



REPUBLICA DE CUBA
FACULTAD DE METALURGIA ELECTREOMECÁNICA
ESPECIALIDAD ELÉCTRICA

TRABAJO DE DIPLOMA

EN OPCION AL TITULO DE INGENIERA ELECTRICA

Título: Propuesta de aerogenerador a partir de la evaluación Eolo-energética de playa Herradura, al norte de Las Tunas.

Autor (a): Danelis Hechavarria Melo.

Tutor: Msc. Ing. Eduardo Terrero Matos.

Moa, 2014

“AÑO 55 DE LA REVOLUCIÓN”

DECLARATORIA DE AUTORIDAD.

Yo: Dianelis Hechavarría Melo.

Autor(a) de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez” el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Dianelis Hechavarría Melo. (Diplomante)

Ing.Msc.Eduardo Terrero Matos. (Tutor)

Pensamiento:

Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.

Albert Einstein.

Dedicatoria:

A mi madre, y a todas esas personas especiales en mi vida que de una forma u otra me brindaron ánimo y contribuyeron con su empeño para llegar al final de este camino.

Agradecimientos:

A mi mamá por la confianza y el apoyo brindado.

A l compañero Miguel Casi Céspedes por ayudarme incondicionalmente.

A mis amigos(as) que me apoyaron en los momentos más difíciles y me dieron la fuerza necesaria para llegar a la meta.

A los compañeros de la Empresa Eléctrica de Menéndez que hicieron posible este trabajo.

Resumen:

Este trabajo, titulado: Propuesta de aerogenerador a partir de la evaluación eoloenergética de playa Herradura, al norte de Las Tunas, está compuesto por; Introducción, Tres Capítulos, Conclusiones, Recomendaciones, Bibliografía y Anexos.

En el primer capítulo, se tienen en cuenta trabajos precedentes realizados sobre el tema abordado. Además, contiene el marco teórico-conceptual de la investigación, el que tiene como objetivo: establecer las bases para el desarrollo del estudio que se realiza.

En el segundo capítulo partiendo de un análisis de la data de velocidad y dirección del viento de la estación anemométrica ubicada en el sitio la Herradura en el municipio Jesús Menéndez se realiza el procesamiento mediante herramientas informáticas. Se proponen y desarrollan los métodos para estimar el potencial eólico de la zona de estudio.

En el tercer capítulo se valora el impacto del parque en el medio ambiente, así como la viabilidad económica de la propuesta. Son analizados los resultados permitiendo la selección del aerogenerador teniendo en cuenta la viabilidad económica de la propuesta a través del Período de Recuperación.

Summary

This work, entitled: Proposal of wind turbine beginning with the evaluation of the energetic wind of beach Herradura, to the north of Las Tunas is composed for; Introduction, Three chapters, Conclusions, Recommendations, Bibliography and Annexed.

In the first chapter, the keep in mind to him preceding works carried out on the topic. Moreover, it contains the theoretical-conceptual frame of the investigation, the one which has as objective; establish the bases for the development of the study that are carried out.

In chapter two leaving of an analysis of speed and direction dates of wind of anemometric station located in the place Herradura in Jesus Menendez municipality it carried out the prosecution by means of computer tools. It proffers and develops the methods to estimate the wind-energetic potential of the study area.

In the third chapter the impact of the park in the environment is valued, as well as the economic viability of the proposal. The results are analyzed allowing the selection of the turbine wind keeping in mind the economic viability of the proposal through the Period of Recovery.

INDICE

INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1 INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO.....	4
1.2 CONCEPTOS BÁSICOS.....	5
1.3 TRABAJOS PRECEDENTES.....	6
1.4 INFLUENCIA DE LOS PARQUES EÓLICOS EN LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA.....	15
1.5 BREVE RESEÑA DE CÓMO SE PROYECTA UN PARQUE EÓLICO.....	9
1.6 CARACTERIZACIÓN DE LA ENERGÍA EÓLICA EN EL MUNDO.....	10
1.7 CARACTERIZACIÓN DE LA ENERGÍA EÓLICA EN CUBA.....	12
1.7 EL AEROGENERADOR Y SUS PARTES CONSTRUCTIVAS.....	7
CONCLUSIONES.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
CAPITULO 2. MATERIALES Y METODOS.....	17
2.1 INTRODUCCIÓN.....	17
2.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA.....	17
2.3 ANÁLISIS DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO.....	17
2.4 ESTIMACIÓN DE POTENCIAL.....	21
2.4.1 Rosa de los vientos y de frecuencia.....	22
2.4.3 Distribución de weibull.....	26
2.4.4 Parámetros a calcular.....	28
2.5 REDES ELÉCTRICAS Y CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA.....	36
2.5.1 Capacidad de generación instalada (base, pico, reserva rodante, reserva fría).....	37
2.5.2 Capacidad de transmisión de la infraestructura existente e inversiones necesarias para la extracción de la energía producida por el parque eólico.....	38
2.6 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO:.....	39
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	40
3.1 INTRODUCCIÓN.....	40
3.2 VALORACIÓN ECONÓMICA:.....	40
3.2 RESULTADOS OBTENIDOS DE LA PROPUESTA DE AEROGENERADOR.....	41
INGRESOS POR VENTA DE ELECTRICIDAD.....	42
3.2.1 Especificaciones sobre el Golwind 1,5 MW.....	44
3.2.2 Palas del rotor.....	46
3.2.3 Cubo fundido.....	46
3.2.4 Sistema de Regulación y Cambio de las palas (Pitch).....	46
3.2.5 PMDD generador.....	48
3.2.6 Rotor de generador.....	49

3.2.7 Estator de generador	50
3.2.8 Sistema de orientación.....	50
3.2.9 Torre.....	50
3.2.10 Convertidor.	51
3.4.1 Impacto del parque sobre la sociedad y el medio ambiente.....	53
CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO:	58
CONCLUSIONES GENERALES:	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
RECOMENDACIONES.....	60
BIBLIOGRAFÍA:	61
ANEXOS:	63

INTRODUCCIÓN GENERAL.

Las energías renovables son aquellas fuentes que de forma periódicas se ponen a disposición del hombre, y que este es capaz de aprovechar y transformar en energía útil para satisfacer sus necesidades. Se renueva de forma continua a diferencia de los combustibles fósiles como el Petróleo, Carbón, Gas y Uranio, de los cuales existen disponibilidades que pueden agotarse en un plazo más o menos largo.

Cuantiosos recursos e investigaciones se invierten para buscar alternativas a los combustibles fósiles. Las fuentes renovables de energía limpia y la búsqueda y desarrollo de fuentes no convencionales de energía, ha sido el tema central de diversas convenciones y cumbres con mira a proteger el medio ambiente y así contrarrestar los impactos climáticos producidos por la emanación a la atmósfera de productos químicos y sustancias que destruyen la capa de ozono, la vegetación y alteran el clima, además se suma a esto la subida de los costos de los combustibles fósiles y su posible agotamiento en un futuro no muy lejano.

En la búsqueda de la sustitución de fuentes no convencionales de energía y la elevación de la eficiencia energética con el fin de lograr un ahorro de los portadores energéticos derivados de los combustibles fósiles, se comienza a considerar a la energía eólica como una solución para el futuro. Dentro de las posibilidades energéticas y medioambientales de las distintas energías renovables, esta, por su carácter inagotable, permite un gran desarrollo como recurso endógeno en aquellas áreas que cuentan con un potencial necesario para su aplicación.

Todos los países están provistos de viento. El aprovechamiento del límite de la energía eólica prácticamente no existe ya que la misma depende de la investigación, el ingenio y la organización. Lo importante en este caso es la voluntad de aprovecharla. El estudio de este recurso es de mucha importancia, no solo por su

disponibilidad, sino por su impacto positivo que de ello se derivan, al incidir de manera favorable hacia el medio ambiente.

El aprovechamiento de la Energía eólica, se realiza mediante el empleo de molinos de viento y aeroturbinas (aerogeneradores), que pueden ser de diversos tamaños y potencias. Cuando se instalan colectivamente, se conocen con la denominación de ``Parque Eólico``.

La localización e instalación de los parques eólicos obedece a un estudio previo y detallado de las características del régimen de vientos en los sitios, y de estudios de pre-factibilidad para evaluar la producción por unidad de tiempo, la rentabilidad y el tiempo de explotación de dicha instalación. Asimismo, las características físico-geográficas son determinantes en la decisión de su ubicación ya que del emplazamiento puntual de cada aerogenerador depende su eficiencia y por tanto la de todo el parque eólico.

Para este trabajo se plantea el siguiente:

Problema:

Necesidad de la integración de diferentes métodos de evaluación del potencial Eoloenergético de playa Herradura, al norte de Las Tunas.

Hipótesis:

Si se integran varios métodos para procesar los datos de velocidad y dirección del viento a partir de los ciclos diarios y anuales entonces se puede determinar el potencial eoloenergético de playa Herradura, al norte de Las Tunas y el aerogenerador para el sitio.

Objetivo:

Propuesta de aerogenerador a partir de la evaluación del potencial eoloenergético de playa Herradura, al norte de Las Tunas.

Objeto de estudio:

El potencial eólico de playa Herradura, al norte de Las Tunas.

Campo de acción:

Utilización de fuentes renovables de energía.

Sistema de Tareas

- Búsqueda bibliográfica.
- Revisión de los datos.
- Procesamiento estadístico de la información.
- Completamiento de los datos.
- Modelación vertical-temporal de la velocidad del viento en el punto
- Determinar del modelo estático (distribución de frecuencias de las velocidades y rosa de viento del punto prospectado).
- Selección del tipo de aerogenerador a utilizar.
- Valoración económica.
- Determinación del VAN y el TIR.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.

1.1 Introducción al capítulo.

En este capítulo se desarrolla la base teórico–metodológica con vista al desarrollo de este trabajo, para lograr su objetivo general a partir del problema planteado, donde se demuestra la necesidad de realizar tal estudio con la perspectiva de obtención de resultados positivos para su implementación. Se realiza una breve síntesis de los principales fabricantes de aerogeneradores y las partes constructivas de estos.

1.2 Métodos de investigación.

Para comenzar, desarrollar y concluir con éxito cualquier investigación se hace necesario utilizar diferentes métodos, algunos de los métodos que se emplearon son los siguientes:

- ❖ Inductivo-Deductivo, para realizar el examen y evaluación de los hechos que son objetos de estudio, partiendo de un conocimiento general de los mismos, que permitan una mejor aproximación a la realidad que los originó, y luego, mediante un proceso de síntesis, emitir una opinión profesional. Todo esto exigió la utilización de una serie de pasos realizados en forma sistemática, ordenada y lógica, que permitieron luego emitir una crítica objetiva del hecho.
- ❖ Histórico-Lógico, para desarrollar el análisis de las investigaciones anteriores y antecedentes que permitan continuar el estudio.
- ❖ Análisis-Síntesis, para lograr la descomposición de las funciones de control e información y su concreción.
- ❖ Modelación para evaluar el comportamiento del sistema en estudio, con una gran precisión y sin la necesidad de realizar inversiones.

1.3 Conceptos básicos.

La **eoloenergética** es el campo de la energética, dedicada a la investigación y utilización práctica del recurso eólico.

La **prospección eólica** es el arte de buscar sitios o zonas con puntos factibles para el suministro de información útil para el aprovechamiento del recurso eólico. La prospección debe estar precedida de una cuidadosa exploración integral, ya que el comportamiento del viento depende de múltiples factores. Por ejemplo, las características físicas geográficas regionales influyen en gran medida en la intensificación local del régimen de vientos.

Los **mapas eólicos** se conciben para determinar a grandes rasgos cuál es la distribución geográfica y la magnitud del potencial eólico de un país o región.

