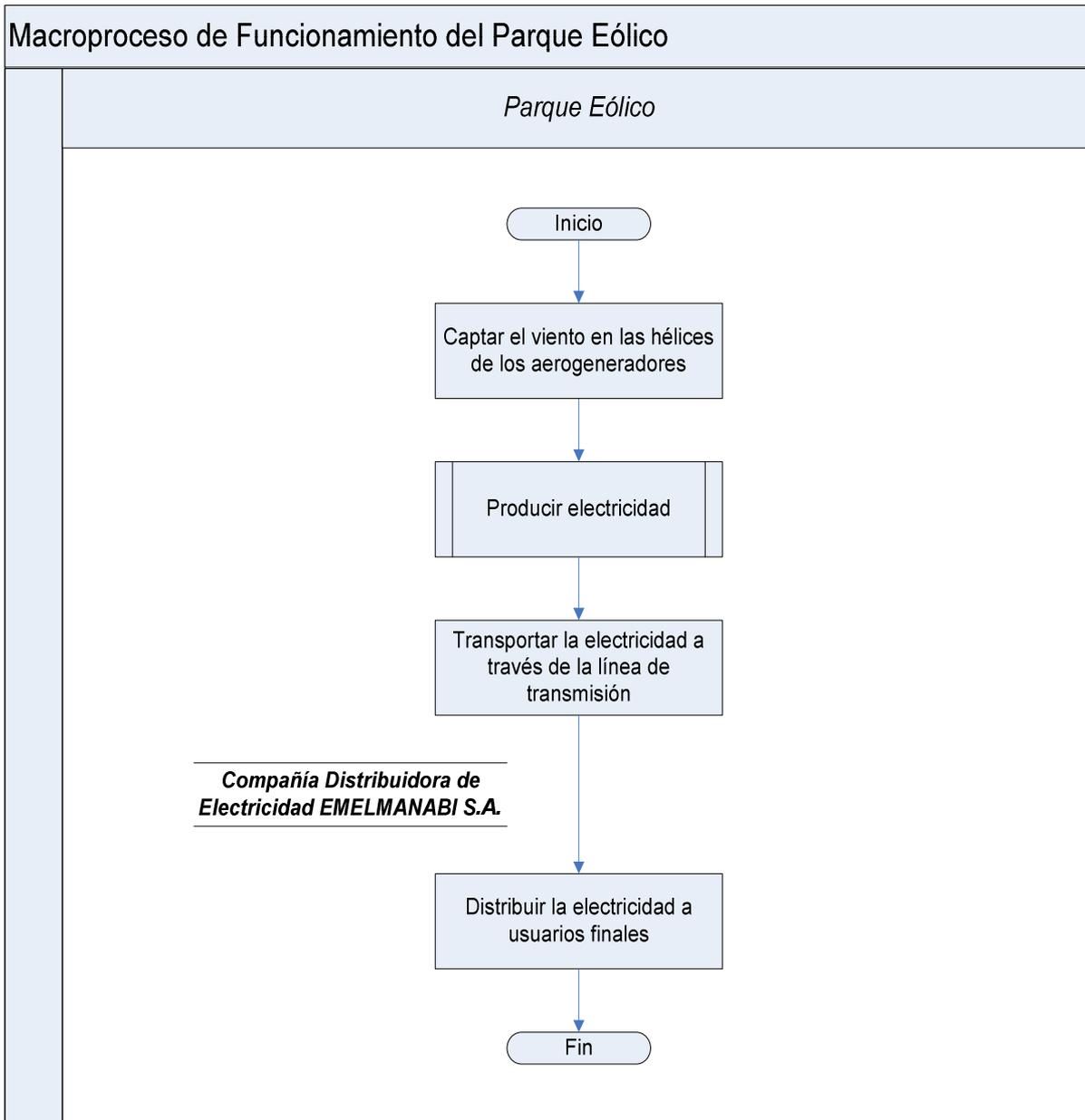


Figura 11. Proceso de Producción de Energía Eléctrica

Regulador de carga

4. Detectar el estado de la carga de las baterías en cada momento.
5. Si el conjunto de baterías registra una sobrecarga de energía, debe cerrar el paso de la energía, disipándola en forma de calor a través de su resistencia.
6. Si no existe sobrecarga, distribuir la energía a las baterías.

Conjunto de Baterías

7. Almacenar la electricidad producida.

Interruptor Trifásico

8. Si existen vientos extremos o se producen fallas en el sistema eléctrico, debe crear un cortocircuito en el alternador del aerogenerador actuando de modo de freno.

Transformador

9. Convertir la electricidad alterna producida, con el fin de alcanzar los vatios que requiere la red eléctrica de la Empresa Eléctrica Manabí.

Rectificador

10. Transformar la electricidad alterna producida en electricidad continua.

Inversor

11. Organizar el paso de corriente.
12. Transformar la electricidad continua rectificada en energía trifásica alterna.

Filtro

13. Depurar y modificar la onda senoidal de la corriente alterna.

Contador

14. Registrar la potencia producida en el parque eólico.

Línea de Transmisión

15. Transportar la electricidad producida en el parque eólico a través de la línea de transmisión hasta la subestación de interconexión con la E.E. Manabí.

E.E. Manabí

16. Distribuir de electricidad a los usuarios finales.

5.4.1. Relación de Operaciones

Una vez determinadas las operaciones productivas a efectuarse en el parque eólico, se analiza la relación entre los aerogeneradores y el edificio de control de energía. Para ello, se construye el gráfico de la Figura 12. Adjunto a la tabla de relaciones de actividades, se indica la calificación de la “cercanía”, que expresa la relación entre los departamentos, y las razones por las cuales se da el valor a la cercanía.

La cercanía relativa entre los aerogeneradores está definida puesto que existe una limitación práctica. Debe haber una separación lateral mínima de 2,5 diámetros entre los centros de las torres, con el fin de evitar la turbulencia entre los aerogeneradores (Escudero 228, 2004). Con esta separación, cada aerogenerador podrá captar de manera adecuada los recursos eólicos en el emplazamiento. Lo que resta por determinar es la ubicación del edificio de control de energía dentro del parque eólico.

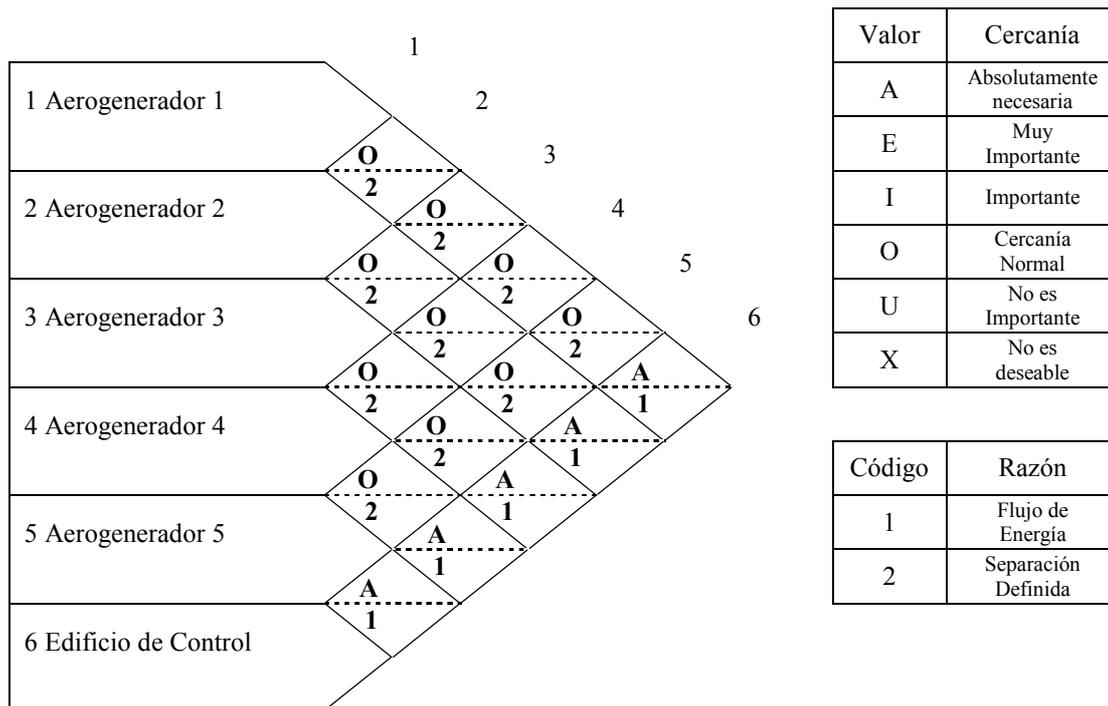


Figura 12. Tabla de Relaciones de Actividades.

5.5. Diagrama de Relaciones

En la Figura 13, se presenta un Diagrama de Relaciones, desarrollado en un plano de dos dimensiones, con el fin de ubicar al edificio de control con respecto a los aerogeneradores.

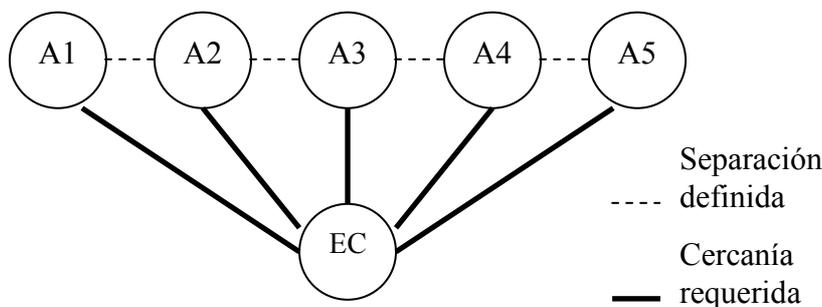


Figura 13. Diagrama de Relaciones.

En la configuración presentada en la Figura 13, se ha colocado al edificio de control cercano al aerogenerador número 3, para que la cercanía a los aerogeneradores 1 y 5 no se vea comprometida. Adicionalmente, se ha definido el posicionamiento de los aerogeneradores en base a las siguientes recomendaciones prácticas. En primer lugar, se han colocado los 5 aerogeneradores en fila, utilizando la disposición más común de éstos equipos dentro de un parque eólico (Mosquera 7, 2006). En segundo lugar, para obtener el mejor rendimiento de los aerogeneradores, deben ser ubicados en dirección perpendicular a

los vientos predominantes (Escudero 227, 2004). Como los vientos predominantes del cantón Sucre están dirigidos en su mayoría hacia el oeste (Anexo E.2), entonces los aerogeneradores deben ser orientados en sentido sur – norte. A continuación, se determinan los espacios requeridos tanto para los aerogeneradores como para el edificio de control.

5.6. Distribución de Espacios

El cálculo del espacio para el parque eólico se desarrolla de la siguiente manera. Cada aerogenerador ocupa un área rectangular de 53 m. de largo, debido al tamaño de su hélice, por 30 m. de ancho. Entonces, el área que ocupa cada aerogenerador es igual a 1.590 m^2 . Esta cifra multiplicada por los cinco aerogeneradores equivale a 7.950 m^2 .

Por su parte, la separación mínima lateral de 2,5 diámetros entre los aerogeneradores equivale a 132,5 m. entre los centros de las hélices. De esta medida, un total de 80m., corresponden a la distancia entre las puntas de las hélices. Cada uno de los cuatro espacios formados entre los aerogeneradores tiene como dimensiones 80 m. de largo por 30 m. de ancho. Entonces, el área que ocupa cada espacio es igual a 2.400 m^2 . Esta cifra multiplicada por los cuatro espacios equivale a 9.600 m^2 .

Al sumar las áreas designadas para los aerogeneradores y para los espacios libres, se obtiene un total de 17.550 m^2 . A esta cifra, se añade un área aproximada de 1000 m^2 , para ubicar el edificio de control, cuyas dimensiones serán 50 m. de largo por 20 m. de ancho. Cabe indicar que el perímetro total del parque eólico mide 1.240 m. Debido al gran tamaño perimetral que se debe cubrir, el terreno del parque eólico no tendría un cerramiento físico.

En la Figura 14, se realiza una superposición al Diagrama de Relaciones de la Figura 13, tomando en consideración los espacios definidos para los aerogeneradores y para el edificio de control.

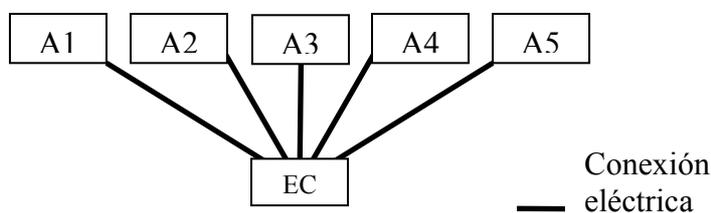


Figura 14. Diagrama de Relaciones de Espacios.

Luego, la Figura 15 presenta la propuesta de ubicación de los aerogeneradores del parque eólico, para captar los recursos eólicos de manera adecuada.