Racha o ráfaga se denomina a un brusco incremento en la velocidad del viento, de breve duración, generalmente unos pocos segundos.

El viento es una sucesión de rachas, asociadas con cambios de dirección igualmente rápidos, que pueden llegar a los 30°.

La velocidad media del viento en un período de tiempo es la media de muchas rachas y calmas. Su uso en la Meteorología tiene el objetivo de disminuir los efectos del movimiento desordenado del aire.

La **energía eólica** es la energía cinética que se extrae del aire en movimiento y es técnicamente aprovechable.

El **aerogenerador** es una máquina que convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica.

Parque eólico es la instalación de un conjunto de aerogeneradores eólicos capaces de facilitar energía a las redes de suministro eléctrico. En consecuencia se resuelven problemas como la baja potencia de los aerogeneradores individuales, además de suavizarse y compensarse las interrupciones provocadas por turbulencias y

fluctuaciones locales en la velocidad del viento, de reducir los gastos de mantenimiento y simplifica los requisitos de interconexión de potencia.

1.4 Trabajos precedentes.

- ❖ 10 Preguntas y Respuestas sobre Energía Eólica [Colectivo de autores, 2008]. En el mismo se responden 10 preguntas en términos generales y abarcadores sobre la energía eólica y se exponen gran cantidad de anexos para una mejor comprensión del mismo. Se establece una metodología para el cálculo de potenciales Eolo-energéticos, la selección y disposición de las máquinas, así como la determinación del costo de inversión y el efecto medioambiental de la tecnología.
- ❖ Con ayuda del mapa eólico de Cuba recientemente concluido y del mapa de evidencias ecológicas, resultado del trabajo de especialistas que recopilaron e interpretaron un gran número de evidencias geológicas y ecológicas del viento, se han elegido varias decenas de sitios promisorios para la instalación de parques eólicos, según consulta 20-Feb-2013, disponible en <http://www.CubaSolar.cu/biblioteca/energia/Energia37/HTML/articulo03.htm>, describe los lugares donde se están instalando torres anemométricas de hasta 100 m de altura para caracterizar en detalle el potencial eólico de tales sitios, con vistas a la ubicación definitiva de parques eólicos en un futuro no lejano.
- ❖ Diseño y cálculo de un aerogenerador para las condiciones eolográficas de la región de Punta Lucrecia [Macías, 2005]. El trabajo estuvo dirigido al cálculo de un aerogenerador para la zona de Punta Lucrecia pero no se propone una tecnología para la construcción de este. Además no se profundizó sobre la influencia de la energía eólica en el mundo. No se calculó el potencial eólico de la zona por no constituir objetivo del trabajo.
- ❖ Estudio de la influencia de la generación eólica sobre la red eléctrica local [Guerra 2005]. En este trabajo se estudia la influencia de un sistema eólico en funcionamiento conjuntamente con la red pero se describe muy brevemente

las partes y componentes de un aerogenerador así como no explica con profundidad como calculó el potencial eólico de la zona y aborda poco sobre la influencia de dicha energía en el mundo.

- ❖ Estudio del comportamiento del subsistema Holguín-Gibara con inyección de energía eólica con régimen estacionario [Betancourt, 2008]. En el material se exponen los resultados del funcionamiento del parque eólico Gibara 1 conjuntamente con la red durante todo un año. No se describe con profundidad las partes de un aerogenerador y así como de la influencia de esta energía en el país.
- ❖ Estudio del comportamiento de un sistema híbrido aerogenerador–generador diesel [Batista, 2008]. En el trabajo se expone el estudio del comportamiento de un sistema híbrido aerogenerador-generador diesel pero no se describe de forma general el aerogenerador y sus partes.

1.5 El aerogenerador y sus partes constructivas.

En el mundo existen varios productores de aerogeneradores entre los que se destacan los siguientes: Fuhrländer, Gamesa, Enercon, Ecotécnia, Vergnet, Goldwind, Bonus, Vestas, Nordex, Nordic e Inclin. Cada uno de los fabricantes diseña modelos en dependencia de la potencia que se desea generar y bajo las condiciones de trabajo que este tendrá, pero de forma general la estructura de la mayoría de ellos es la misma independientemente de cada fabricante:

- ❖ La góndola o carcasa que protege las partes fundamentales del aerogenerador. La constituye la cubierta y la bancada, esta última es la plataforma que se une con la torre donde se apoyan todos los componentes del aerogenerador. La cubierta se fabrica mayormente de vidrio reforzada con poliéster y se diseñan con compuertas de acceso a los elementos exteriores y con facilidad de maniobrar en el interior.

- ❖ Las palas del rotor que transmiten la potencia del viento hacia el buje. Estas conforman una parte importante del aerogenerador de su conformación depende la duración de la vida útil, el buen funcionamiento y el rendimiento de la máquina. Las mismas pueden fabricarse de materiales como la madera y el metal y dentro de este último la encontramos en aleaciones de silicio con magnesio o aluminio moldeado e hilado, además de materiales sintéticos, resinas y fibras.
- ❖ El buje que es la parte que une las palas del rotor con el eje de baja velocidad.
- ❖ Eje de baja velocidad que conecta el buje del rotor al multiplicador. Su velocidad de giro es muy lenta.
- ❖ El multiplicador, permite que el eje de alta velocidad gire mucho más rápido que el eje de baja velocidad. Se pueden encontrar tres tipos de multiplicadores, el multiplicador de engranajes que es el más sencillo puede presentar uno o varios ejes de ruedas cilíndricas, es el más económico pero es difícil conseguir con estas relaciones de multiplicación elevadas. El reductor de acoplamiento cónico nos permite disponer de un eje de salida perpendicular a la entrada, con dientes helicoidales se obtiene un mejor rendimiento y una disminución del ruido. Además del empleo de trenes planetarios que permite obtener multiplicaciones elevadas en espacios reducidos, este presenta una construcción compacta y ligera.
- ❖ Eje de alta velocidad, gira a gran velocidad y permite el funcionamiento del generador eléctrico.
- ❖ El generador eléctrico que es una de las partes más importantes de un aerogenerador. Aquí es donde se pone de manifiesto la ley de conservación de la energía pues es donde ocurre la transformación de la energía mecánica del movimiento del rotor en energía eléctrica a la salida de los bornes del estator.
- ❖ El rotor parte importante dentro del generador. Estos pueden tener dos tipos de diseño, horizontal y vertical siendo el primero el más utilizado.

- ❖ El controlador electrónico, es un ordenador que monitoriza las condiciones del viento y controla el mecanismo de orientación.
- ❖ La unidad de refrigeración, mecanismo que sirve para enfriar el generador eléctrico.
- ❖ La torre que es la parte del aerogenerador que soporta la góndola y el rotor.
- ❖ El mecanismo de orientación, está activado por el controlador electrónico, la orientación del aerogenerador cambia según las condiciones del viento.

1.6 Breve reseña de cómo se proyecta un parque eólico.

La proyección de un parque eólico parte con la configuración del parque, que depende en gran medida de la orografía del terreno, de las condiciones del viento y del tipo de máquina y su tamaño.

Fases fundamentales.

1. Fase de identificación: Supone la existencia de un viento favorable, ausencia de incompatibilidad ambiental y urbanística, ausencia de restricciones en cuanto a infraestructura eléctrica, ausencia de restricciones en cuanto a obra civil, entre otros. Esta fase supone un trabajo de gabinete no asociado a altos costos.
2. Fase de medición: que comienza con la elección de un punto o puntos adecuados para las mediciones del viento. Las mediciones deben llevarse a cabo durante al menos un año ininterrumpidamente.
3. Evaluación del recurso eólico: Cuando se cuenta con mediciones de al menos un año en un emplazamiento, se está en condiciones de hacer una valoración del recurso eólico. Para ello se utilizan modelos que representan el campo de vientos a diferentes alturas en un área de estudio a partir de los datos recogidos en uno o varios puntos.
4. Ingeniería y proyectos: A partir de la evaluación del recurso, se está en condiciones de definir la instalación en términos de cantidad y ubicación de los

aerogeneradores, tipo de los mismos y alturas más adecuadas de los ejes. Además se podrá estimar la producción de cada uno de ellos.

5. Estudio de impacto ambiental: Esencial en el mundo de hoy, donde se ha comprendido la importancia de preservar el medio ambiente todo lo posible. Tales estudios, iniciados desde el primer momento, se toman en cuenta en todas las fases del proyecto.
6. Autorizaciones y licencias, según la legislación vigente, y teniendo en cuenta todas las instituciones interesadas.
7. Construcción del parque.
8. Explotación: Consta de las actividades de operación y mantenimiento, en sucesión permanente.

Después de realizado el proyecto y antes de proceder a su construcción, se debe realizar un análisis de factibilidad técnico-económica con los siguientes aspectos:

- ❖ Relacionados con el recurso eólico: Velocidad media anual, distribución de frecuencias del viento, la medición de la velocidad.
- ❖ Relacionados con la turbina: Número y tipo de aerogeneradores, altura de las torres, configuración del parque, entre otros.
- ❖ Del emplazamiento: Accesos, infraestructura necesaria, distancia de interconexión a la red eléctrica, requisitos de interconexión, como niveles de tensión y calidad de la señal eléctrica.
- ❖ Medioambientales: Restricciones en zonas sensibles que limitan el aprovechamiento del recurso, medidas correctoras y compensadoras.
- ❖ De la explotación: Fiabilidad y disponibilidad técnica y energética de los equipos, operación y mantenimiento de los mismos, entre otros.

1.7 Caracterización de la energía eólica en el mundo.

10

Propuesta de aerogenerador a partir de la evaluación eoloenergética de playa Herradura, Las Tunas.

Autor(a): Dianelis Hechavarria Melo.

El viento se está mostrando como un recurso energético seguro y económico en las instalaciones situadas principalmente en Europa, los EE.UU. la India y China. Los avances tecnológicos de los últimos cinco años han colocado a la energía eólica en posición de competir, en un futuro próximo, con las tecnologías de generación de energía convencionales. El costo de producción de electricidad por la acción del viento en Europa ha disminuido en los últimos 15 años aproximadamente en un 80%, de 0,5 € a menos de 0,1 € por kWh. En algunos casos incluso se han indicado costos de hasta 0,06 € por kW. En comparación, el costo de producción actual de las plantas nucleares y de combustible fósil en Europa oscila entre 0.04 y 0,08 € por kW lo que demuestra la eficiencia de esta energía. Estas reducciones de costo tan importantes se han conseguido gracias al desarrollo de turbinas eólicas más seguras, más eficientes y más baratas, en combinación con la producción de turbinas más grandes y con una expansión del mercado.

Durante los últimos diez años el precio de las turbinas eólicas ha disminuido en un 5% cada año, mientras que al mismo tiempo el rendimiento ha aumentado en un 30%. Las últimas investigaciones sobre turbinas eólicas se concentran en su mayor parte en la Aero acústica, Aero elástica y aerodinámica, en el desarrollo de alabes flexibles, mástil y suspensión flexibles, y en la aplicación de materiales más ligeros. Una innovación importante es la implantación de sistemas de velocidad variable y generadores de accionamiento directo, lo que disminuye el número de piezas de la máquina, elimina la caja de cambio (tradicionalmente una parte vulnerable de la turbina) y aumenta el rendimiento de la misma. Aplicando estos y otros desarrollos se espera que, en los próximos diez años, el costo de la energía producida por las turbinas eólicas consiga igualar el valor más bajo que el obtenido por las plantas de energía convencionales. Hoy en día existen turbinas capaces de generar con vientos a partir de 2.5 m/s y como prospecciones futuras compañías grandes productoras como Gamesa planean para el año 2015 producir turbinas con potencia nominal 7 MW.