5.7. Análisis de la Producción en el Parque Eólico

La mayoría de operaciones de producción energética se realizan de forma automática por medio de los equipos eléctricos. Por esta razón, se obtiene un flujo continuo de generación energética. La única restricción importante del flujo esta dada por la acumulación de energía en las baterías, creando un inventario en proceso. Sin embargo, este flujo disminuye la cantidad de inventarios en proceso y los tiempos muertos en los equipos.

Cabe indicar que la tasa de producción está determinada por la conversión de la energía cinética del aire que llega a los aerogeneradores en energía rotacional, y posteriormente en energía eléctrica. Esta regulación debe ser tomada en cuenta como un factor de producción para los equipos del edificio de control.

Finalmente, la propuesta es crear cinco líneas de producción de energía eléctrica con los equipos a instalar en el edificio de control. Con esto, si existe algún tipo de daño en alguna de las máquinas no existirá una detención completa de la producción de energía en el parque eólico. Sin embargo, esta solución necesita de una alta inversión porque se utilizarán varias máquinas de alta capacidad para la producción de energía.

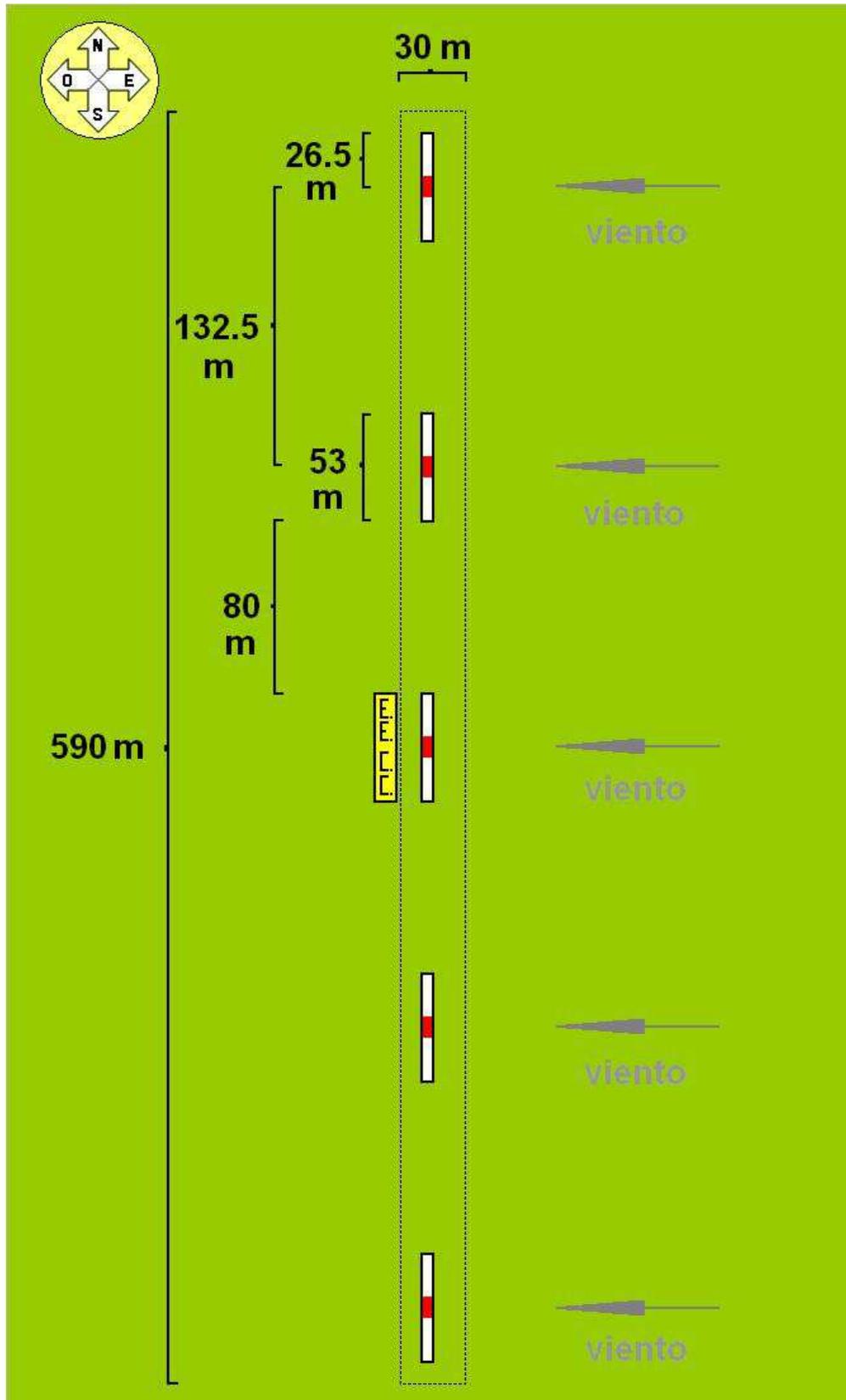


Figura 15. Esquema de Utilización del Terreno del Parque Eólico.

6. CONSTRUCCIÓN DEL PARQUE EÓLICO

6.1. Descomposición en Actividades

Una vez que se ha ubicado, dimensionado y creado una distribución en planta en el parque eólico de la provincia de Manabí, se procede a identificar las actividades a ser ejecutadas con miras a la construcción del parque eólico. Para alcanzar este objetivo, se siguen algunos conceptos básicos de la metodología del Project Management Institute, o PMI, la cual se basa en las siguientes prácticas (“Guía para Gestión” 7, 2007):

- Transformar la dirección del proyecto en un proceso simple y eficiente.
- Indicar transparentemente la estructura del proyecto, el grado de avance y los sucesos más importantes.
- Incluir la formación de equipos de proyecto ubicados en diferentes contextos
- Facilitar la comunicación entre el director del proyecto y sus equipos.

Por su parte, los elementos principales de la planificación de un proyecto que sigue la metodología PMI son los siguientes (De Jaeger par.6, 2008):

- Definir los entregables requeridos.
- Crear el marco para el cronograma del proyecto.
- Definir todas las actividades requeridas.
- Ordenar secuencialmente las actividades.
- Efectuar el análisis de riesgos.
- Obtener la aprobación de financiamiento del proyecto.

A continuación, se enlista una serie de actividades futuras para poner en funcionamiento el proyecto eólico. En cada actividad, se especifica el nivel de dependencia con respecto a otras actividades y lo que se espera obtener al completar cada una de las actividades.

- Actividad 1

Gestión del tiempo y recursos para la construcción del parque eólico

- Realizar estimaciones de tiempo y definir recursos para las actividades previas a la construcción del parque eólico:
 - Estudio financiero
 - Obtención de permisos legales

- Medición de recursos eólicos
- Adquisición de terrenos y de equipos para el parque eólico.
- Realizar estimaciones de tiempo y definir recursos para las actividades de construcción del parque eólico:
 - Vías de acceso
 - Obras civiles: Bodegas de almacenamiento, cimientos para los aerogeneradores, edificio de control.
 - Instalación de aerogeneradores.
 - Conexiones eléctricas y pruebas de funcionamiento.

(Fin: Documento “Cronograma de Dirección del Proyecto del Parque Eólico”)

- Actividad 2

Análisis financiero del parque eólico.

(Actividad predecesora: 1. Cronograma del proyecto)

- Elaborar el presupuesto para construir el proyecto. Según los costos estimados en otros proyectos eólicos (Tabla 3), se proyecta un presupuesto total entre 10 y 20 millones USD.

(Fin: Documento “Análisis financiero para el Parque Eólico”)

- Actividad 3

Inversión para el parque eólico.

(Actividades predecesoras: 1. Cronograma del proyecto; 2. Análisis Financiero)

- Presentar la propuesta de construcción a posibles inversionistas del proyecto.
- Firmar un contrato para obtener la inversión total del proyecto.
- Dividir las entregas de fondos, los cuales respaldarán las siguientes actividades:
 - Adquisición e instalación de equipos de medición en sitio.
 - Construcción de obras civiles del parque eólico.
 - Adquisición, importación, transporte e instalación de aerogeneradores.
 - Adquisición e instalación de equipos de control para generar energía.

(Fin: Inversión adquirida para el proyecto)

- Actividad 4
Permisos legales para medir recursos eólicos en sitio.
(Actividad predecesora: 3. Inversión para equipos de medición)
 - Obtener permisos de instalación de equipos de medición de vientos en el sitio “Cerro Verde” del cantón Sucre, de la provincia de Manabí.(Fin: Permisos legales para medir recursos eólicos)
- Actividad 5
Medición de recursos eólicos en la ubicación seleccionada.
(Actividad predecesora: 4. Permisos legales de medición)
 - Adquirir los equipos de medición de vientos.
 - Instalar los equipos de medición de vientos.
 - Realizar pruebas de funcionamiento de los equipos de medición.
 - Monitorear y descargar los datos generados, durante un periodo de un año.
 - Elaborar informes periódicos sobre las mediciones.
 - Evaluar el potencial eólico disponible en la ubicación seleccionada.(Fin: Documento “Estudio de Recursos Eólicos del sitio “Cerro Verde”).
- Actividad 6
Permisos legales para la construcción del parque eólico en Manabí.
(Actividad predecesora: 5. Estudio de Recursos Eólicos)
 - Obtener una calificación por parte de la Dirección Nacional de Energías Renovables del Ministerio de Minas y Petróleos del Ecuador.
 - Presentar al Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC) los requisitos necesarios de concesión para el parque eólico y la línea de subtransmisión.
 - Obtener licencias ambientales por parte del Ministerio del Ambiente.(Fin: Permisos legales para la construcción del parque eólico)
- Actividad 7
Adquisición del terreno para el parque eólico.
(Actividades predecesoras: 5. Medición de recursos eólicos; 6. Permisos legales de construcción)
 - Negociar con propietarios particulares de terrenos en el sitio “Cerro Verde” y con el Gobierno Provincial de Manabí.
 - Definir las coordenadas de ubicación exactas donde se construirán las torres de soporte de los aerogeneradores.

- Diseñar un plano de ubicación de los aerogeneradores.
(Fin: Terreno adquirido y planos elaborados)
- Actividad 8
Adquisición de equipos para el parque eólico (aerogeneradores y equipos de control).
(Actividades predecesoras: 5. Medición de recursos eólicos; 6. Permisos legales de construcción)
 - Calificar a los proveedores de equipos eólicos.
 - Establecer la negociación con compañía proveedora de los equipos eólicos.
 - Firmar un contrato con la compañía proveedora de los equipos eólicos.(Fin: Equipos eólicos adquiridos)
- Actividad 9
Importación de equipos eólicos.
(Actividad predecesora: 8. Adquisición de equipos eólicos)
 - Coordinar el transporte marítimo de los aerogeneradores desde la ubicación del fabricante hacia el puerto de Manta.
 - Realizar los trámites aduaneros de importación de equipos eólicos.(Fin: Equipos importados al Ecuador)
- Actividad 10
Mejoramiento de vías de acceso al parque eólico.
(Actividad predecesora: 7. Adquisición de terrenos)
 - Seleccionar y trazar zonas con pendientes bajas para la vía de acceso.
 - Cubrir con grava la vía de acceso al parque eólico.
 - Incluir un sistema de alcantarillado.(Fin: Vías de acceso construidas y/o mejoradas)
- Actividad 11
Construcción de bodega de almacenamiento de materiales.
(Actividad predecesora: 7. Adquisición de terrenos)
 - Construir un área de bodega, para almacenar temporalmente los equipos eólicos(Fin: Bodega construida)

- Actividad 12

Transporte de equipos a la ubicación del parque eólico.

(Actividades predecesoras: 9. Importación de equipos eólicos; 10. Mejoramiento de vías de acceso; 11. Construcción de bodega)

- Contratar camiones necesarios para el transporte de materiales.
- Coordinar el transporte terrestre los equipos eólicos desde el puerto marítimo de Manta hasta la ubicación seleccionada.

(Fin: Equipos transportados al terreno del parque eólico)

- Actividad 13

Preparación de cimientos para las torres de los aerogeneradores.

(Actividad predecesora: 7. Adquisición de terrenos)

- Preparar el terreno donde se ubicarán las torres de los aerogeneradores.
- Levantar los cimientos de las cinco plataformas del parque eólico.

(Fin: Cimientos construidos para las torres de los aerogeneradores)

- Actividad 14

Levantamiento de torres e instalación de aerogeneradores.

(Actividades predecesoras: 12. Equipos transportados; 13. Cimientos construidos)

- Contratar una grúa principal y una grúa de soporte para el levantamiento de materiales.
- Izar las cinco torres del parque eólico.
- Instalar y montar los aerogeneradores en las torres izadas.

(Fin: Aerogeneradores instalados en las torres)

- Actividad 15

Preparación de las conexiones eléctricas.

(Actividad predecesora: 14. Aerogeneradores instalados en las torres)

- Instalar los equipos y las conexiones eléctricas dentro de la torre: transformadores, sistema eléctrico, cableado interno y subterráneo.
- Realizar pruebas de funcionamiento de los componentes eléctricos de las torres

(Fin: Conexiones eléctricas instaladas)

- Actividad 16

Construcción del edificio de control dentro del parque eólico.

(Actividad predecesora: 13. Cimientos construidos; 15. Conexiones eléctricas)

- Remover la vegetación y preparar el terreno para el edificio de control.
- Construir el área de oficinas y laboratorios en el edificio de control.
- Instalar los sistemas de control de energía y baterías en el edificio de control.

(Fin: Equipos instalados en el edificio de control)

- Actividad 17

Construcción de la línea de Transmisión Eléctrica.

(Actividad predecesora: 16. Equipos instalados en el edificio de control)

- Adquirir e instalar los postes por donde se montarán los cables de la línea de transmisión eléctrica, con una longitud aproximada de 12 a 15 Km.
- Instalar la línea de transmisión, la cual inicia en el parque eólico y conecta con la subestación de Interconexión “Bahía” del cantón Sucre.

(Fin: Línea eléctrica instalada)

- Actividad 18

Pruebas de funcionamiento del parque eólico.

(Actividades predecesoras: 16. Equipos instalados en el edificio de control; 17. Línea eléctrica instalada)

- Determinar la potencia efectiva que producirá el parque eólico

(Fin: Documento “Cifras de Energía a Producir en el Parque Eólico”)

- Actividad 19

Venta de energía a producir en el parque eólico.

(Actividad predecesora: 18. Pruebas de funcionamiento de equipos en el parque eólico)

- Negociar la venta de la energía producida en el parque eólico a la E.E. Manabí.
- Firmar compromiso de venta de energía a través de la red de la E.E. Manabí

(Fin: Contrato firmado).

Para visualizar de manera más simple las actividades de la fase de ejecución, se recurre a la formación de una red de proyecto, la cual muestra el orden de precedencia de sus actividades (Hillier 470, 2001). La red consiste en 19 nodos, cada uno de los cuales representa cada una de las actividades previamente descritas.

Además, la red cuenta con varios arcos dirigidos de un nodo a otro, para visualizar la relación de precedencia entre las actividades. A continuación, se presenta en la Figura 16 la red de actividades para el proyecto eólico.

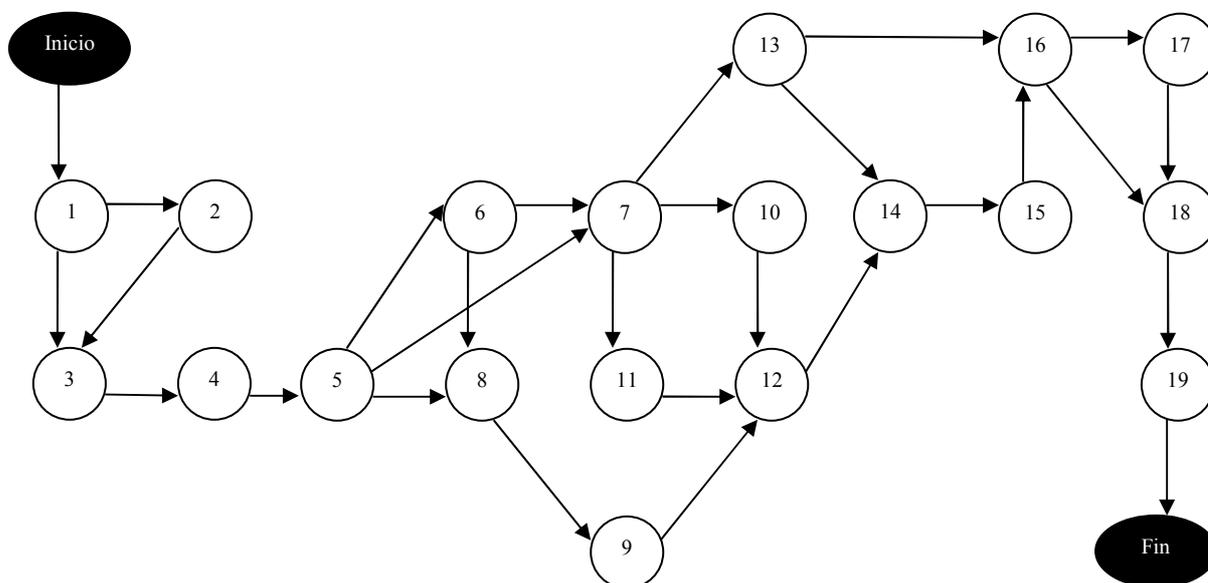


Figura 16. Red del Proyecto Eólico.

La duración estimada conocida actualmente pertenece a la actividad 5: *Medición de Recursos Eólicos*. Esta actividad se debe realizar durante un año, para verificar el comportamiento de los vientos (Escudero 222, 2004). Durante ese periodo de tiempo, se espera llevar a cabo actividades paralelas, como la obtención de permisos de funcionamiento del parque eólico en el mercado eléctrico ecuatoriano, la negociación del terreno del parque eólico, la adquisición de los aerogeneradores, entre otras.

6.2. Plan Logístico para el Transporte y Montaje de Equipos

Para llevar a cabo el transporte, descarga, movilización y montaje de los equipos y aerogeneradores se deben revisar sus características en las guías que proporciona el fabricante (por ejemplo, Anexo F). Luego, se determinan las dimensiones de embalajes, pesos y otras características inherentes al transporte hacia el sitio “Cerro Verde”, seleccionado para la construcción del parque eólico.

Existen tres actividades descritas en la sección anterior, las mismas que se forman parte de la logística de transporte los aerogeneradores hasta el sitio del parque eólico. Junto a cada actividad, se enumeran algunos lineamientos recomendables para efectuar las actividades:

- Transporte marítimo desde el puerto seleccionado por el proveedor hasta Manta.
 - Se requiere el suficiente espacio en el medio de transporte marítimo.
 - Al espacio provisto para la carga de aerogeneradores, grúas de montaje y otros equipos, se debe considerar un espacio adicional para el manejo de la carga.
- Trámites de importación de equipos al Ecuador, a través de las Aduanas.
 - La descarga de los equipos y los trámites de importación de los mismos deben efectuarse en el puerto marítimo de Manta.
 - Debido a que existen limitaciones en cuanto al espacio disponible en el puerto marítimo de Manta, la mayor parte de los equipos deben ser transportados inmediatamente al sitio de construcción del parque eólico.
- Transporte terrestre desde el puerto de Manta hasta el sitio “Cerro Verde”.
 - Antes de efectuar el transporte terrestre, deben estar concluidas las obras civiles en las vías de acceso al parque eólico, para el paso de camiones.
 - El transporte terrestre de las hélices del aerogenerador E-53 y las torres requieren de camiones de gran capacidad.
 - La ruta desde el puerto marítimo de Manta hasta el sitio “Cerro Verde” atraviesa una distancia de 83 Km., aproximadamente, entre los cuales, se tiene una pista asfaltada con varias curvas en el 90 % del camino. Únicamente existe una carretera de tierra en la sección entre El Higuerón y Charapotó. (5 Km.)
 - Se debe notificar que durante el transporte terrestre habrán inconvenientes para la circulación de vehículos por las carreteras involucradas.

Con respecto a la ruta a seguir, se ha determinado la ruta para llegar al parque eólico por medio de algunas coordenadas geográficas cercanas al Sitio “Cerro Verde”. Las coordenadas geográficas fueron obtenidas a través del Sistema de Consultas de Puntos de Control del Instituto Geográfico Militar. Este sistema provee información acerca de varios puntos ubicados a lo largo del territorio ecuatoriano.

En cuanto a la presente investigación, existen dos puntos de control cercanos al sitio “Cerro Verde”, de los cuales se tiene la siguiente información (“Puntos de Control”, 2008):

- Las Coronas (-80,35;-0,83), altura 150 metros sobre el nivel del mar
 - Ubicado en el recinto “Las Coronas”.
 - Partiendo desde el Estadio “Reales Tamarindos” de Portoviejo con dirección a Chone, se recorre 21.7 km., y se llega a una "y" (Chone - San Clemente)
 - Se sigue 24.2 km. con dirección hacia San Clemente
 - Se sigue 11.7 km. con dirección hacia Tosagua hasta llegar a “Las Coronas”.
- Mauricio (-80,36;-0,75), altura 230 metros sobre el nivel del mar
 - Ubicado en una loma adjunta al camino que conduce al recinto “Las Coronas”.
 - Partiendo desde Bahía de Caráquez con dirección a Chone, se recorre 7.1 km.
 - Se toma un camino de verano que conduce a la derecha y se recorre 13.2 km. hasta coronar una pendiente, donde se ubica el punto “Mauricio”.

Con respecto al montaje de los aerogeneradores, esta operación no debe presentar mayores dificultades, debido a que no existen espacios limitados en el sitio “Cerro Verde” por asentamientos poblacionales. Una vez construidas las plataformas para las grúas, el sitio ofrecerá las condiciones adecuadas para llevar a cabo un montaje normal de los aerogeneradores.

Finalmente, se requieren dos grúas para el montaje de los aerogeneradores. La grúa principal debe tener una potencia aproximada de 400 toneladas fuerza, para levantar piezas de gran volumen a la altura del rotor del aerogenerador. Esta grúa debe ser similar a una de las grúas que se encuentran en el puerto marítimo de Manta. Por su parte, la grúa secundaria debe cargar los equipos y las partes de los aerogeneradores. Para fines del proyecto, será necesario contratar el servicio de una grúa de gran capacidad en el país, tomando en cuenta que implica un incremento en el transporte, el tiempo y los costos respectivos.

6.3. Plan de Seguridad Industrial

Las instalaciones industriales deberán ser proyectadas, ejecutadas, utilizadas y mantenidas de forma que produzcan el mínimo riesgo para las personas y las cosas, incluido el medio ambiente (Herrera 3, 2006). En el ambiente de trabajo de la construcción

y operación del parque eólico, al existir riesgos eléctricos para el personal, los equipos y el parque eólico en general, la seguridad personal depende del conocimiento de las condiciones y procedimientos de trabajo, de los posibles accidentes, y de su respuesta oportuna.

El objetivo de este plan de Seguridad Industrial es prevenir riesgos eléctricos y mecánicos en el parque eólico. La regla general a seguir por los trabajadores es tomar las precauciones debidas y trabajar prudentemente, conociendo siempre lo que se está haciendo.

Por una parte, los aerogeneradores pueden causar serios accidentes si no se instalan correctamente o no se trabaja adecuadamente con ellos (Escudero 155, 2004). Por tanto, al desconocer los peligros de este tipo de máquinas, el riesgo es evidentemente mayor.

Por otro lado, el hecho de levantar las torres donde se instalarán los aerogeneradores representa peligros potenciales a los trabajadores. Pese a que se espera contar con una grúa apropiada, es de vital importancia determinar el estado de los cables que izan la torre. Esto debido a que protege de una caída del sistema en el área circundante.

Además, el área no tendrá cerramiento durante la fase de construcción, debido a que se necesita la movilización efectiva de maquinaria pesada en el área de las plataformas. Sólo la subestación de energía estará cercada, por el peligro inherente de sus equipos de alta tensión.

Con esta introducción, a continuación se describen las reglas a cumplir para llevar a cabo el plan de Seguridad Industrial de trabajadores en el parque eólico.

6.3.1. Riesgos mecánicos

- No acercarse a ninguna máquina en movimiento (hélices o sistemas rotatorios)
- Detener las hélices de los aerogeneradores totalmente antes de trabajar con ellas.
- Para detener al aerogenerador, debe estar desviado de la dirección del viento, o se debe cortocircuitar sus cables de salida.

6.3.2. Riesgos eléctricos

- Revisar las conexiones eléctricas, y mantenerlas limpias y secas (Aníbarro 20, 2006).
- Evitar que los generadores giren sin propósito, porque generan voltaje en tensiones que pueden alcanzar valores muy altos.

- Usar fusibles para protegerse contra corrientes y voltajes altos. Sin embargo, la correcta instalación de los equipos no necesitará de estos elementos protección.
- Verificar que los cables tengan el grosor adecuado.
- Antes de elevar al aerogenerador a la torre, comprobar que todo funciona perfectamente y hacer las correcciones oportunas, con el objeto de evitar el trabajo en alturas del personal.

6.3.3. Riesgos al instalar las torres en las plataformas

- No permitir el ingreso de personas fuera del equipo de izado de torres en el área circundante a la plataforma de instalación.
- Evitar que el personal esté situado cerca de la torre, especialmente por el lado donde se está inclinando la torre, para que en caso de caída de la torre, lo haga por el lado donde no hay trabajadores.
- Comprobar la tensión de los cables que sostienen la torre. No deben estar demasiado tensos, ni demasiado flojos.
- Asegurar una buena comunicación entre el equipo de trabajadores a través del uso de radios de comunicación móviles.
- Una vez izada la torre, conectarla a tierra para protegerla contra posibles rayos.
- Evitar treparse por la torre, sin permiso de trabajo en alturas respectivo.

6.4. Conexión con la Red Eléctrica de la Empresa Eléctrica Manabí

Antes de iniciar la construcción del parque eólico, se debe acordar una alianza estratégica con una compañía distribuidora de energía eléctrica. Dada la localización favorable del parque eólico en la provincia de Manabí, se espera firmar un acuerdo con la Empresa Eléctrica Manabí. Solamente bajo el consentimiento de esta empresa, se hará la conexión a su red de distribución de energía, que llegará posteriormente a los clientes finales.