1.8 Caracterización de la energía eólica en Cuba.

Con el propósito de solucionar los problemas existentes con la generación y distribución de electricidad nuestro Comandante en Jefe compartió con un grupo de cercanos colaboradores la urgencia de acometer profundas transformaciones en el sector energético cubano, con el fin de garantizar la seguridad del abastecimiento con nuevos conceptos, una mayor soberanía y una consecuente compatibilidad con el medio ambiente.

Ahí fue donde nació el concepto de Revolución Energética que hoy se profundiza y perfecciona en Cuba, y que se basa además en la convicción de que el desarrollo sostenible no será posible sin el uso racional y el ahorro de todo tipo de recursos, especialmente de las fuentes de energía, y con el empleo masivo y preferente de aquellas que son renovables. Así comenzó a mediados de 2005 la Revolución Energética en Cuba. Uno de sus programas fue el fomento de la generación de electricidad mediante fuentes renovables de energía, especialmente la eólica, como contribución a la política de desarrollo sostenible enarbolada por nuestro país. Para estos efectos se creó el Grupo de Ingeniería Eólica en el Grupo Eólico del Ministerio de la Industria Básica (MINBAS), que se encarga de ejecutar todas las tareas referentes al Programa Eólico, adscrito al Grupo de Trabajo para el Impulso de la Energía Eólica, que dirige el Consejo de Estado y que cohesiona a diversos institutos, empresas, entidades y universidades relacionados con el tema.

Se inició una extensa campaña de prospección eólica que actualmente abarca casi todo el territorio nacional confeccionándose un Mapa de Prospección Eólica nacional, que define preliminarmente las zonas de interés para prospectar el recurso eólico, en función de desplegar parques eólicos, atendiendo tanto a la distribución del potencial energético más ventajoso del viento como a consideraciones de usos del terreno, concentración y perspectivas de crecimiento de los consumos eléctricos, accesibilidad e infraestructuras existentes y por desarrollar, entre otros factores. (ver figura1.1)

Fueron seleccionadas varias zonas promisorias, con una elevada concentración en la costa norte oriental, en las que se instalan de forma estratégica alrededor de un centenar de estaciones de prospección en mástiles de 50 m de altura y estaciones meteorológicas de referencia sobre torres de radiodifusión con más de 50 m.

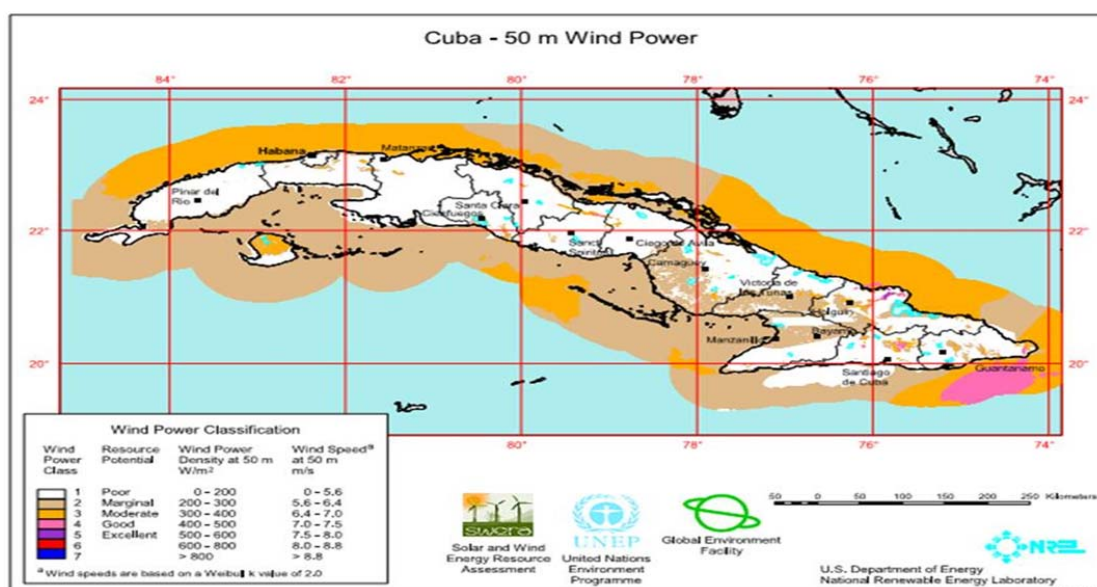


Figura 1.1 Mapa eólico de Cuba. [Diez Preguntas y Respuestas sobre Energía Eólica]

Luego de estos estudios se decidió la contratación de tres pequeños parques eólicos de prueba, orientados a adquirir experiencias directas en la gestión, construcción, montaje, puesta en marcha y operación de varias tecnologías, como punto de partida imprescindible para expandir aceleradamente el conocimiento, y en especial la comprensión de los aspectos tecnológicos principales, de las potencialidades del recurso, y de las mejores prácticas mundiales en la organización y explotación de estos proyectos.

1. Fue inaugurado el 24 de febrero 2007 un parque eólico en la Isla de la Juventud, este está constituido por seis aerogeneradores de 275 kW con capacidad para ser abatidos en menos de una hora lo que resulta una

- alternativa muy atractiva para zonas frecuentemente amenazadas por huracanes, como es la región occidental de Cuba. Este parque aporta algo más de 2,6% de la demanda eléctrica de la Isla de la Juventud.
2. Otro de los parques se construyó en la ciudad de Gibara, en la costa norte de la provincia de Holguín. Este tiene seis unidades de 850 kW montadas a 50 m de altura con una potencia nominal de 5,1 MW.
 3. Más tarde comenzó a funcionar El parque eólico Gibara II a plena capacidad y puede generar 4,5 megavatios con sus seis aerogeneradores, con una potencia de 750 kW.
 4. Además del parque Demostrativo de la Isla de Turiguanó, que funciona desde abril de 1999, con una potencia de 0,45 MW.

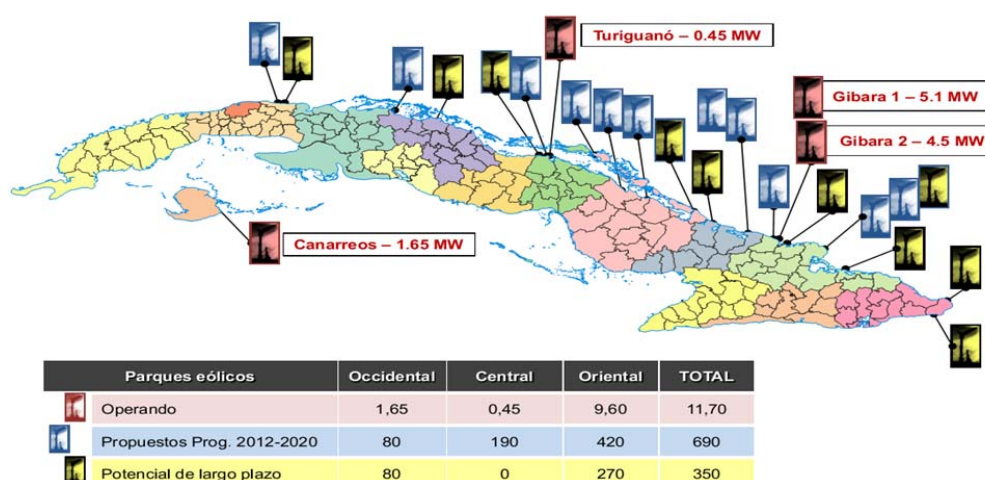


Figura 1.2 Mapa general de perspectivas de desarrollo.

1.9 Influencia de los parques eólicos en la generación distribuida.

La generación distribuida está orientada a resolver los problemas del suministro eléctrico como un instrumento de desarrollo social y económico local. El éxito y fomento de la misma en los momentos actuales radica en la existencia de tecnologías de punta que permiten para potencias pequeñas, generar energía eléctrica en forma eficiente, confiable y de calidad.

Entre las tecnologías más utilizadas dentro de la generación distribuida están los grupos electrógenos y las diferentes fuentes de energía renovables, como la solar y la eólica, por señalar algunas de las más atractivas en los momentos actuales.

Ventajas de este tipo de generación.

- ❖ Mejora la fiabilidad del servicio eléctrico, por la reducción del número de interrupciones y la mejora considerable de la baja tensión en las líneas de distribución.
- ❖ Incrementa la eficiencia del sistema, pues disminuye las pérdidas eléctricas por transmisión y distribución, omitiendo la necesidad de fuertes inversiones para la construcción de extensas redes de distribución.
- ❖ Incrementa el uso de la llamada energía más limpia, pues hay una mayor utilización de fuentes energéticas renovables con la consecuente disminución de las emisiones de CO₂ y demás gases contaminantes a la atmósfera.
- ❖ Flexibiliza la operación del sistema, pues permite el trabajo en condiciones aisladas del sistema, lo cual incrementa la confiabilidad en el suministro de energía eléctrica y una mejor respuesta ante situaciones de desastre tales como huracanes, terremotos, e inundaciones.

1.10 Conclusiones del capítulo.

- ❖ Cuba cuenta con mapa eólico.
- ❖ La capacidad eólica instalada en Cuba es de 11.7 MW.
- ❖ Las experiencias en el campo de la energía eólica en Cuba demuestran su posible generalización.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.

2.1 Introducción.

En el presente capítulo se desarrolla el estudio de los materiales y métodos para la obtención del potencial eólico de playa Herradura, basado en mediciones anemométricas de velocidad y dirección del viento durante todo un año. Además se realiza un breve análisis de las características del esquema eléctrico de interconexión del parque con el S.E.N. Todo esto nos permitirá proponer una futura inversión de un parque eólico en dicha zona.

2.2 Características generales del área.

El área de estudio se encuentra ubicada en la costa Norte de la Provincia Las Tunas, al este de playa Herradura, en una zona aledaña al centro de carga de Guayacán en el municipio de Jesús Menéndez, presentando buen acceso, la vegetación está conformada por pastos de sabana y árboles (ateje americano) no se observan manifestaciones cárnicas ni empantanamientos. La misma se halla a una distancia mínima aproximada de 500m de la línea de costa.

2.3 Mediciones del recurso eólico regional y local.

La figura 2.1 muestra con simbología de bandera roja la estación de prospección eólica en la proximidad del Área de Estudio en La Herradura, instalada en Abril del 2007 y derribada por el huracán Ike en Septiembre del 2008.

La estación automática indicada en la figura 2.1 se instala en un mástil tubular atirantado abatible de 50 m de altura con 8 niveles de arriostres; en el mástil a la altura de 7 m se montaron data loggers AMMONIT de la serie WICOM-32, y en los niveles 10, 30 y 50 m se montaron anemómetros THIES 1st. Class, calibrados según MEASNET, para medir la velocidad del viento; a 48,5 m se montó un sensor de dirección o veleta tipo THIES Compact.



Figura 2 .1 Vista general de la región de Chaparra. Jesús Menéndez.

La estación registra la velocidad y dirección del viento cada un segundo, y almacena estos datos en promedios de 10 minutos en la memoria del logger. Los datos captados son enviados regularmente vía Modem GSM a un servidor central radicado en la UEB Energía Renovable de INEL. La Estación de Herradura, utilizada para el análisis estadístico y la evaluación energética del recurso de energía del viento, fue instalada el 23 de Abril del 2007 y se mantuvo operativa hasta Septiembre de 2008.



Figura 2.2 Instrumentos de medición.

Una estadística de la efectividad de sus datos puede verse en la siguiente tabla:

Tabla 2.1: Estadísticas de efectividad de la Estación de Prospección Herradura. Para 12 meses, desde mayo 2007 hasta abril de 2008.

Parámetros.	Cantidad.
Total de datos posibles de velocidad y dirección del viento.	52704
Total de pares de datos aceptados.	52514
Porcentaje de pares de datos recuperados (%).	99,64

2.4 Análisis de la velocidad del viento.

La región costera norte de Las Tunas se caracteriza por manifestarse un estable y bien organizado régimen local de brisas. Una confirmación de esto puede apreciarse en el patrón diario de la velocidad y dirección del viento registrado por la Estación de Prospección de Playa Herradura, mostrado en la figura 2.3 utilizándose el programa Excel, donde se observa un marcado contraste en los valores de la velocidad entre los períodos diurno y nocturno, resultante de la desigual distribución de la temperatura y la presión entre las superficies marina y terrestre. También muestra durante el período diurno (entre 08:00 y 19:00 horas) un giro del viento del SE al E, por la clara influencia del flujo desde el mar. La velocidad del viento tiene un valor mínimo promedio (5.6 m/s) a las 07:00 h. A partir de las 8:00 h comienza a aumentar por el calentamiento de la tierra y la entrada de aire más denso proveniente del mar alcanzando un máximo de 8,3 m/s a las 15:00 horas, descendiendo de nuevo por la madrugada al enfriarse la tierra, que es la emisora de la brisa nocturna o terral.



Figura 2.3 Patrón diario de velocidad y dirección del viento. Mediciones a 50 m de altura. Período Mayo 2007 - Abril 2008.

La figura 2.4 muestra el patrón anual de velocidad y dirección del viento, donde se pueden apreciar las diferencias en el comportamiento del viento en los dos períodos: lluvioso (mayo-septiembre) o verano, y poco lluvioso (octubre-abril) que corresponde con la temporada invernal cuando se evidencia la influencia del Anticiclón Continental y por ende de los frentes fríos, que refuerzan en esa época del año el patrón local de brisas existente en esta zona, registrándose altas velocidades promedio del viento.



Figura 2.4 Patrón anual de la velocidad y dirección del viento. Mediciones a 50 m de altura. Período de Mayo 2007 - Abril 2008.

En noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo, meses del período poco lluvioso, se registran velocidades promedio mensuales por encima de los 7,5 m/s, cuando el Anticiclón Continental (que impone una circulación de flujo regional) influye sobre nuestro país reforzando el sistema de brisas (circulación local); con el giro de los vientos del N al E a medida que estos sistemas avanzan sobre nuestro país y la favorable orientación de la costa a los vientos del ENE y E, se aprecia en esta época del año vientos predominantes del E-ESE (en la frontera de los cuadrantes I y II).

También se registran altas velocidades en julio (6,6 m/s) y agosto (6,9 m/s), que corresponden al período lluvioso, en tanto que en los meses de transición, aquellos cuando ocurre el cambio de un período a otro, ocurre cierta inestabilidad en el régimen de viento por la adaptación al cambio de la circulación atmosférica, por lo que en junio hay un descenso notable de la velocidad del viento y lo mismo ocurre en septiembre.

2.5 Estimación de potencial.

Para el desarrollo de la energía eólica es necesario el apoyo de herramientas y aplicaciones que permitan obtener los mejores indicadores.

2.5.1 Rosa de los vientos y de frecuencia.

Una Rosa de los vientos o Rosa náutica es un círculo que tiene marcados alrededor los rumbos en que se divide la circunferencia del horizonte .

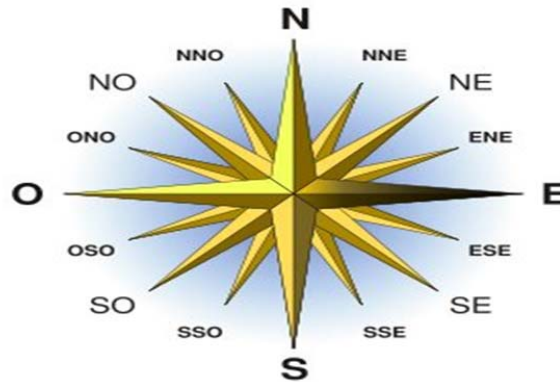


Figura 2.5 Rosa de los vientos de 16 puntos cardinales.

Estas rosas se obtuvieron con el software WindPRO (de la Empresa EMD de Dinamarca), homologado y de amplio uso internacional.

La figura 2.6 representa la intensidad media del viento en diferentes sectores en los que divide el círculo del horizonte.

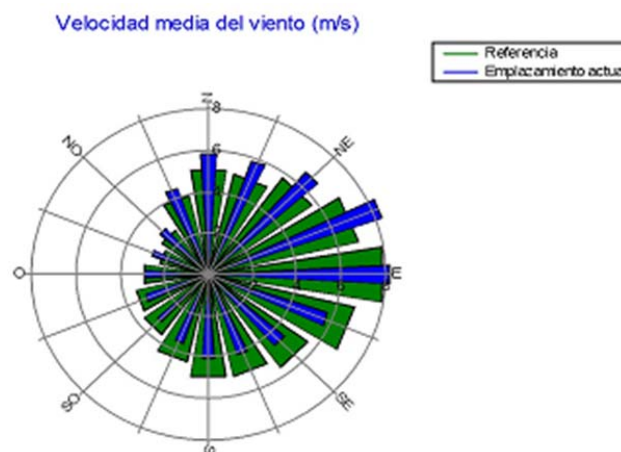


Figura 2.6 Velocidad media del viento.

La figura 2.7 Muestra la rosa de frecuencias del viento en la zona de estudio, apreciándose que el rumbo predominante del viento es del E, con una frecuencia de 37,5 %, y la suma de las frecuencias de los rumbos E y ESE alcanza el valor de 60%.

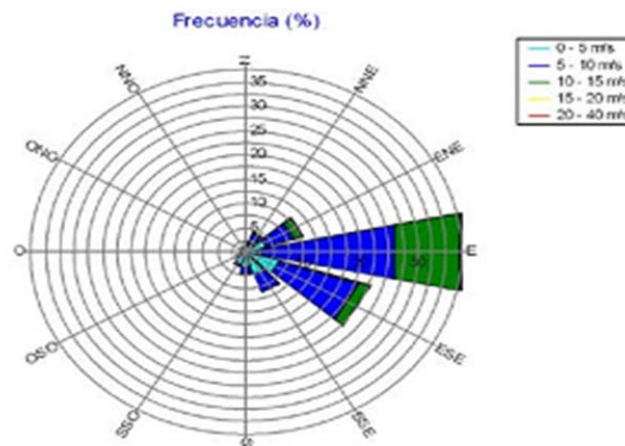


Figura 2.7 Rosa de frecuencias del viento. Mediciones a 50 m de altura. Período de Mayo 2007 - Abril 2008.

En general, la velocidad promedio del viento en La Herradura a lo largo del año es de 6,84 m/s, y en 9 de los 12 meses la velocidad media del viento supera los 6,6 m/s, de modo que la región dispone de 9 meses del año con elevado potencial energético del viento.

2.5.2 Métodos para la estimación de la velocidad.

La velocidad del viento tiende a incrementarse a medida que aumenta la altura sobre el suelo. Esto se debe a que el viento situado a baja altura roza con el terreno, con su vegetación, con los edificios y otros obstáculos, lo cual reduce su velocidad. Por otro lado, el gran diámetro de los rotores de los aerogeneradores potentes modernos, obliga a situar sus ejes de rotación a decenas de metros de altura sobre el suelo. Por tanto, los vientos medidos tradicionalmente a 10 metros de altura no

son los que las palas del rotor de un aerogenerador van a encontrar en la mayor parte de su ciclo de rotación.

En la Figura 2.8 se muestra esquemáticamente cómo varía la velocidad del viento v con la altura respecto al suelo z , en un terreno liso y llano. Obsérvese que en aras del suelo la velocidad del viento es prácticamente nula, y que va aumentando con la altura, relativamente rápido primero y más lentamente después. Si el terreno presenta vegetación, obstáculos naturales u obras civiles, el perfil se hace mucho más complicado, pues tales objetos perturban el flujo del aire, lo cual reduce la velocidad del viento tanto delante como detrás de ellos.

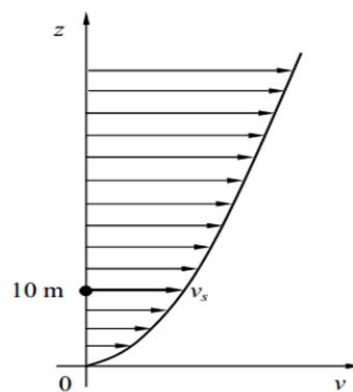


Figura 2.8 Perfil de velocidad del viento, respecto a la altura sobre el suelo z , en un terreno liso y llano.

En primera aproximación, la velocidad del viento a una altura z , medida en metros sobre el suelo, puede estimarse con ayuda de la fórmula siguiente.

2.1

Donde v_s es la velocidad estándar del viento, medida a una altura de 10 metros. Esta fórmula se conoce en el mundo de la energía eólica como **la ley de la potencia séptima**.

Según la ley de la potencia séptima, la velocidad del viento a 50 metros del suelo es 26 % mayor que a 10 metros, en tanto que a 100 metros resulta ser 39 % mayor. Pero estas son estimaciones que solo resultan útiles para los estudios preliminares del potencial eólico. Los estudios detallados del viento, que necesariamente son la primera parte de todo proyecto de parque eólico, requieren de la medición del viento en el sitio evaluado, durante un período de tiempo no menor que un año, al menos a dos alturas: 1/2 y 2/3 de la altura del buje, para luego extrapolar a la altura del buje.

La manera más fácil de calcular el incremento de la velocidad del viento con la altura es el método de **la ley exponencial**. Otra aproximación que se usa comúnmente en Europa es la extrapolación logarítmica. La ecuación de la ley exponencial puede ser teóricamente menos rigurosa, pero se corresponde bien con la realidad y es más conservadora que la ley exponencial. La fórmula de la ley exponencial para realizar la extrapolación de la velocidad es la siguiente:

2.2

Donde:

- h : Altura a la que se desea estimar la velocidad.
- V_o es la velocidad media.
- h_o : Altura a la que se instaló el anemómetro.
- n : Coeficiente de rugosidad superficial dado por la fórmula:

2.3

Estimando la velocidad a la altura de 70m a través de la ley exponencial:

25

2.5.3 Distribución de weibull.

Una de las formas más aceptadas de modelar el comportamiento de la velocidad del viento es mediante la llamada Distribución de Weibull cuya función está dada por:

—

2.4

- Donde:
- K: Factor de forma adimensional.
- c : Factor de escala en m/s.
- V: velocidad media m/s.

De lo que se trata es de encontrar los parámetros k y c tal que la distribución se ajuste a la distribución de frecuencia de los datos medidos.

$$K = \frac{\text{---}}{\text{---}}$$

2.5

$$\text{---}$$

2.6

26

Dado que C tiene dimensiones de velocidad, se estiman su variación vertical con una fórmula derivada de ecuación 2.1, sustituyendo en esta última V por C se llega a:

2.7

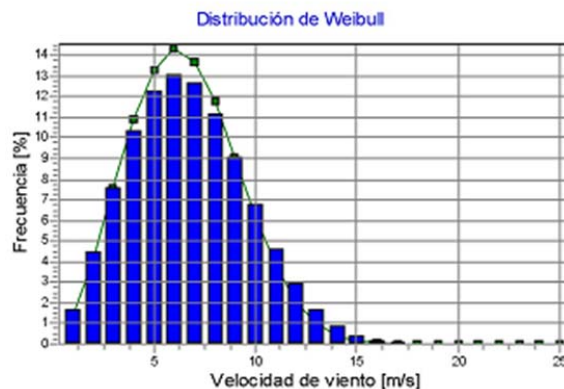


Figura 2.9 Distribución de Weibull.