En el contrato con la compañía distribuidora de energía, E.E. Manabí, debe constar que la venta de energía por parte del parque eólico se realizará exclusivamente a la E.E. Manabí. Para que dicho contrato tenga validez, se debe contar con la aprobación del Consejo Nacional de Electricidad CONELEC, según lo dispuesto en la legislación actual ecuatoriana. Adicionalmente, se deberán cumplir con todos los requisitos legales para obtener la inscripción en calidad de proveedores de la E.E. Manabí, según lo presentado en el Anexo G.

Por otro lado, la E.E. Manabí debe proveer información detallada del estado de la línea eléctrica instalada, la demanda poblacional, el crecimiento operacional, etc. Toda esta información servirá para confirmar el dimensionamiento de los aerogeneradores y los equipos eléctricos complementarios que funcionarán en el parque eólico. Además, esta información permitirá realizar modificaciones en el diseño actual del parque eólico. Similarmente a la fase de construcción, en la fase de operación regular del parque eólico se espera contar con la información de la E.E. Manabí, como parte del acuerdo a firmar entre las partes involucradas.

Finalmente, se espera obtener la cooperación y el compromiso por parte de la E.E. Manabí para crear nuevos proyectos de promoción de energías renovables en otros terrenos de su provincia, que cuenten con el potencial eólico requerido. De esta manera, se eliminarán progresivamente las barreras que enfrentan las energías renovables en el Ecuador.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

Para finalizar el desarrollo del presente proyecto y luego de efectuar una investigación de un sistema eólico de energía para la sociedad ecuatoriana, se concluye lo siguiente:

- El viento es una fuente renovable de energía perdurable en el tiempo, prácticamente inagotable y gratuita. Aporta su potencial energético sin contaminar el medio ambiente, aspecto que debe generar interés nacional en cuanto a la conservación de la naturaleza y al desarrollo de la población.
- La producción mundial de energía eléctrica con aerogeneradores ha crecido de manera importante en los últimos años, debido a los beneficios relacionados al uso de energías renovables y a la disminución de la utilización de los combustibles fósiles
- El agrupamiento de aerogeneradores en un parque eólico se debe al hecho de que se aprovecha de mejor manera los recursos energéticos de un emplazamiento. Además, se centraliza la distribución de energía desde un solo punto, se reduce el número de líneas de distribución y se minimizan los impactos ambientales.
- Pese a que existe un elevado costo inicial en la instalación de un parque eólico, éste presenta una serie de beneficios importantes: una baja frecuencia de mantenimiento, una vida estimada entre 20 y 25 años para sus componentes, una operación diaria y un mantenimiento fácil de llevar a cabo y, por último, un respaldo substancial de organismos nacionales e internacionales.
- Un parque eólico es una alternativa importante en la búsqueda de una solución a los problemas de energía eléctrica para las comunidades ecuatorianas alejadas de las redes de distribución eléctrica que funcionan actualmente.
- Por su parte, tanto la ubicación, el dimensionamiento y el diseño del parque eólico son factores importantes para el éxito de esta nueva generadora de energía en el Ecuador.
- Para encontrar soluciones óptimas a los problemas de localización de plantas industriales, se recurre al problema de la p -mediana, el cual cuenta con métodos heurísticos, como el algoritmo de Weiszfeld, para resolver el problema planteado.

- La solución proporcionada por el algoritmo de Weiszfeld resulta en un sitio óptimo, ubicado en el cantón Sucre de la provincia de Manabí. La forma de validar este resultado es a través de una observación en campo en el cual se pudo constatar que el sitio es abierto para la construcción, bajo los permisos de la prefectura de Manabí.
- Además, una de las premisas que maneja el proyecto es la siguiente: a mayor potencia instalada, mayor oportunidad de producir la cantidad de energía que los diferentes cantones de la provincia de Manabí requieren anualmente
- La propuesta de instalación del parque eólico incluye cinco aerogeneradores alemanes Enercon modelo E-53 de 0,8 MW, con un diámetro de 52,9 m. y una altura de eje del rotor de 73 m.
- El parque eólico tendrá una potencia nominal instalada de 4 MW. El valor de potencia efectivo dependerá de un factor preponderante: la captación de aire en las hélices de los aerogeneradores.
- Mediante una simulación Monte Carlo, se determinó que el intervalo de confianza del 99% para el valor de la media de la potencia efectiva producida en el parque eólico tiene como límites superior e inferior 2,05 MW y 2,09 MW, respectivamente.
- A través de una prueba de hipótesis, se determinó que el parque eólico tiene suficiente capacidad en sus aerogeneradores para igualar y superar la demanda prevista de energía eléctrica, por parte de los clientes regulados de la Empresa Eléctrica Manabí.
- Por medio de un análisis de la distribución en planta, se determinó que el factor más importante para la distribución de aerogeneradores en el parque eólico se trata de la separación que debe existir entre los aerogeneradores, con el fin de que no exista una interferencia significativa en sus producciones energéticas individuales. Se determinó también que el área requerida para el parque eólico es de 17.550 m².
- El transporte y montaje de los aerogeneradores presenta problemas de carácter logístico que pueden impactar significativamente en el costo de la construcción del parque eólico.
- El proyecto eólico desarrollado para la provincia de Manabí cuenta con el potencial respaldo de la Empresa Eléctrica Regional Manabí, quien distribuirá la energía producida a los clientes de su provincia.

7.2. Recomendaciones

Para llevar a la práctica el estudio desarrollado en el presente proyecto eólico, se efectúan las siguientes recomendaciones:

- La aplicación de construcción de un parque eólico para la generación de energía eléctrica requiere de un estudio de vientos que maneje un alto nivel de detalle, principalmente en lo que se refiere a los recursos eólicos disponibles. Mientras más información se analice en el estudio de vientos, mayores serán las oportunidades de obtener resultados positivos en la implementación de sistemas eólicos.
- Se debe efectuar un estudio de suelos para conocer el estado del terreno en donde se va a realizar la construcción del parque eólico, tomando las precauciones necesarias.
- Conforme transcurre el tiempo, es necesario actualizar los pronósticos con datos más recientes de la demanda de los clientes de la Empresa Eléctrica Manabí, con el fin de obtener un objetivo de producción anual de energía en el parque eólico.
- Se puede incrementar la potencia nominal del parque eólico en etapas futuras, si se encuentra que este hecho es factible a través de un estudio detallado de vientos a realizarse en el sitio “Cerro Verde” del cantón Sucre de la provincia de Manabí.
- Se puede efectuar un análisis más profundo de la producción de energía a través de la utilización de un software adecuado para simular dinámicamente el comportamiento de los vientos en el sitio seleccionado.
- Se pueden realizar mejoras en la distribución en planta en el parque eólico, utilizando algoritmos diseñados para tal efecto.
- Los planes logísticos y de seguridad industrial para construir el parque eólico deben contar con un seguimiento especial para que la nueva planta sea bien diseñada y para que su construcción se lleve a cabo correctamente.
- Se recomienda llevar a cabo un estudio completo de factibilidad económica antes de llevar a cabo la instalación de la planta de producción de energía eólica.
- Se recomienda que los organismos de control del mercado eléctrico ecuatoriano promuevan la libre competencia de las energías renovables y su promoción nacional.
- Finalmente, se espera que las experiencias adquiridas en el desarrollo de este proyecto se aprovechen en otros proyectos eólicos en distintas regiones del país.

BIBLIOGRAFÍA

- “Acerca del Proyecto”. Fideicomiso Mercantil Proyecto Eólico San Cristóbal. Galápagos Wind. (Jul. 2008).
<<http://www.galapagoswind.org/es/acerca-del-proyecto.html>>
- “Aerogeneradores Enercon”. Gama de Productos. May. 2007: 5. Enercon GmbH. (Jul. 2008)
<[http://www.enercon.de/www/es/broschueren.nsf/vwwwebAnzeige/7F131174CC84FF5DC12573310047C138/\\$FILE/ENERCON_Product_Overview_SP.pdf](http://www.enercon.de/www/es/broschueren.nsf/vwwwebAnzeige/7F131174CC84FF5DC12573310047C138/$FILE/ENERCON_Product_Overview_SP.pdf)>
- Alarcón, Pedro. Entrevista Personal. 25 Abr. 2008.
- Aníbarro, Enrique. “Reglamento sobre Condiciones Técnicas y Garantías de Seguridad en Centrales Eléctricas y Centros de Transformación”. Oct. 2006: 20. (Jul. 2008).
<<http://www.seguridadindustrial.org/presen/presentacionespdf/reglamentosubestaciones.rar>>
- Aspectos Técnicos y Comerciales de Emelmanabí. Manta: Empresa Eléctrica Manabí, 2008.
- Banks, Jerry, et al. Discrete-Event System Simulation. 4ta ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005.
- Bauer, Mariano, et al. “Guía Latinoamericana del MDL”. Metodologías para la Implementación de los Mecanismos Flexibles de Kyoto. Abr. 2005. Programa Synergy. (Jul. 2008)
<<http://www.cordelim.net/extra/html/pdf/library/olade.pdf>>
- Buffa, Elwood y William Taubert. Sistemas de Producción e Inventario. Planeación y Control. 2da. ed. México: Limusa, 1981.
- Calero, Carlos. “Instructivo para Programas del FERUM”. Proyecto de Regulación Sustitutivo. Ene. 2008: 2-5. Consejo Nacional de Electricidad. Quito. (Jul. 2008).
<<http://www.conelec.gov.ec/images/normativa/001-08%20FERUM.doc>>
- Cánovas, Lázaro, Roberto Cañavate y Alfredo Marín. “On the Convergence of the Weiszfeld Algorithm”. Mathematical Programming. Dic. 2001: 1. Universidad de Murcia. (May. 2008).
<<http://www.springerlink.com/content/8g100u5p20dt9xww>>
- De Jaeger, Jean Michel. “Guía del PMBOK”. Gestión de Programas y Proyectos. (Jul. 2008).
<http://www.12manage.com/methods_pmi_pmbok_es.html>
- “Delinean Política para Sector Eléctrico”. Diario El Mercurio. 19 Sep. 2003. (Jul. 2008).
<http://www.elmercurio.com.ec/web/titulares.php?seccion=LPdYzLB&nuevo_mes=09&nuevo_ano=2003&dias=19>

- “Ecuador, País de Abundancia Energética”. Ago. 2008. Organización Latinoamericana de Energía. (Ago. 2008). <<http://www.olade.org.ec/noticia61.html>>
- “Electrificación de las Islas Galápagos con Energías Renovables”. Ago. 2006. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (Jul. 2008).
<http://www.undp.org.ec/Proyectos/proyectos/publicproy.php?pro_codigo=00012297&id=3>
- Elsayed, Elsayed A. y Thomas E. Boucher. Analysis and Control of Production Systems. 2da ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 1994.
- “Energía Limpia y Renovable”. Revista Sector Industrial. 19 Abr. 2007: 3, 19.
- Escudero, José María. Manual de Energía Eólica. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2004.
- “Estadística del Sector Eléctrico Ecuatoriano”. Boletín del Año 2007. Jul. 2008: 214, 295-299. Consejo Nacional de Electricidad. Quito. (Ago. 2008).
<<http://www.conelec.gov.ec/images/documentos/Estadistica2007.zip>>
- “Estadística del Sector Eléctrico Ecuatoriano”. Boletín del Año 2006. Abr. 2007: 261 – 265. Consejo Nacional de Electricidad. Quito. (Jul. 2008).
<http://www.conelec.gov.ec/images/documentos/Estadistica_2006.pdf>
- “Estadística del Sector Eléctrico Ecuatoriano”. Boletín del Año 2005. Oct. 2006: 185, 297. Consejo Nacional de Electricidad. Quito. (Jul. 2008).
<http://www.conelec.gov.ec/images/documentos/e_2005.pdf>
- “Estadística del Sector Eléctrico Ecuatoriano”. Boletín del Año 2004. Jul. 2005: 175, 265. Consejo Nacional de Electricidad. Quito. (Jul. 2008).
<http://www.conelec.gov.ec/images/documentos/e_2004.pdf>
- “Estadística del Sector Eléctrico Ecuatoriano”. Boletín del Año 2003. May. 2004: 67, 227. Consejo Nacional de Electricidad. Quito. (Jul. 2008).
<http://www.conelec.gov.ec/images/documentos/e_2003.pdf>
- Fernández, José, et al. “Localización Competitiva en el Plano con Decisiones de Diseño”. Análisis y Aplicaciones de Decisiones sobre Localización de Servicios. Jul. 2005: 2-4. Universitat Politècnica de Catalunya (Jul. 2008).
<<http://www-eio.upc.es/personal/homepages/elena/Tutoriales/Murcia-Localizacion-Diseno.pdf>>
- “Global Installed Wind Power Capacity (MW) – Regional Distribution”. The European Wind Energy Association. 15 Feb. 2008. (Jul. 2008).
<http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/press_releases/2008/gwec-table-2008.pdf>
- González, Kira. Entrevista Personal. 20 Ago. 2008.

- “Guía para la Gestión de Proyectos Edición 2000”. Project Management Book of Knowledge. Sep. 2007: 7. Instituto de Gestión de Proyectos. (Jul. 2008)
<<http://blog.pucp.edu.pe/item/14081>>
- Guillen, Felipe. “Colombia Asegura Venta de Energía”. Diario El Universo. 26 Ago. 2006. (Jul. 2008).
<<http://www.eluniverso.com/2006/08/25/0001/9/280C67212C824E5D855087FCB4CFE97F.aspx>>
- Herrera, Marceliano. “Seguridad Industrial”. Oct. 2006: 3. Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Industriales. (Jul. 2008).
<<http://www.seguridadindustrial.org/presen/presentacionespdf/seguridadindustrial.rar>>
- Hillier, Frederick y Gerald Lieberman. Investigación de Operaciones. 7ma ed. México: McGraw-Hill, 2001.
- Historiales del País Vientos. Tabla. Quito, Corporación para la Investigación Energética. 2008.
- Loria, Jimer. “Método para la Distancia Euclideana”. Ago. 2007: 2-6. Instituto Tecnológico Superior de Calkini. (Jul. 2008).
<<http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r5096.DOC>>
- Maldonado, Raúl. Entrevista Personal. 7 Abr. 2008.
- Mapas: Manta, Portoviejo y Santo Domingo. Mapas. Quito: Instituto Geográfico Militar, 1988
- Martínez, F. Javier y José Moreno. “Optimización por Enjambre para la p-Mediana Continua y Discreta”. Estudio Comparativo de Diferentes Estrategias Metaheurísticas. Feb. 2007: 2-3. Universidad de La Laguna. (May. 2008).
<<http://webpages.ull.es/users/jamoreno/www/talks/MAEB07PSO.pdf>>
- Maynard, Harold. Industrial Engineering Handbook. 5ta ed. New York: McGraw-Hill, 2001.
- “Mayor Consumo de Energía es por Despilfarro”. Diario El Mercurio Cuenca. 5 Ene. 2007. (Jul. 2008).
<http://www.elmercurio.com.ec/web/titulares.php?seccion=xJoURMC&codigo=8cZwYfOiw5&nuevo_mes=01&nuevo_ano=2007&dias=05¬icias=2007-01-05>
- Merino, Luís. “Energías Renovables”. Energías Renovables para Todos. 19 Nov. 2006. Fundación de Energía de la Comunidad de Madrid. (Jul. 2007).
<http://www.energias-renovables.com/Productos/pdf/cuaderno_GENERAL.pdf>
- Montgomery, Douglas y George Runger. Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería. México, McGraw – Hill, 1996.

- Mosquera, Pepa. “Energía Eólica”. Energías Renovables para Todos. 18 Nov. 2006. Ed. Fundación de Energía de la Comunidad de Madrid. (Jul. 2008).
<http://www.energias-renovables.com/Productos/pdf/cuaderno_EOLICA.pdf>
- Narasimhan, Sim, Dennis McLeavy y Meter Billington. Planeación de la Producción y Control de Inventarios. 2da. ed. México: Prentice Hall Hispanoamericana, 1996.
- Nelson, Charles. Applied Time Series Analysis for Managerial Forecasting. San Francisco: Holden – Day, 1973.
- “Nuevos Proyectos de Generación”. Electrificación. Ministerio de Minas y Petróleos. República del Ecuador. (Jul. 2008).
<<http://www.menergia.gov.ec/secciones/electrificacion/dereeprojectogeneracion.html>>
- Parrini, Leonardo. “Advierten Posibles Apagones en Noviembre y Diciembre”. Radio Sensación 800. 27 Ago. 2007. (Jul. 2008).
<<http://www.sensacion800.com/seccion.asp?id=400>>
- Pesantes, Jimmy. Entrevista Personal. 18 Ene. 2008.
- “Proyectan Generar Energía en los Próximos Diez Años”. El Diario. 27 Oct. 2007. (Jul. 2008).
<<http://www.eldiario.com.ec/noticias-manabi-ecuador/57568>>
- “Proyecto de Gas Arenillas”. Termopichincha S.A. (Jul. 2008).
<<http://www.termopichincha.com.ec/contenidos.php?menu=30&submenu1=54&submenu2=24&idiom=1>>
- “Proyecto Eólico de 50 MW”. Oct. 2002: 6. Comisión Federal de Electricidad. (Mar. 2008).
<<http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/2181/1/images/cferct.pdf>>
- “Proyecto Eólico Minas de Huascachaca”. Corporación para la Investigación Energética. (Jul. 2008)
<<http://www.energia.org.ec/eolico.html>>
- Puntos de Control. Instituto Geográfico Militar. (Jul. 2008).
<<http://www.igm.gov.ec/cms/puntosc/forms/pcordenadas.php>>
- “Resumen Ejecutivo del Proyecto Eólico de Loja”. Proyecto Eólico VILLONACO Wind Power. Ene. 2006. Consejo Provincial de Loja. (Jul. 2008)
<<http://www.hcpl.gov.ec/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=71>>
- “Resumen Informativo del Proyecto Eólico Membrillo”. Proyecto Eólico MEMBRILLO 45 MW. Ene. 2006. Consejo Provincial de Loja. (Jul. 2008)
<<http://www.hcpl.gov.ec/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=72>>

Sánchez, Santiago. Energías Renovables: Conceptos y Aplicaciones. Quito: AH/Editorial, 2004.

Tompkins, James, et al. Planeación de Instalaciones. 3ra ed. México: Thomson, 2006.

“US, China & Spain Lead World Wind Power Market in 2007”. The European Wind Energy Association. 15 Feb. 2008. (Jul. 2008).

<[http://www.ewea.org/index.php?id=60&no_cache=1&tx_ttnews\[tt_news\]=1290&tx_ttnews\[back.Pid\]=1&cHash=4a7863e9a9](http://www.ewea.org/index.php?id=60&no_cache=1&tx_ttnews[tt_news]=1290&tx_ttnews[back.Pid]=1&cHash=4a7863e9a9)>

Vaneskahian, Alfredo. “Layout”. May. 2005: 3. Universidad de la República. (Jul. 2008).

<<http://www.ccee.edu.uy/ensenian/catadprod/material/layout2005.pdf>>

Velocidad Media del Viento. Mapa. Quito: Corporación para la Investigación Energética. 2005.

Villagrán, Héctor. “¿Se podrá Dar Luz a Emelmanabí?” El Nuevo Empresario. 1 May. 2006. (Abr. 2008).

<<http://www.elnuevoempresario.com/noticiasleer.php?id=67>>

Villegas, Juan. “Algoritmos Evolutivos para la Solución de Problemas de Localización Multi-objetivo sin Restricciones de Capacidad”. Abr. 2005: 1. Escuela Latinoamericana de Verano en Investigación de Operaciones. (Jul. 2008).

<http://elavio2005.uniandes.edu.co/ResumenesParticipantes/Martes/VillegasJuan_R.pdf>

ANEXOS

Anexo A. Información Adicional sobre Proyectos Eólicos Ecuatorianos

Anexo A.1. Proyecto Eólico San Cristóbal

El Proyecto Eólico San Cristóbal es el primero que levanta una planta de energía eólica en el Ecuador. El proyecto sustituye un 70% de la generación termoeléctrica de las Islas Galápagos por una generación proveniente de fuentes renovables. Para ello, están actualmente en funcionamiento tres turbinas de viento de gran capacidad. Ambientalmente, el proyecto disminuye la dependencia de las Islas en el diesel importado, y los riesgos asociados al transporte de combustibles, ante su frágil ecología (“Acerca del Proyecto” par. 1).

El aporte del Proyecto San Cristóbal no solo se basa en la conservación de la biodiversidad de las Islas, sino que marca un hito en la utilización de energías renovables en la región. A nivel global, reduce las emisiones de gases del efecto invernadero y a nivel local fortalece las capacidades locales en el manejo de nuevas tecnologías limpias. En el Ecuador, promueve la introducción de energías renovables en el país, siguiendo el concepto de Desarrollo Sustentable (“Electrificación” par. 1).

Anexo A.2. Proyecto Eólico Villonaco

El Proyecto Eólico Villonaco se localiza al filo de la cumbre del cerro Villonaco, en las inmediaciones de la ciudad de Loja. El proyecto se puso en marcha en el año 2007 a través de la empresa Villonaco Wind Power, creada por la unión de las empresas Enerloja S.A. (Ecuador), una empresa pionera en el desarrollo de energías alternativas en el Ecuador, y la empresa canadiense Protocol Energy Inc. (“Resumen Ejecutivo” 1, 2006)

Las mediciones efectuadas en el sitio conocido como “Huayrapungo” o “Puerta del Viento” indican que existen vientos adecuados y constantes. La velocidad media del recurso eólico está entre 10.5 y 11 m/s, lo que permite la instalación de 14 aerogeneradores, distribuidos en una fila de 2900 m de largo. Cada turbina de viento tendrá 60 m de altura y tres aspas de 31 – 35 m de largo. Por su parte, el Parque Eólico Villonaco tendrá una potencia nominal de 15 MW, en tanto que la energía eléctrica generada por el Parque Eólico será despachada al Sistema Nacional Interconectado, a través de la Subestación Loja.

Anexo A.3. Proyecto Eólico Membrillo

El Proyecto Eólico Membrillo se encuentra ubicado a 18 Km. de la ciudad de Loja, en el cerro del mismo nombre, ubicado a una altura de 2.600 msnm. Este proyecto tiene como promotor principal a Enerloja S.A., empresa que contribuye con el desarrollo de las energías renovables. Al determinar la existencia del recurso eólico, ha decidido adoptar nuevas tecnologías limpias para la generación de energía.

Las mediciones del potencial eólico iniciaron en marzo del 2003, obteniendo un promedio anual de viento de 9,1 m/s. Se realizaron monitoreos con tres torres de medición, dos de 40 m de altura y una de 70 m, en sitios distintos del cerro Membrillo. De acuerdo a las estimaciones realizadas, es posible de instalar 45 MW de potencia. Actualmente, para continuar con la realización del estudio de factibilidad, es necesario obtener un financiamiento de USD 380.000.00, aproximadamente (“Resumen Informativo” 1, 2006)

Anexo A.4. Proyecto Minas de Huascachaca

Se ha identificado a la zona de Minas de Huascachaca, como una de las que posee un potencial eólico para instalar un parque de generación de energías renovables. El proyecto se encuentra ubicado a 84 Km. al sureste de la ciudad de Cuenca, entre las provincias de Azuay y Loja, en una zona árida, con escasa vegetación. En dicho sitio, se han instalado tres torres de medición de velocidad y dirección de viento, en lugares diferentes Una de 26 m de altura con anemómetros colocados a 15 y 26 m en el sitio de Minas de Huascachaca, una segunda torre similar a la anterior en el camino hacia Yúlug y finalmente una torre de 40 m. en el sitio denominado Uchuca y con anemómetros a 20, 30 y 40 m. Cada una de las torres tiene una veleta ubicada en su extremo superior (“Proyecto Minas” par. 3).

Anexo B. Teoría sobre los aerogeneradores

Anexo B.1. Componentes

Un aerogenerador posee tres componentes principales: un *rotor* que convierte la fuerza del viento en energía rotatoria del eje, una *caja de engranajes* que aumenta la velocidad y un *generador* que transforma la energía del eje en energía eléctrica (Escudero 123, 2004). Además, esta máquina es soportada en una torre, que tiene una altura de 40 a 60 metros para un aerogenerador de gran capacidad.

El rotor está compuesto por *hélices* o *palas*, que giran debido al viento y transmiten su potencia hacia el *buje*. A través de un eje, se conecta el buje a un *multiplicador*. Este último tiene un *sistema de engranajes* conectado a un *eje del alternador*, que gira a alta velocidad. Finalmente, ese alternador permite el funcionamiento de un *generador eléctrico*, que convierte la energía mecánica en eléctrica. En la Figura 17, se indican los principales componentes de un aerogenerador, de acuerdo al modelo NEG Micon Multi Power 48 (Mosquera 3, 2006).

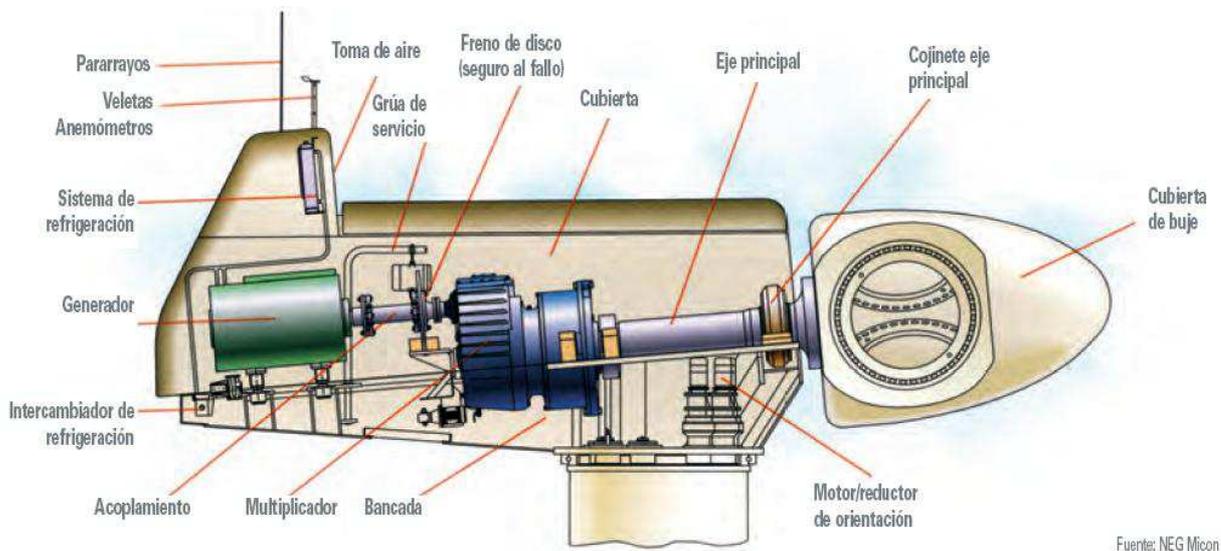


Figura 17. Componentes de un aerogenerador.