Para analizar resultados de los parámetros de Weibull (ver anexo 1).

De modo orientativo la extrapolación de los valores de velocidad promedio anual y parámetros de la Distribución de Weibull hasta 70 y 80 m (alturas para las que no existen mediciones) indica que puede ser conveniente elevar la altura del rotor de los aerogeneradores hasta esos niveles, lo que deberá ser confirmado por los cálculos de rendimiento económico y financiero, dado que la instalación de máquinas a esas alturas causará costos adicionales en las torres y cables, así como exigirá el empleo de un medio de izaje de más capacidad .

27

2.5.4 Parámetros a calcular.

El proyecto de ubicación de los aerogeneradores sobre el terreno permite establecer por un análisis puramente geométrico el llamado coeficiente de aprovechamiento de la superficie, CA, definido como:

2.8

Donde es el área barrida por los rotores de los aerogeneradores del parque, y es el área de terreno ocupada por el parque. Obviamente,

2.9

El ancho del parque estará dado por la fórmula siguiente:

2.10

La profundidad del parque estará dada por la fórmula:

2.11

El número de aerogeneradores del parque será:

2.12

Donde:

N1: Número de columnas.

N2: Número de filas.

Por otro lado, el área ocupada por el parque eólico será:

2.13

El número de aerogeneradores por unidad de área del parque será dado por la fórmula:

28

2.14

El coeficiente de aprovechamiento de la superficie, será el cociente del área barrida total dividida entre el área ocupada por el parque eólico

2.15

Densidad de potencia W/m²

2.16

Donde:

: Densidad del aire (kg/).

Área de barrido de la turbina

2.17

Donde:

D: Diámetro del rotor (m).

Eficiencia de conversión de la turbina.

2.18

29

Donde:

$CP(V)$ =eficiencia del rotor=0.44

N_m =eficacia del tren de fuerza=0.968

N_g =Eficiencia del generador=0.965

Clase de aerogenerador.

Para determinar la categoría de aerogenerador apropiada para el sitio. La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) define, en su norma IEC 61400-1, cuatro clases de aerogeneradores, según su aptitud para resistir sin deterioro excesivo la acción mecánica de viento. Los aerogeneradores de la Clase I, son los más resistentes a la acción mecánica del viento, en tanto que los aerogeneradores de la Clase IV, son los menos resistentes.

Cada clase se caracteriza en primer término por dos parámetros:

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

Además, la norma IEC 61400-1 establece que cada clase se presenta en dos categorías: A y B, según la intensidad de la turbulencia que puede soportar el aerogenerador. Los aerogeneradores de la categoría

A pueden soportar una turbulencia mayor, en tanto que los de la categoría B pueden soportar una turbulencia menor.

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

La norma IEC 61400-1 establece que un aerogenerador de la categoría A tolera una intensidad de turbulencia I_{15} de hasta 0.18, mientras que un aerogenerador de la categoría B tolera una intensidad de turbulencia I_{15} de hasta 0.16.

Tabla 2.2 Condiciones de viento tolerables para los aerogeneradores, según norma IEC 61400-1.

Clase de aerogenerador		I	II	III	IV	S
V _{ref} (m/s)		50	42.5	37.5	30	a definir por el diseñador
V _{media} (m/s)		10	8.5	7.5	6	
Categoría A	I ₁₅	0.18				
	a	2				
Categoría B	I ₁₅	0.16				
	a	3				

Intensidad de turbulencia.

2.19

Donde:

Desviación estándar.

V: velocidad media.

- Para un aerogenerador de categoría B $a=3$

31

2.20

Como es menor que el límite dado en la tabla 2.2 para esta clase de aerogeneradores $=0.16$ es apropiado para el sitio considerado un aerogenerador de categoría B porque el nivel de intensidad de turbulencia no supera lo permisible para la categoría.

Producción anual de energía de una turbina.

2.21

Producción anual de energía del parque eólico.

$$PAE=PAEt*N*d*e$$

2.22

Factor de disponibilidad del aerogenerador.

El factor de disponibilidad de la planta es la variable d , $d=93\%$. Es el porciento del tiempo del año que el aerogenerador está en condiciones de generar energía eléctrica. Ninguna otra tecnología de generación de energía eléctrica tiene un nivel de disponibilidad más alto.

El coeficiente de disponibilidad tiene en cuenta el número de horas que el aerogenerador puede trabajar en un periodo de tiempo. Todos estos factores influyen en el aprovechamiento del potencial eólico en un sitio determinado.

Factor de capacidad del parque.

32

Ahora, a partir de la velocidad media o de la densidad de potencia del viento a la altura del eje del rotor, dada en W/m², siempre para un período anual, es posible determinar el factor de capacidad de los aerogeneradores, FC, esto es, en qué medida el viento reinante cargará los aerogeneradores respecto a su potencia nominal.

La variabilidad del viento, vista por el factor de capacidad FC, que influye en la producción de energía de cada aerogenerador. Este factor se encuentra entre 20 y 35%, en los parques eólicos situados en tierra, aunque algunos en sitios excepcionales como Wellington, Nueva Zelanda, llegan al 45 %. En los parques eólicos costa afuera el factor de capacidad puede llegar a valores entre 40 y 50 %.

Cuando $FC > 20\%$ el parque es factible.

2.23

Generación anual específica:

2.24

Análisis de variantes de aerogeneradores.

Dada la incertidumbre sobre la clase, marca y modelo de aerogenerador que se podrá usar, se consideró oportuno presentar la descripción de 3 variantes resultantes de optimizar la disposición de máquinas, altura de góndola y diámetro de rotor para cada rango de potencia nominal analizado (mediana-grande), que permiten obtener el balance más ventajoso entre el rendimiento energético; y que incluye además el ajuste de la extensión del parque eólico, referido a la potencia máxima que puede instalarse para cada variante de máquinas seleccionadas, aplicando las distancias mínimas admisibles entre los aerogeneradores extremos de la fila y objetivos vecinos relevantes.

33

Se analizan las siguientes variantes:

- VARIANTE I - Un parque eólico con potencia nominal total de 50 MW empleando 25 aerogeneradores GAMESA G90/2000 de Clase IIIA según la norma IEC 61400-1 Ed. 3 (2005), con potencia nominal unitaria de 2 MW, rotor de 90 m de diámetro y altura del eje del rotor a 78 m sobre el nivel del terreno.
- VARIANTE II - Un parque eólico con potencia nominal total de 51 MW usando 34 aerogeneradores GOLDWIND GW82/1500 de Clase IIA ó IIIA según la norma IEC 61400-1 Ed. 3 (2005), con potencia nominal unitaria de 1500 KW, rotor de 82 m de diámetro y altura del eje del rotor a 70 m sobre el nivel del terreno.
- VARIANTE III - Un parque eólico con potencia nominal total de 51 MW usando 34 aerogeneradores VENSYS 77/1500 de Clase IIIA según la norma IEC 61400-1 Ed. 3 (2005), con potencia nominal unitaria de 1500 KW, rotor de 77 m de diámetro y altura del eje del rotor a 70 m sobre el nivel del terreno.

Tabla 2.3 Resumen de indicadores energéticos. Variantes analizadas.

Indicador	Unidades	Variante I	Variante II	Variante III
Tipo de aerogenerador		GAMESA G90/2000	GOLDWIND GW82/1500	VENSYS 77/1500
PAE	GWh/año	158,6	170,6	152,8
Generación anual específica	GWh/año por MW instalado	3,17	3,35	3,00
Factor de capacidad	%	36,2	38,2	34,2

Tabla 2.4 Comparación de los resultados energéticos obtenidos de las variantes.

Parámetros	Variante I	Variante II	Variante III
	GAMESA G90/2000	GOLDWIND GW82/1500	VENSYS 77/1500
Densidad del aire a 50m de altura(kg/m ³)	1,18	1,18	1,18
Altura de la torre (m)	78,0	70,0	70,0
Diámetro del rotor(m)	90,0	82,0	77,0
Potencia unitaria [MW]	2,0	1,5	1,5
Potencia instalada [MW]	50,0	51,0	51,0
Número de aerogeneradores	25	34	34
Eficiencia [%]	92,6	92,2	91,9
Horas equivalentes	3172	3346	2997

Tabla 2.5 Resumen de áreas efectivas ocupadas por las variantes analizadas.

Indicador	Unidades	Variante I	Variante II	Variante III
Aerogenerador		GAMESA G90/2000	GOLDWIND GW82/1500	VENSYS 77/1500
Distancia media entre Unidades de una misma fila.	m	558	558	424
Distancia media entre filas	m	720	656	616
Longitud total a lo largo de la costa.	km	5,6	5,7	6,0

Área que abarca (incluyendo zonas de seguridad y otras no afectadas por obras)	km2	11,6	13,4	12,6
Área efectiva que ocupará	km2	0,18	0,11	0,1
Por ciento de ocupación efectiva respecto al área total que abarcará	%	1,55	0,82	0,8

2.6 Redes eléctricas y capacidad de transmisión de energía.

La zona de Playa Herradura cuenta hoy solamente con un enlace mediante una línea de distribución a 13,8 kV. En la proximidad al Central Guiteras (Delicias), 27 km al Suroeste, se localiza una subestación de transmisión de 110 / 34,5 kV que puede servir para la evacuación de la generación del parque eólico hacia el SEN.

Otra alternativa de enlace eléctrico de la zona propuesta es a través de Gibara en la vecina provincia de Holguín, donde se inició la expansión de la generación eólica mediante la instalación de 2 pequeños parques que totalizan 9,6 MW, y que evacuarán su energía a través de una línea de 34,5 kV.

Gibara está enlazada a la Subestación de Transmisión de 110 kV / 34,5 kV de La Caridad, distante de Gibara unos 23 km, por lo que debe analizarse si será factible construir una línea de 110 kV y la subestación de enlace correspondiente desde la zona de desarrollo eólico de Herradura / Laguna Blanca hacia Gibara (en un trayecto

de unos 20 km), y completar la conexión a 110 kV hacia La Caridad (los restantes 23 km citados arriba).

Ambas variantes se reflejan en el siguiente esquema:

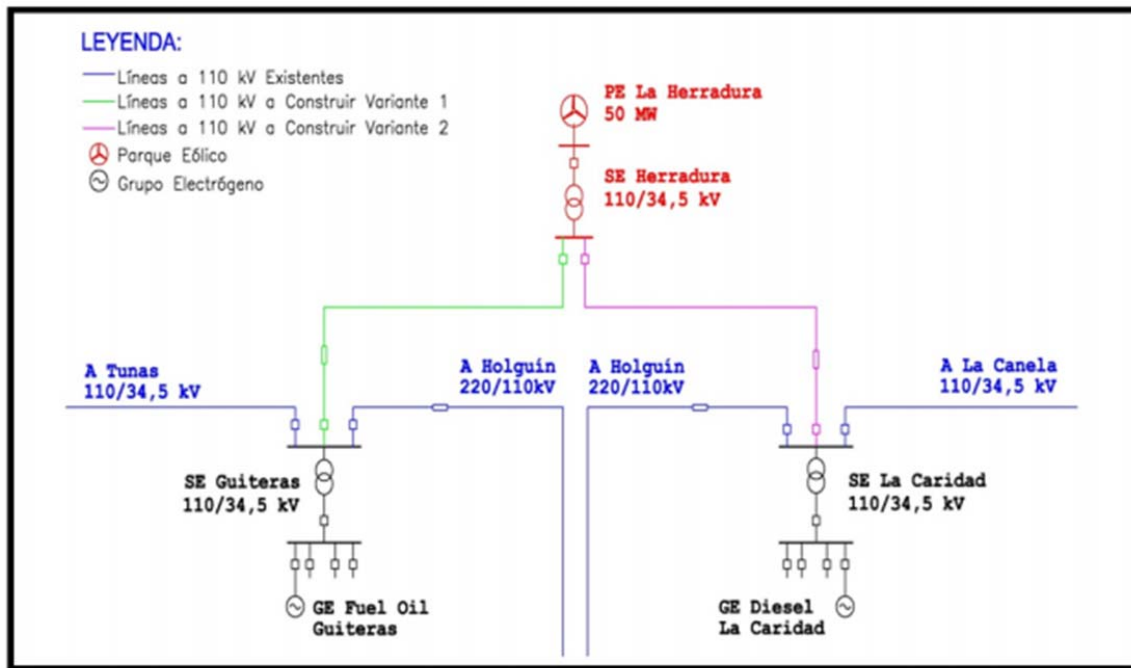


Figura 2.10 Esquema de variante de interconexión del parque eólico con el S.E.N.