Además, un aerogenerador posee un *anemómetro* y una *veleta*, que miden la velocidad y la dirección del viento, respectivamente, en cada instante. Estos equipos mandan señales a los *sistemas de control* que accionan los equipos de orientación del aerogenerador, el cual se ubicará en posición óptima contra el viento. Además, los aerogeneradores cuentan con *sistemas de freno*, que protegen las máquinas cuando los vientos son demasiado fuertes.

Anexo B.2. Clasificación

Según el eje de trabajo, existen 2 tipos: eje horizontal y eje vertical. En el primer caso, los ejes principales están paralelos al suelo, mientras que en el segundo, están perpendiculares. Los aerogeneradores de eje horizontal son más eficientes porque experimentan fuerzas que se compensan mejor entre ellas, tienen mayor par de arranque y son más estables al orientarse.

Según el número de palas, existen rotores de dos palas en adelante. Cabe mencionar que un aerogenerador no obtendrá más potencia a mayor número de palas, porque el eje girará más lento debido a la turbulencia ocasionada entre palas.

Anexo B.3. Parámetros

La Figura 18 presenta los parámetros principales de los aerogeneradores, junto con una breve descripción de los mismos (“Proyecto Eólico 50 MW” 6, 2002):

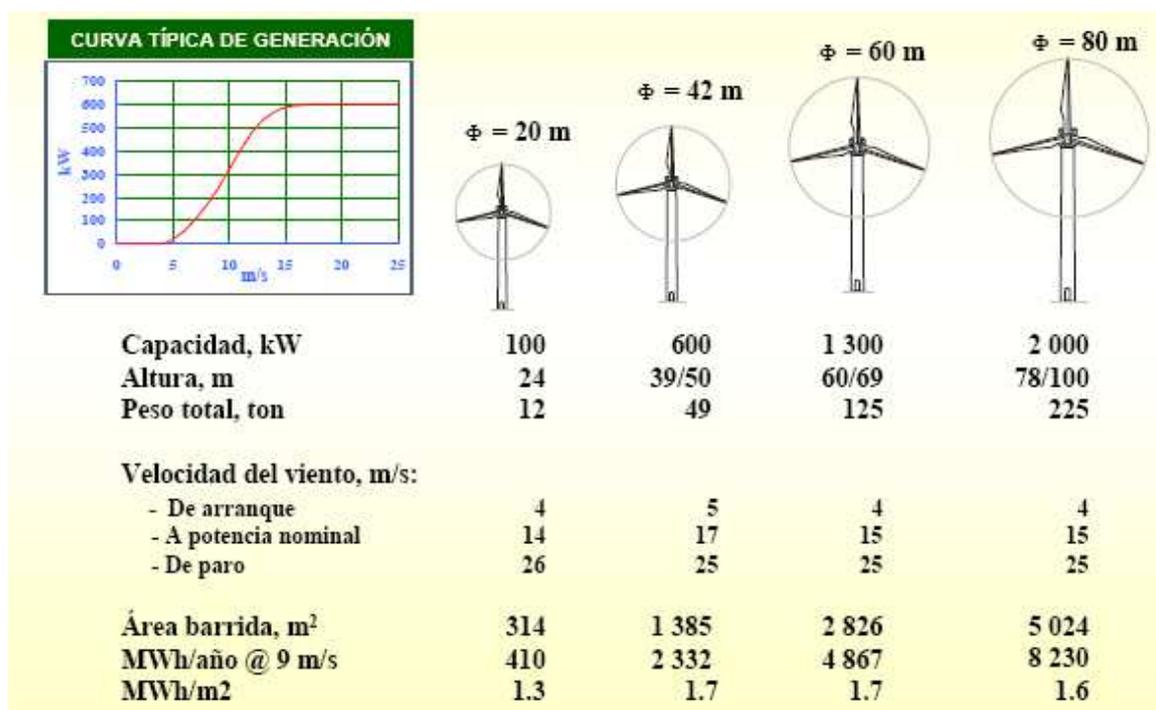


Figura 18. Parámetros de los Aerogeneradores.

- Curva de potencia Indica la potencia de salida dada la velocidad del viento.
- Diámetro de rotor Equivale a dos veces el tamaño de una de sus hélices.
- Capacidad Cantidad de energía a producir, usualmente en *kilowatts*.
- Altura de instalación Altura en metros donde se ubica el eje del rotor

- Velocidad del viento (Arranque): Velocidad mínima de *conexión o arranque* en la cual el aerogenerador comienza a funcionar
- Vel. viento nominal Velocidad para alcanzar la potencia nominal aerogenerador.
- Vel. Viento paro Velocidad de *corte o desconexión* (cut-out) en la cual el equipo se frena y se corta la producción eléctrica. A esta velocidad, el aerogenerador deja pasar el viento y evita así daños.

Anexo B.4. Potencia generada

A continuación, se indica el procedimiento utilizado para calcular la potencia producida por un aerogenerador, aplicando varias fórmulas físicas (Escudero 127, 2004).

Se inicia con la fórmula de la energía cinética del viento, la cual está representada por:

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \quad (I)$$

- m: masa del aire (en kg.)
- v: velocidad del viento (en m/s)

Por su parte, la masa de una cantidad de aire se representa de la siguiente manera:

$$m = \Phi * V \quad (II)$$

- Φ : densidad del aire (1.25 kg/m³)
- V: volumen del cilindro de barrido

Además, el volumen de este cilindro es:

$$V = A * L \quad (III)$$

- A: superficie barrida (en m²)
- L: longitud del cilindro

La longitud lineal que recorre el viento es:

$$L = v * t \quad (IV)$$

- v: velocidad del viento (en m/s)
- t: tiempo (en s)

Utilizando (II), (III) y (IV), y sustituyendo en (I), se obtiene lo siguiente:

$$E = \frac{1}{2} * \Phi * A * v^3 * t \quad (V)$$

Además, para calcular la potencia del viento se utiliza la siguiente fórmula:

$$P = E / t \quad (\text{VI})$$

Utilizando (V) y sustituyendo en (VI), resulta en la siguiente ecuación:

$$P = \frac{1}{2} * \Phi * A * v^3 \quad (\text{VII})$$

Por otra parte, el área barrida transversalmente por el viento está determinada por:

$$A = \pi * D^2 / 4 \quad (\text{VIII})$$

- D: diámetro (en m)

Al sustituir (VIII) en (VII), resulta en la ecuación de la potencia teórica del viento:

$$P = \pi / 8 * \Phi * D^2 * v^3 \quad (\text{IX})$$

La potencia teórica producida por un aerogenerador depende principalmente de la superficie barrida por la hélice y de su longitud. Sin embargo, la potencia teórica sufre una serie de pérdidas (Escudero 128, 2004):

- Teorema de Betz 41% Por el viento que deja escapar el aerogenerador.
- Pérdidas mecánicas 6% Por componentes mecánicos móviles
- Pérdidas eléctricas 11% Por efectos de calor

Por medio de (IX), se obtiene la fórmula de la potencia real que se extrae del viento a través de un aerogenerador, la cual depende del diámetro y de la velocidad del viento:

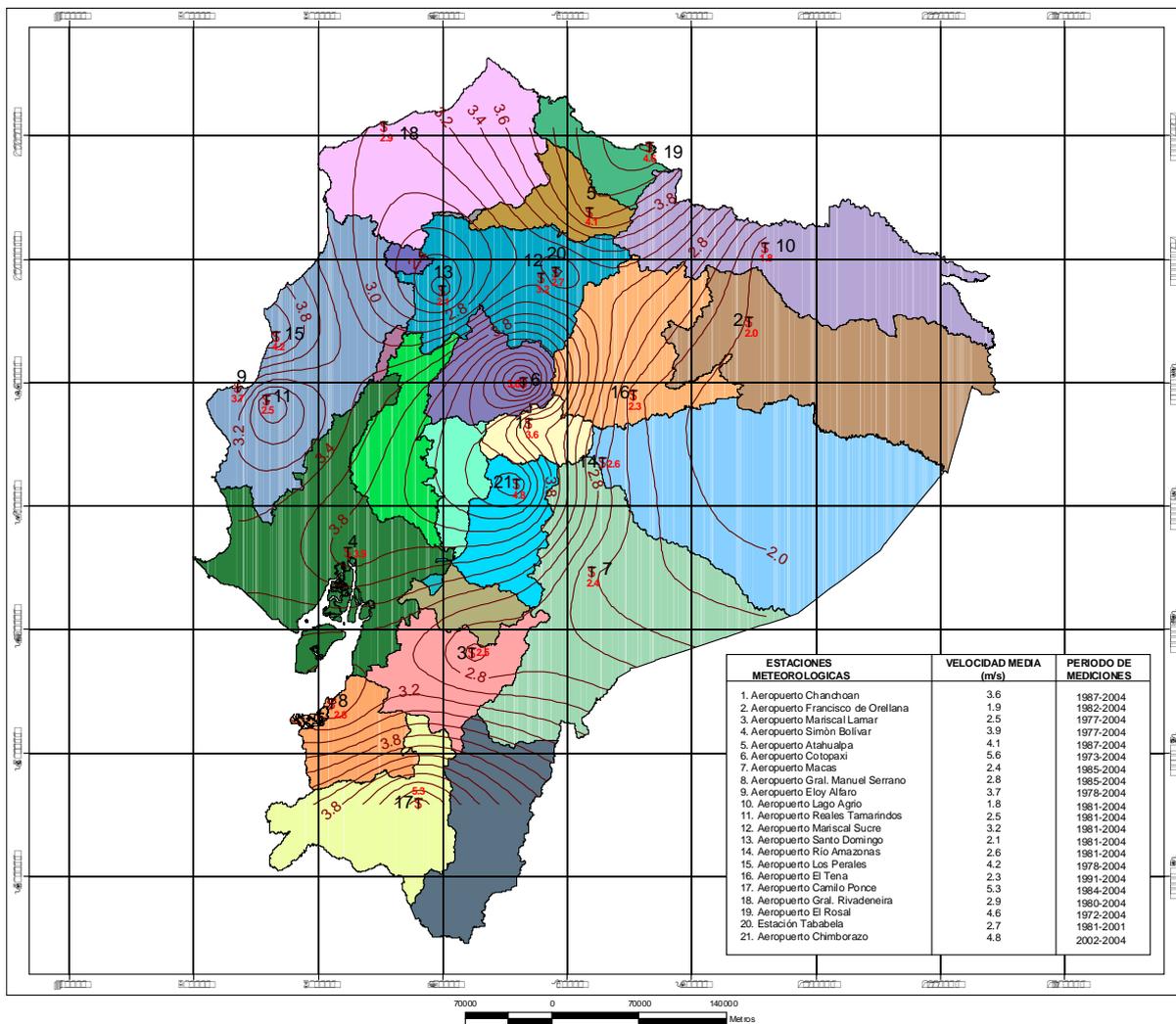
$$P = C_p * \rho / 2 * \pi * D^2 / 4 * V^3 \quad (\text{X})$$

- C_p : coeficiente de potencia
- ρ : densidad del aire
- D: diámetro de las hélices (en m)
- V: velocidad del viento (en m/s)

El valor del coeficiente de potencia varía en función de la calidad y diseño del aerogenerador, considerando que un aerogenerador de alta capacidad tiene un coeficiente de potencia de 0.25. Entonces, al disponer de los datos de la velocidad media de una zona, se aplica la fórmula de cálculo de potencia para estimar la producción de un aerogenerador.

Anexo C. Mapa Eólico del Ecuador

La Figura 19 presenta una representación gráfica de las curvas de nivel sobre las velocidades de viento en el Ecuador (“Velocidad”, 2005)



CORPORACIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN ENERGÉTICA

VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO

Contiene: Velocidad Media del Viento (m/s) Julio	Realizado por: Corporación para la Investigación Energética
Escala de la Información: 1:250.000 Escala de Visualización: 3' 250.000	Sistema de Coordenadas y Proyección: PSAD 56 Zona 17 Sur

Información Proporcionada por la Dirección de Aviación Civil
 Metodo de Interpolación: Kriging
 Diciembre del 2005

SIMBOLOGIA

1 \$	Estaciones Meteorológicas
2.3	Velocidad Media (valor en Estación) en m/s
3.8	Velocidad del Viento (m/s)

Figura 19. Mapa Eólico del Ecuador

Anexo D. Resolución del Modelo Matemático

Tabla 28. Datos Iniciales del Problema de Localización.

i	a_i	b_i	w_i	i	a_i	b_i	w_i
1	-79,99	-0,77	3,2	11	-80,36	-0,67	4,9
2	-80,05	0,08	1,3	12	-80,62	-1,15	3,7
3	-79,78	-0,45	2,1	13	-80,35	-1,41	1,4
4	-80,15	-0,87	3,3	14	-80,53	-1,49	2,6
5	-80,07	-0,94	1,7	15	-80,30	-1,33	0,5
6	-80,11	-1,03	1,2	16	-80,38	-1,02	1,8
7	-80,36	-1,71	1,9	17	-80,34	-0,65	6,2
8	-80,18	-0,22	4,7	18	-80,12	-1,53	0,5
9	-80,69	-1,05	5,5	19	-80,79	-1,73	2,2
10	-80,39	-1,16	1,5				
sum $w_i a_i$				x0 -80,33			
sum $w_i b_i$				y0 -0,90			
sum w_i				50			

Tabla 29. Resultados de las Iteraciones del Problema de Localización.

Iteración 0		Iteración 1		Iteración 2		Iteración 3		Iteración 4	
x0	-80,34	X1	-80,33	x2	-80,33	x3	-80,32	x4	-80,32
y0	-0,90	Y1	-0,88	y2	-0,87	y3	-0,86	y4	-0,86
g1	8,6	g1	8,9	g1	9,1	g1	9,2	g1	9,3
g2	1,3								
g3	2,9	g3	3,0	g3	3,0	g3	3,1	g3	3,1
g4	17,1	g4	17,8	g4	18,3	g4	18,6	g4	18,7
g5	6,0	g5	6,1	g5	6,1	g5	6,1	g5	6,1
g6	4,7	g6	4,6	g6	4,6	g6	4,5	g6	4,5
g7	2,3	g7	2,2	g7	2,2	g7	2,2	g7	2,2
g8	6,7	g8	6,8	g8	7,0	g8	7,1	g8	7,1
g9	14,4	g9	13,9	g9	13,6	g9	13,4	g9	13,3
g10	5,6	g10	5,2	g10	5,0	g10	4,9	g10	4,8
g11	20,7	g11	22,3	g11	23,5	g11	24,4	g11	25,0
g12	9,9	g12	9,5	g12	9,2	g12	9,0	g12	8,9
g13	2,7	g13	2,6	g13	2,6	g13	2,5	g13	2,5
g14	4,2	g14	4,1	g14	4,0	g14	3,9	g14	3,9
g15	1,1	g15	1,0	g15	1,0	g15	1,0	g15	1,0
g16	14,1	g16	12,2	g16	11,3	g16	10,7	g16	10,4
g17	24,8	g17	26,7	g17	28,2	g17	29,2	g17	29,9
g18	0,8	g18	0,7	g18	0,7	g18	0,7	g18	0,7
g19	2,3	g19	2,3	g19	2,3	g19	2,2	g19	2,2
sum gi	150,0	sum gi	151,4	Sum gi	152,8	sum gi	154,0	sum gi	154,8

Tabla 29. Resultados de las Iteraciones del Problema de Localización (Continuación)

Iteración 5		Iteración 6		Iteración 7		Iteración 8		Iteración 9	
x5	-80,32	x6	-80,32	x7	-80,319	x8	-80,319	x9	-80,319
y5	-0,85	y6	-0,85	y7	-0,850	y8	-0,849	y9	-0,848
g1	9,3	g1	9,4	g1	9,4	g1	9,4	g1	9,4
g2	1,3	g2	1,3	g2	1,3	g2	1,3	g2	1,3
g3	3,1	g3	3,1	g3	3,1	g3	3,1	g3	3,1
g4	18,8	g4	18,8	g4	18,9	g4	18,9	g4	18,9
g5	6,1	g5	6,1	g5	6,1	g5	6,1	g5	6,1
g6	4,5	g6	4,4	g6	4,4	g6	4,4	g6	4,4
g7	2,2	g7	2,1	g7	2,1	g7	2,1	g7	2,1
g8	7,2	g8	7,2	g8	7,2	g8	7,2	g8	7,2
g9	13,2	g9	13,2	g9	13,1	g9	13,1	g9	13,1
g10	4,7	G10	4,7	g10	4,7	g10	4,7	g10	4,7
g11	25,4	G11	25,6	g11	25,8	g11	25,9	g11	26,0
g12	8,8	G12	8,8	g12	8,8	g12	8,8	g12	8,8
g13	2,5	G13	2,5	g13	2,5	g13	2,5	g13	2,5
g14	3,9	G14	3,9	g14	3,9	g14	3,9	g14	3,9
g15	1,0	G15	0,9	g15	0,9	g15	0,9	g15	0,9
g16	10,2	G16	10,0	g16	10,0	g16	9,9	g16	9,9
g17	30,4	G17	30,7	g17	30,9	g17	31,0	g17	31,1
g18	0,7	G18	0,7	g18	0,7	g18	0,7	g18	0,7
g19	2,2	G19	2,2	g19	2,2	g19	2,2	g19	2,2
Sum gi	155,4	Sum gi	155,8	sum gi	156,1	sum gi	156,2	sum gi	156,3

Tabla 29. Resultados de las Iteraciones del Problema de Localización (Continuación)

Iteración 10		Iteración 11		Iteración 12		Iteración 13		Iteración 14	
x10	-80,319	x11	-80,319	x12	-80,319	x13	-80,319	x14	-80,319
y10	-0,848	y11	-0,848	y12	-0,848	y13	-0,847	y14	-0,847
g1	9,4								
g2	1,3								
g3	3,1								
g4	18,9								
g5	6,1								
g6	4,4								
g7	2,1								
g8	7,2								
g9	13,1								
g10	4,7								
g11	26,1								
g12	8,7								
g13	2,5								
g14	3,9								
g15	0,9								
g16	9,9	G16	9,8	g16	9,8	g16	9,8	g16	9,8
g17	31,2	G17	31,2	g17	31,2	g17	31,3	g17	31,3
g18	0,7								
g19	2,2								
sum gi	156,4	sum gi	156,4	sum gi	156,5	sum gi	156,5	sum gi	156,5

Anexo E. Estudio de Vientos realizado en el Aeropuerto Los Perales

Anexo E.1. Medición de Velocidades de Vientos

Tabla 30. Historial de Velocidades de Vientos, Aeropuerto “Los Perales”

REGISTRO HISTORICO DE LA VELOCIDAD MAXIMA DEL VIENTO EN m/s														
AEROPUERTO 'LOS PERALES'														
SAN VICENTE														
LATITUD 00° 34.1' S LONGITUD 80° 24.1' W ELEVACION 3m														
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Prom	Max
1980	10,3	12,4	8,2	10,3	10,3	11,3	12,4	11,3	12,4	11,3	11,3	11,3	11,1	12,4
1981	10,8	10,8	11,3	10,8	10,8	11,8	12,4	11,8	12,4	11,8	11,3	12,9	11,6	12,9
1982	11,3	9,3	14,4	11,3	11,3	12,4	12,4	12,4	12,9	12,4	11,3	15,4	12,2	15,4
1983	11,3	11,3	10,3	10,3	15,4	14,4	14,4	10,3	11,3	10,3	10,3	10,3	11,7	15,4
1984	10,3	10,3	10,3	9,3	10,3	11,3	10,3	11,3	10,3	11,3	10,3	12,4	10,6	12,4
1985	8,2	9,3	10,3	9,3	10,3	7,2	8,2	7,2	7,7	8,2	9,3	9,3	8,7	10,3
1986	9,3	7,2	8,2	7,2	9,3	9,3	9,3	10,3	10,3	10,3	8,2	7,7	8,9	10,3
1987	7,2	7,2	8,2	6,2	6,2	7,2	6,2	8,2	10,3	7,2	6,2	6,2	7,2	10,3
1988	7,2	6,2	6,2	6,2	6,2	7,2	7,2	6,2	6,2	6,2	7,2	6,2	6,5	7,2
1989	8,8	6,2	7,2	6,2	6,2	6,2	7,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,6	8,8
1990	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	7,2	6,2	6,2	7,2	6,2	6,3	7,2
1991	6,2	6,2	6,2	7,2	7,2	7,2	6,2	6,2	7,2	6,2	6,2	7,2	6,6	7,2
1992	5,1	6,2	7,7	7,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,3	7,7
1993	6,2	8,2	6,2	6,2	6,2	6,2	7,2	7,2	6,2	6,2	7,2	7,2	6,7	8,2
1994	6,2	6,2	6,2	6,2	7,2	7,2	7,2	6,2	7,2	7,2	7,2	6,2	6,7	7,2
1995	6,2	6,2	6,2	6,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	6,9	7,2
1996	6,2	6,2	6,2	6,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,7	6,2	7,2	8,2	6,9	8,2
1997	6,2	6,2	7,2	6,2	7,2	7,2	6,2	7,2	7,7	6,2	8,2	8,2	7,0	8,2
1998	10,3	10,3	8,2	7,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	7,2	7,2	10,3
1999	7,2	8,2	8,2	6,2	6,2	6,2	5,7	6,2	6,2	6,2	6,7	6,2	6,6	8,2
2000	7,2	6,2	7,2	6,7	7,2	6,2	7,2	7,2	7,2	7,7	6,2	6,7	6,9	7,7
2001	8,2	6,2	10,3	8,2	5,7	6,7	7,2	7,2	9,3	9,3	7,2	6,2	7,6	10,3
2002	5,1	7,2	7,2	6,7	6,2	6,2	6,2	8,2	8,8	7,2	7,2	6,2	6,9	8,8
2003	6,2	10,3	8,2	7,2	7,2	7,7	7,2	7,2	7,7	8,8	9,3	8,2	7,9	10,3
2004	8,2	7,2	6,7	7,2	6,2	6,2	7,2	8,2	9,3	7,7	9,3	8,2	7,6	9,3
Prom	7,8	7,9	8,1	7,5	7,8	7,9	8,0	8,0	8,4	8,0	8,0	8,1	8,0	9,7
Máx	11,3	12,4	14,4	11,3	15,4	14,4	14,4	12,4	12,9	12,4	11,3	15,4	12,2	15,4

Anexo E.2. Medición de Direcciones de Vientos

Tabla 31. Historial de Direcciones de Vientos, Aeropuerto “Los Perales”

REGISTRO HISTORICO DE LA DIRECCION PREDOMINANTE DEL VIENTO EN RUMBOS AEROPUERTO " LOS PERALES " SAN VICENTE													
	LATITUD 00° 34.1' S				LONGITUD 80° 24.1' W				ELEVACION 3m				
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PRD
1978	W	W	WNW	W	W	W	W	W	WW	W	W	W	W
1979	W	WNW	WNW	WNW	W	W	W	W	W	W	W	W	W
1980	W	WNW	W	WNW	W	W	W	W	W	W	W	W	W
1981	WNW	NNW	NNW	NNW	W	WNW	WNW	W	W	W	W	W	W
1982	WNW	WNW	WNW	WNW	WNW	WNW	WNW	WNW	WNW	WNW	WNW	WNW	WNW
1983	NW	NW	WNW	WNW	NNW	W	NNW	WNW	W	WNW	WNW	WNW	NNW
1984	WNW	NW	WNW	WNW	WNW	WNW	WNW	WNW	W	W	W	WNW	WNW
1985	WNW	WNW	WNW	WNW	WNW	WNW	W	WNW	WNW	WNW	WNW	WNW	WNW
1986	WNW	WNW	WNW	N	WNW	WNW	WNW	WNW	W	W	W	W	WNW
1987	W	NW	NW	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W
1988	W	W	WNW	W	W	W	W	W	W	W	W	WNW	W
1989	WNW	WNW	WNW	WNW	W	W	W	W	W	W	W	W	W
1990	WNW	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W
1991	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W
1992	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W
1993	W	WNW	W	W	WNW	W	W	W	W	W	W	W	W
1994	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W
1995	WNW	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W
1996	W	W	W	W	W	W	W	WNW	W	W	W	W	W
1997	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	WSW	W	W
1998	WNW	W	W	W	W	WSW	WSW	WSW	WSW	WSW	WSW	WSW	WSW
1999	W	W	W	W	W	WSW	WSW	W	W	WSW	W	W	W
2000	W	W	W	W	W	W	WSW	WSW	WSW	WSW	W	W	W
2001	W	W	W	W	WNW	W	W	W	W	W	W	W	W
2002	W	W	W	W	W	W	WSW	W	E	W	W	W	W
2003	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W
2004	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W
PRD	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W