2.6.1 Capacidad de generación instalada (base, pico, reserva rodante, reserva fría).

Desde el año 2005 se instalaron en la Provincia Las Tunas varias baterías de grupos electrógenos Diesel que se destinarán progresivamente a funcionar en los picos de demanda y como emergencia frente a averías, así como se completará la instalación de baterías de grupos Fuel Oil que se destinarán para funcionar como generación base.

Es precisamente la generación con Fuel Oil la que debe ser desplazada preferentemente por la energía producida en el parque eólico. Este tipo de generación (generación distribuida) brinda la flexibilidad para la instalación y

asimilación de potencias relativamente grandes de fuentes de energía fluctuantes como la eólica.

2.6.2 Capacidad de transmisión de la infraestructura existente e inversiones necesarias para la extracción de la energía producida por el parque eólico.

La evacuación de 51 MW de energía eólica utilizando la infraestructura existente es técnica y económicamente inviable ya que la misma es insuficiente para transmitir la potencia del parque eólico a lo largo de los más de 20 km de línea hasta la subestación Guiteras.

Para dar solución a este problema y garantizar la expansión futura de la energía eólica en la zona se requiere:

- ❖ Construir una subestación eléctrica 110/34,5 kV en la proximidad del Parque.
- ❖ Construir una línea a 110 kV desde el Parque Eólico hasta la SE Guiteras.
- ❖ Construir un campo de 110 kV la SE Guiteras.

Esta solución posibilitará la extracción segura de la energía generada por el parque eólico propuesto (de 51 MW) y permitirá la expansión eólica en la zona hasta varias decenas de MW más.

2.7 Conclusiones del capítulo:

- ❖ Las frecuencias más altas, entre 11 y 12,6 %, se registran en el intervalo de 5 a 8 m/s, y luego comienzan a decaer de forma paulatina a partir del valor de 9 m/s.
- ❖ Se registran frecuencias de interés por encima de 7 % hasta 10 m/s que no responden a breves períodos de vientos fuertes, sino a un patrón estable. Aunque las frecuencias de velocidades en el intervalo de 10 a 14 m/s no son muy altas, es decir, varían entre 7 % y 1 % con el aumento de la velocidad, pueden ser una importante componente de la generación total estimada.
- ❖ Los valores más altos de velocidades medias se producen en los sectores de dirección dominantes (ENE, E y ESE), donde se agrupa alrededor del 71,7 % de las velocidades registradas.
- ❖ Los rumbos de mayor interés energético son también ENE, E y ESE, en que se concentra cerca del 71,7 % de toda la energía que puede extraerse del viento fundamentando que se instalen aerogeneradores en esa zona.
- ❖ Reducirá la dependencia de importar o emplear combustibles fósiles que obligan al país a fuertes erogaciones de divisas, cuyos precios son inestables, tenderán a aumentar en el mediano y largo plazo, y que aunque se produzcan nacionalmente tienen elevado valor añadido si se emplean como materias primas para importantes procesos industriales.

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

3.1 Introducción.

En este capítulo se realiza la selección de tecnología a utilizar a partir del análisis de las variantes y sus especificaciones para la construcción de un parque eólico en correspondencia con los resultados obtenidos. Su impacto en la sociedad, en el medio ambiente y el de estos sobre el parque, así como la evaluación económica del mismo.

3.2 Valoración económica:

Una de las ventajas del uso de energías renovables, es precisamente la sustitución de combustibles fósiles, los cuales además de contaminar el medioambiente han tenido precios significativamente elevados durante las últimas décadas.

3.1

Donde:

- PAE es la producción anual de energía, kWh/a;
- Cg es el consumo específico de combustible (270), g/kWh;

Ahorro de combustible en barriles de crudo

Dado que una tonelada de petróleo equivale a 7.4 barriles tenemos que

3.2

Gases contaminantes desplazados por concepto de quema de combustible.

Si evaluamos cuánto CO₂ se dejó de emitir a la atmósfera, se obtiene lo siguiente:

3.3

40

Tabla 3.1. Emisiones de gases contaminantes evitadas hacia la atmósfera.

Indicador	Unidades	GAMESA G90/2000	GOLDWIND GW82/1500	VENSYS 77/1500
Combustible fósil desplazado al año (fuel oil con consumo específico de 270 g/kWh).	Ton/año	42822	46 062	41256
Barriles de combustible desplazados		316 882.8	340858.8	305 294.4
Gases contaminantes evitados al año (Calculado para 2,15 Ton Co2 por ton de fuel oil).	Ton/año	92067	99 033	88700

3.3 Resultados obtenidos de la Propuesta de aerogenerador.

La evaluación del potencial Eolo-energético confirma que en el rango de velocidades registradas por las mediciones es viable explotar la tecnología de generación Eolo-eléctrica en la zona de estudio. Se propone emplear el aerogenerador GOLDWIND GW 82/1500.

La viabilidad técnica de instalar un parque eólico de 51 MW en la zona de La Herradura (Playa Herradura a Punta del Lirio), Provincia de Las Tunas, se demuestra por los siguientes indicadores:

El aerogenerador GOLDWIND GW82/1500 (con muy buen rendimiento) alcanzará una generación neta de 170,6 GWh/año con eficiencia global de 92,2%, factor de capacidad de 38,2 % equivalente a 3345 horas de operación anual a potencia nominal con pérdidas del 17,8 % (por efectos de estela y otras pérdidas), desplazando unas 46062 ton/año de combustible fósil, indicadores comparables a los de parques eólicos ejecutados, bajo condiciones de viento similares, en países de alto desarrollo eólico.

Ahorros:

Los ahorros considerados en el presente estudio partieron del siguiente cálculo:

3.4

Donde:

- GenPE: Generación del Parque Eólico = 153 GWh.
- CPG: Costo promedio de la generación en el SEN = 0.1538 cuc/kWh.

De lo anterior se concluye que el parque eólico permitirá ahorrar 26 MMCUC al año. Dicho monto será mayor cada año como resultado de la tendencia alcista de los precios de los combustibles fósiles.

Ingresos por venta de electricidad.

Bajo la premisa de que el Parque Eólico permitirá a la UNE cubrir parte del crecimiento anual del consumo de energía, se calcularon los ingresos por concepto de venta de electricidad para la evaluación del proyecto en Moneda Total.

La tarifa promedio de electricidad considerada fue:

- Tarifa de electricidad en Pesos.....0.2481Pesos/kWh

3.5

Ingresos= 42 325.86MCUP

De lo anterior se deriva que se ingresen anualmente por concepto de venta de energía alrededor de \$ 42.32 MMCUP.

42

Tiempo de recuperación de la inversión (TRI):

Para una estimación preliminar de la viabilidad de un proyecto eólico, es útil aplicar un método rápido que determine los beneficios económicos. El método más eficaz y apropiado es el del tiempo de recuperación de la inversión simplificado, que resulta ser de fácil comprensión y sin complejidad en los cálculos. Su limitación es que omite algunos factores que pueden tener un efecto significativo en este análisis, como el aumento del precio de los combustibles, la depreciación, los costos variables de operación y mantenimiento, entre otros. Algunos autores incluyen estos factores en sus cálculos.

El período recuperación de una inversión (en años) es igual al costo de la inversión del sistema eólico dividido por el ahorro producido por la generación de energía procedente de la planta eólica.

3.6

Donde:

- TRI: Es el tiempo de recuperación de la inversión, a;
- CI: Es el costo de la inversión, \$;
- A: Es el ahorro que reporta la generación de energía en el sistema eólico, \$/a.

El valor actual neto (VAN), diferencia entre el valor actual y los costos de inversión inicial. Se utiliza para aceptar o rechazar proyectos. Cuando un proyecto tienen un VAN negativo, será rechazado. Se emplea también para comparar alternativas diferentes, resultando mejor aquella que tenga mayor VAN.

Tabla 3.2 VAN y TIR.

Modelo de aerogenerador	VAN (15 años) CUC	TIR %	Periodo de recuperación en anos.

43

GOLDWIND GW 82/1500	98 905.36	28.70	5.3
------------------------	-----------	-------	-----

3.3.1 Especificaciones sobre el Golwind 1,5 MW.

Teniendo en cuenta las características de las variantes analizadas para la zona, la tecnología GOLDWIND 1.5 MW es la más factible.

La base de la GOLDWIND 1,5 MW turbina eólica (GW1,5 MW) es su generador de Magnetismo Permanente (PM), que es accionado directamente(DD) y sin engranajes por un rotor de 3 palas. La combinación de la PM generador síncrona con su convertidor de potencia completa maximiza la producción de energía, por lo que hace la turbina eólica altamente eficiente y confiable. Estas tecnologías se especifican el tipo de turbina.

Las turbinas eólicas con frecuencia operan a carga parcial, un rango en el que PM generadores alcanzan su máxima eficiencia. Transmisión directa (DD) es el último concepto de reducir componentes de turbina, así como aumentar su fiabilidad. Una característica única de la GW1,5 MW es la refrigeración directa del generador por el viento, utilizando la relación entre la demanda de refrigeración del generador y la velocidad del viento para enfriar el generador de manera eficiente. El convertidor IGBT a plena carga permite una velocidad adaptable del rotor para lograr una óptima eficiencia aerodinámica a diversas velocidades del viento. Este sistema de convertidor combinado con el generador síncrono PMDD garantiza las capacidades de conexión a la red superior. Los sistemas de paso de pala impulsadas dientes-cinturón combinados con ultra-condensadores aseguran la precisión, la seguridad y menos mantenimiento.

El modelo de producto se ofrece en varias versiones: GW70/1500, GW77/1500, GW82/1500, GW87/1500 y GW93/1500(70m, 77m, 82m, 87m y 93m diámetros de rotor, respectivamente). Estas versiones se adaptan a diferentes recursos eólicos y están disponibles en distintas alturas de torre.

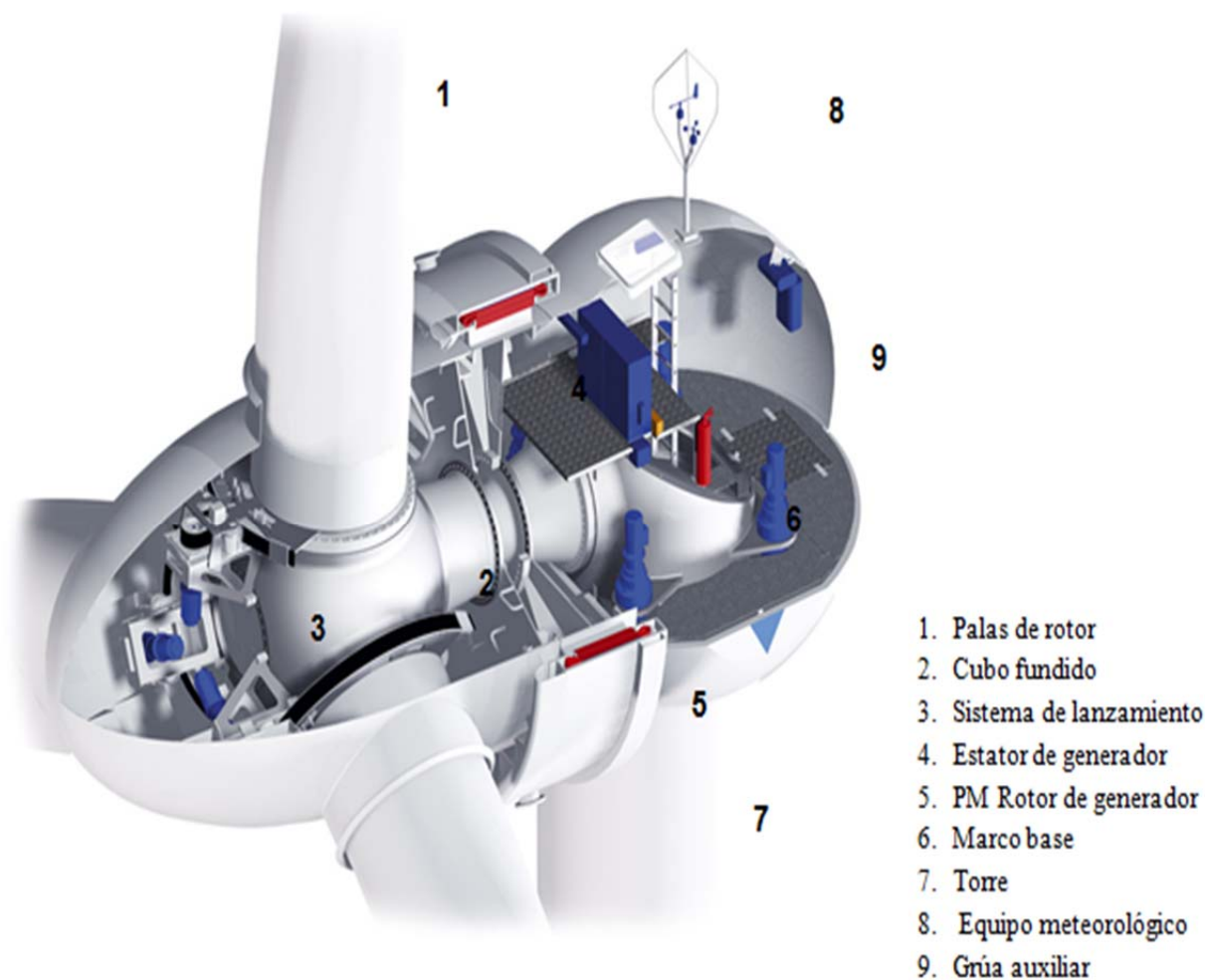


Figura 3.1 Turbina de Goldwind 1,5 MW.

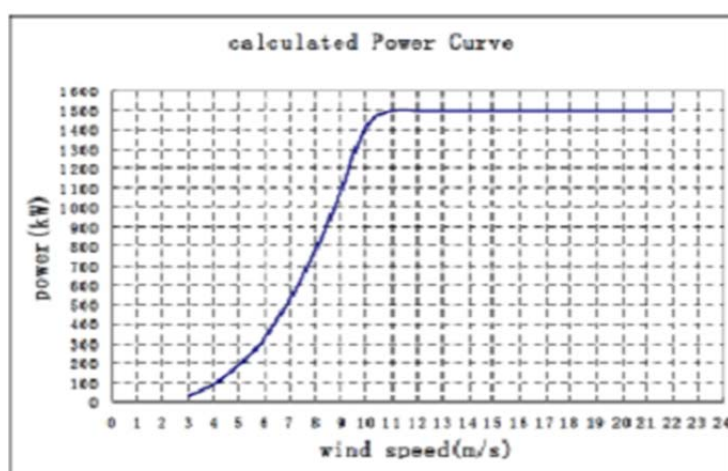


Figura 3.2 Curva de potencia del aerogenerador goldwind.

3.3.2 Palas del rotor.

El rotor de la turbina eólica de Goldwind 1,5MW está equipado con 3 palas de fibra de vidrio reforzadas (GRP) que se producen por fabricantes internacionales de palas reconocidos y calificados. La alta eficiencia aerodinámica del rotor se basa en el diseño eficiente de las superficies de sustentación utilizado en cada pala. Diferentes longitudes de pala se utilizan en función de la clase de viento del campo que se colocarán las turbinas. Esto optimiza la producción de energía y cargas.

3.3.3 Cubo fundido.

El cubo soporta las tres palas del rotor a través de los rodamientos de las palas y los conecta al generador. Las conexiones entre las palas y el cubo, así como la conexión del generador-cubo son conexiones de tornillos de brida. El cubo está optimizado para el tamaño y el peso y está hecho de hierro fundido (EN-GJS-400-18U-LT/GGG40,3). Además, el sistema de lanzamiento, incluyendo el motor de lanzamiento, cárter, caja de control y la estructura de soporte con la nariz que están integrados en el cubo.

3.3.4 Sistema de Regulación y Cambio de las palas (Pitch).

El sistema de Regulación y Cambio es responsable de ajustar el paso ataque de las tres palas. A medida que se ajustan las palas, se cambia el ángulo de ataque de cada pala, ya sea aumentando o disminuyendo la fuerza de sustentación sobre las mismas. Las tres palas están controladas colectivamente, aunque cada pala actúa de forma independiente.

Las palas están conectadas al cubo por medio de un rodamiento de giro horizontal. Este es un cojinete de bolas de doble fila que permite que la pala gire alrededor de su eje longitudinal con una fricción mínima.

El movimiento es accionado por un motor trifásico de inducción. El diseño simple de los motor es de inducción significa que el sistema es fiable con mínimos requisitos de mantenimiento. El motor está equipado con un ventilador de refrigeración independiente y un freno de motor en el segundo extremo. La salida del motor está conectada a una caja de engranaje planetario de 3 etapas.

Una fibra de carbono reforzada (correa) dentada transfiere la salida de la caja de engranajes de piñón para el anillo exterior del rodamiento de la pala. Esta correa dentada pretensada ajusta el ángulo de inclinación con una precisión superior y sin holgura. El material de fibra de carbono de alta rigidez asegura una larga miento mínimo en el tiempo pasado. La facilidad de las correas intercambiables, y la falta de necesidad de lubricación mantienen los costos al mínimo. El sistema de banda utilizado en la turbina de Goldwind 1,5MW es una tecnología patentada.

El sistema de regulación recibe energía de la fuente de alimentación principal en la góndola por medio de un anillo de deslizamiento en el centro de la conexión del generador-cubo. La alimentación es rectificada a DC para cargar el ultra-condensador y alimentar los circuitos de control. La fuente de DC actúa como convertidor en CA para alimentar el motor de inducción.

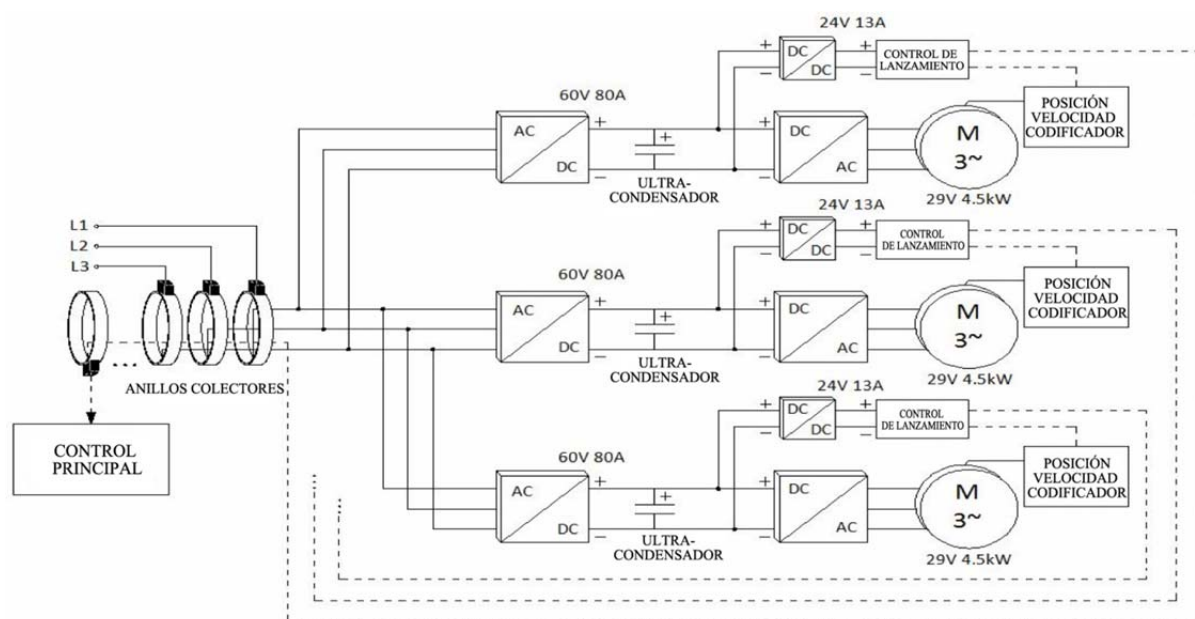


Figura 3.3 Diagrama de control eléctrico de Regulador de las palas(Pitch)

En el caso de pérdida de potencia(es decir, fallo de la red) el sistema de lanzamiento necesita energía almacenada para re-lanzar las palas a una posición segura. Al colocar los ultra-condensadores en serie con la fuente de alimentación, que siempre llevan una carga, dando una acción inmediata cuando sea necesario.

No cambia el modo de funcionamiento del sistema de lanzamiento cuando se produce durante una caída de tensión y "paseo de baja tensión". Además no hay ningún cambio en los sistemas operativos durante la pérdida de red. El funcionamiento continuo de los ultra-condensadores garantiza el control total permanente y la funcionalidad de este almacenamiento y sistema de seguridad. Los ultra-condensadores también tienen la ventaja de una larga vida útil y no se ven afectados por las temperaturas altas y bajas.

3.3.5 PMDD generador.

El generador del Goldwind 1,5MW es una multipolar de Magnetismo Permanente de accionamiento directo (PMDD) generador síncrono.