* PRD = Predominante

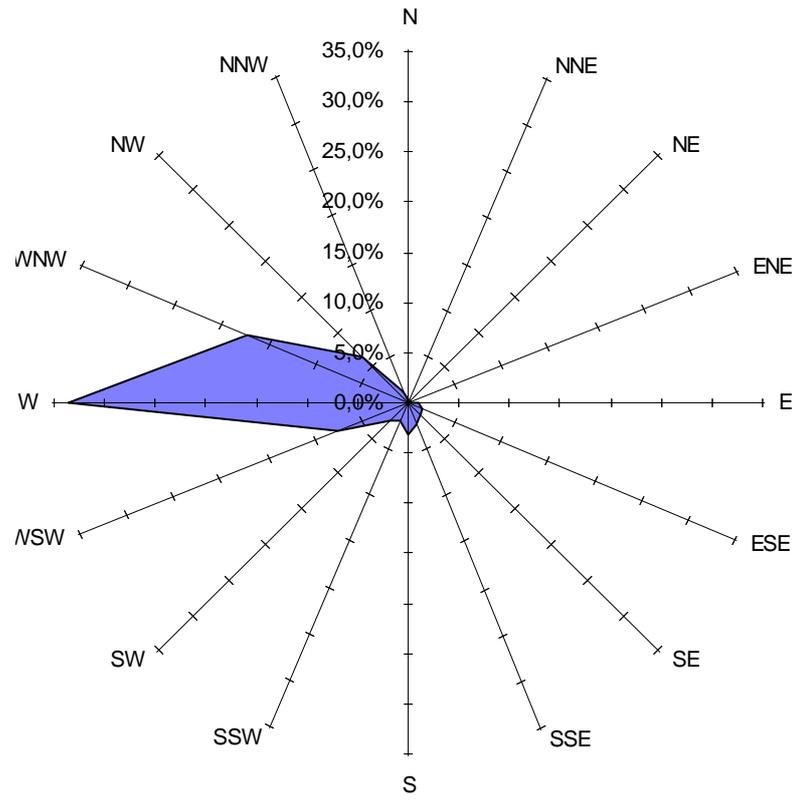
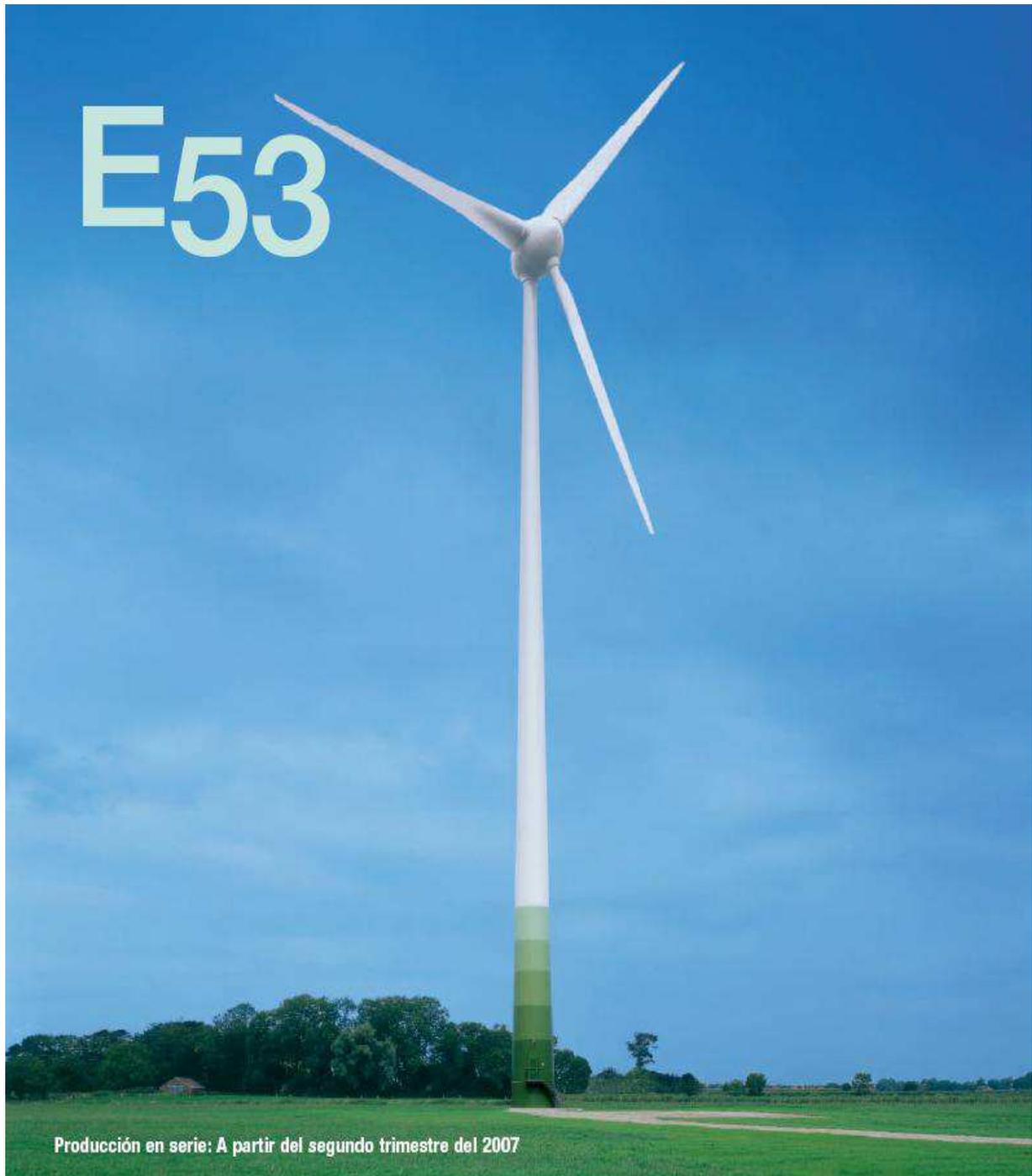


Figura 20. Representación de Direcciones en Rosa de Vientos.

Anexo F. Características del Aerogenerador ENERCON Modelo E-53



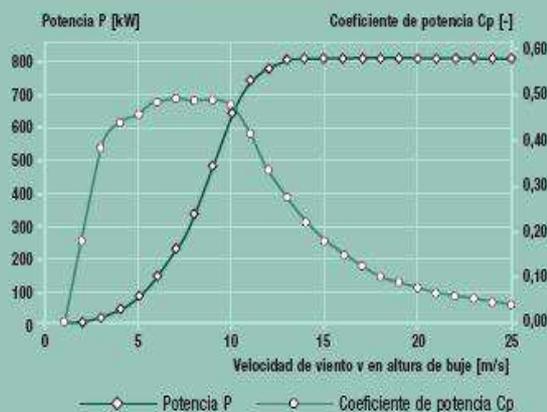
El aerogenerador ENERCON E-53, desarrollado para emplazamientos con velocidades de viento medias, garantiza los mejores valores de producción gracias a un mayor diámetro de rotor y un concepto de pala de rotor eficiente.

Figura 21. Aerogenerador Enercon modelo E-53

Tabla 32. Información Técnica sobre el Aerogenerador Enercon E-53

DATOS TÉCNICOS

Potencia nominal:	800 kW
Diámetro del rotor:	52,9 m
Altura de buje:	73 m
Clase de viento (IEC):	IEC/NVN S ($V_{in} = 7,5$ m/s, $V_{cut} = 57$ m/s)
Concepto de aerogenerador:	Sin multiplicadora, velocidad variable, sistema de control del ángulo de paso (Pitch)
Rotor	
Tipo:	Rotor a barlovento con control del ángulo de paso activo
Sentido de rotación:	Agujas del reloj
Número de palas:	3
Área barrida:	2.198 m ²
Composición de las palas:	Resina epoxy reforzada con fibra de vidrio y protección contra rayos integrada
Velocidad:	Variable, 12–29 rpm
Control del ángulo de paso (Pitch):	Un sistema independiente de control del ángulo de paso en cada una de las palas ENERCON con suministro de energía de emergencia
Generador con sistema de transmisión	
Buje:	Rigido
Rodamiento principal:	Rodamiento con una hilera de rodillos cónicos
Generador:	Generador síncrono en anilla ENERCON con acoplamiento directo
Sistema de conexión a red:	Convertidor ENERCON
Sistemas de frenado:	- 3 sistemas independientes con con- trol del ángulo de paso con suministro de energía de emergencia - Freno mecánico de rotor - Bloqueo de rotor
Control de orientación:	Activo mediante motores de orienta- ción, amortiguamiento en función de cargas
Velocidad de corte:	28–34 m/s (con control de ráfagas ENERCON)
Sistema de control remoto:	ENERCON SCADA

CURVA DE POTENCIA CALCULADA

Viento [m/s]	Potencia P [kW]	Coeficiente de potencia Cp [-]
1	0,0	0,00
2	2,0	0,19
3	14,0	0,39
4	38,0	0,44
5	77,0	0,46
6	141,0	0,48
7	228,0	0,49
8	336,0	0,49
9	480,0	0,49
10	645,0	0,48
11	744,0	0,42
12	780,0	0,34
13	810,0	0,27
14	810,0	0,22
15	810,0	0,18
16	810,0	0,15
17	810,0	0,12
18	810,0	0,10
19	810,0	0,09
20	810,0	0,08
21	810,0	0,06
22	810,0	0,06
23	810,0	0,05
24	810,0	0,04
25	810,0	0,04

$\rho = 1,225$ kg/m³

Anexo G. Información sobre la Empresa Eléctrica Manabí

La Empresa Eléctrica Manabí, E.E. Manabí, sirve eléctricamente a toda la Provincia de Manabí a excepción de los Cantones de El Carmen y Pichincha. En el año 2006, la cobertura del servicio eléctrico sirve a 203.000 clientes del territorio manabita, quienes ocupan una extensión aproximada de 16.800 Km². La demanda de E.E. Manabí se registra en un total de 172 MW por hora de carga máxima (Villagrán par. 1. 2006).

La misión de la E.E. Manabí es la compra, distribución y comercialización de la energía eléctrica en su provincia, en condiciones de confiabilidad, continuidad y calidad de servicio, de tal forma que sea la organización más importante para el desarrollo socioeconómico de sus Clientes y de su región. La visión de la E.E. Manabí es convertirse al año 2.010 en una empresa modelo del sector eléctrico ecuatoriano con los menores costos optimizados del VAD (Valor Agregado de Distribución) y que sirva a la mayoría de los habitantes de su provincia.

Actualmente, la E.E. Manabí cuenta con la central Térmica Miraflores, que suministra energía eléctrica a las siguientes ciudades: Manta, Portoviejo, Jipijapa, Chone, Bahía y Rocafuerte. Inicialmente, se puso en funcionamiento con 4 equipos de 3.400 KW de potencia cada uno. En la actualidad, la Central Térmica tiene el aporte de otros equipos que se han ido incorporando, que trabajan para horas pico y permiten mejorar las condiciones de voltaje.

El sistema eléctrico de Manabí distribuye la energía a través de la subestación *Cuatro Esquinas* (propiedad de TRANSELECTRIC S.A.), localizada a pocos kilómetros de Portoviejo. Se abastece de la Central “Marcel Laniado” del Proyecto Hidroeléctrico Daule Peripa y de la S/E Quevedo del *Sistema Nacional Interconectado*, que proporciona energía tanto a la ciudad de Quevedo como a la provincia de Manabí.

Para ser un proveedor de la empresa la E.E. Manabí S.A., a continuación se presentan los requisitos indispensables (“Aspectos Técnicos” 1, 2008):

Personas Naturales y Personas Jurídicas

- Solicitud de inscripción dirigida al Presidente Ejecutivo de la E.E. Manabí S.A.
- Curriculum Vitae.
- Ficha de “Identificación de Proveedores” (Formulario otorgado por la Dirección Financiera de la E.E. Manabí)

- Certificado expedido por la Contraloría General del estado, en el que conste no encontrarse registrado como contratista incumplido ni adjudicatario fallido.
- Registro Único de Contribuyentes actualizado.
- Carta de exclusividad o representación de firmas Nacionales o extranjeras, en caso de tenerlas.
- Listado y Catalogo de Bienes y servicios que puedan proveer
- Domicilio civil, número de teléfono y/o fax actualizado, correo electrónico.
- Otros documentos que estime conveniente presentarlos.

Personas Naturales

- Referencias Bancarias y/o Instituciones Financieras
- Estado de Situación Financiera legalizado por un Contador.
- Fotocopia de la cédula de ciudadanía y papeleta de votación.
- Certificado de afiliación a la Cámara de la Producción y/o Colegio Profesional, si fuera el caso.
- Permiso de Importación, de ser el caso.

Personas Jurídicas

- Estatutos de Constitución de la Compañía y sus reformas si las hubiere.
- Nombramiento del representante Legal con la aceptación e inscrito en el Registro Mercantil o el poder conferido a un mandatario en el Ecuador vigente, debidamente certificado.
- Certificado de la Superintendencia de Compañías, que acredite el cumplimiento de las obligaciones y de hallarse en vigencia.
- Matricula de la Cámara a la que perteneciera.
- Los Estados de situación Financiera y de Resultados del último ejercicio fiscal legalizados por el Contador y Oferente o el Representante legal, según el caso.
- Declaración del Impuesto a la Renta del año anterior.
- Certificado de no adeudar al municipio en donde tiene su domicilio legal.
- Certificado del IESS de estar al día en el pago de las obligaciones patronales y/o no mantener deudas en dicha Institución.