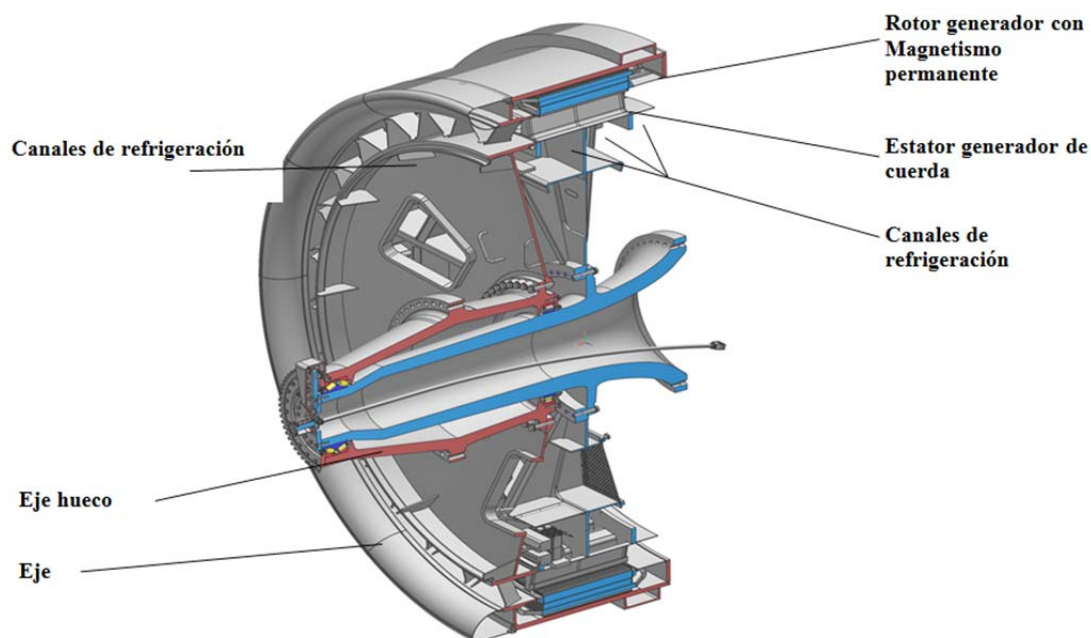


Figura 3.4 1.5 MW PMDD Generador

Tabla 3.3 Datos técnicos.

Diámetro exterior	5,002(Incluyendo puntos elevados)
Espacio de aire entre rotor y estator	6mm
Tipo de enrollamiento	enrollamiento de dos capas fraccionaria-ranuras
Ranuras y bobinas	576
Frecuencia	13,9Hz(GW70),12,7(GW77/GW82), 12,2(GW87/GW93)
Número de fases	3fases(x2)
Tensión nominal	690V

3.3.6 Rotor de generador.

Los magnetismos permanentes se colocan en el interior del cilindro del rotor en 22 bloques de 4 polos, lo que resulta en 88 polos. Los campos magnéticos de los polos, que giran alrededor de las bobinas del estator, producen la tensión en el estator. El rotor (sección giratoria completa del generador, que se muestra en rojo arriba) se ha fabricado con componentes fundidos y soldados.

Los imanes están fijados a la parte interior del cilindro del rotor y se sellan con pegamento de alta resistencia. Además, los imanes están cubiertos por capas de protección de fibra vidrio.

El rotor es un rotor externo, es decir, el rotor gira alrededor de la parte exterior del estator. Suponiendo el mismo diámetro del espacio de aire entre el rotor y el estator, el uso de un PM rotor como un rotor externo, reduce el diámetro total del generador. Esto es debido al pequeño espesor de los imanes permanentes en comparación con un rotor excitado eléctricamente.

3.3.7 Estator de generador.

El estator del generador (se muestra en azul arriba) es una combinación de componentes fundidos y soldados que soportan el núcleo del estator y el enrollamiento trifásico de cobre. El enrollamiento de cobre utiliza el cableado rectangular de cobre, que asegura una cobertura de óptimo aislamiento. El estator está fijado a la estructura de base de la turbina por la conexión de perno-bridá. Es un componente estático.

3.3.8 Sistema de orientación.

El sistema de orientación gira la cabeza del rotor/turbina en contra del viento y ajusta su posición a medida que cambia la dirección del viento. La dirección del viento es controlada por una veleta en la cubierta de la góndola, que envía una señal al controlador de la turbina a guiar la góndola como los cambios de dirección del viento.

3.3.9 Torre.

La torre se ha fabricada con acero de alta resistencia en tres a cinco secciones, en función de la altura total de la torre. Cada sección contiene una brida interior en cada extremo para la conexión de los segmentos. La sección inferior de la torre está atornillada a la base y las secciones posteriores se atornillan en la parte superior.

Las torres están equipadas con una escalera y barandilla de seguridad. A petición de un sistema de escalada asistida o un ascensor se pueden incluir para el accenso de mantenimiento a la góndola. El alumbrado de emergencia y las plataformas se instalan a lo largo de la torre en intervalos regulares.

3.3.10 Convertidor.

El sistema de velocidad variable GW1,5MW se basa en la combinación del PMDD generador síncrono y el convertidor de frecuencia de gama completa. Esto permite que el generador funcione a la velocidad del rotor optimizada de corte para cortar. De alimentación de CA de frecuencia variable desde el generador (lineal a la velocidad de rotación del generador) entra en el convertidor, y se convierte para que coincida con la frecuencia de red, sea de 50Hz o 60Hz. El convertidor lo desacopla la frecuencia del generador de la frecuencia de red. El sistema de convertidor tiene su propia unidad de control (CPU), separada del controlador de la turbina.

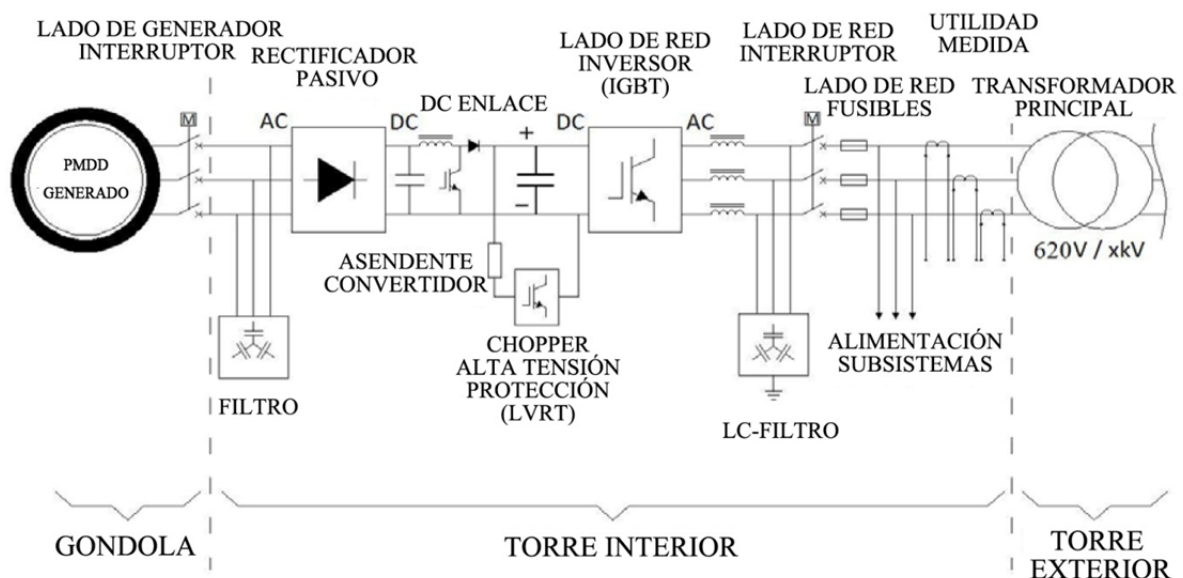


Figura 3.5 Diagrama eléctrico de GW 1,5 MW

La salida de potencia trifásica del generador entra en un rectificador pasivo (Una serie de diodos) que convierte la salida del generador de CA a CC. Un IGBT inversor luego convierte la CC en CA en la frecuencia de la red requerida y suministra una corriente sinusoidal. El microprocesador electrónica de potencia controlada (IGBTs) permite que el sistema se adapte a diversos requerimientos de la red por los ajustes de software.

EICC-Linkyel condensador son responsables de mantener el equilibrio entre la energía generada y de salida. Si la red no toma la salida del rectificador (por ejemplo, fallo de red), habrá un aumento de tensión en el circuito intermedio. Para proteger los módulos IGBT y permitir la turbina de permanecer conectado a la red, por ejemplo, durante un "paseo de baja tensión"(LVRT), el circuito de protección de alta tensión limitará el exceso de tensión por descargar la carga a través de una resistencia.

Los filtros armónicos se encuentran en el lado de la red del convertidor. Ellos apoyan a la calidad de la energía total del sistema y asegurar que se cumplan las normas de la red. Las cajas de fusibles y disyuntores son capaces de desconectar el convertidor de la red.

Para satisfacer cualquier requisito actual de la red y los requisitos de la red más futuros del PMDD-sistema convertidor de energía total es la base perfecta para adaptarse, únicamente por modificaciones de software. El convertidor, que se encuentra en la base de la torre, es un sistema modular que puede ser fácilmente reparado.

El suministro de energía a los subsistemas de la turbina se toma directamente de la red. Esto incluye la fuente de alimentación para el controlador principal, que está respaldado por un sistema de alimentación ininterrumpida (UPS).

3.4 Propuesta de disposición del parque para este aerogenerador.

En la Variante GOLDWIND GW82/1500 las 34 máquinas se desplegaron en filas de 3 máquinas separadas a 5,4 veces el diámetro del rotor, orientadas casi perpendiculares a la línea de costa y al flujo predominante (Este), y cada fila se situó una detrás de otra siguiendo la línea de costa, separadas 8 veces el diámetro del rotor, hasta completar los 51 MW instalados como se muestra en la figura.

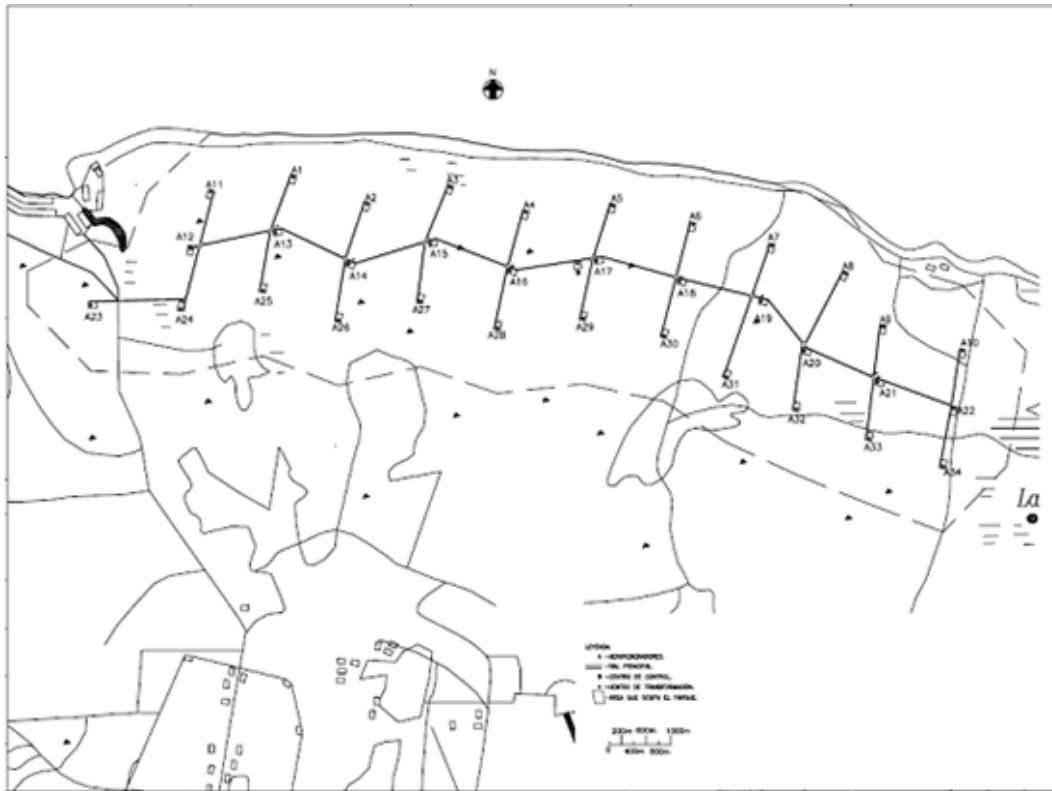


Figura 3.6 Disposición del parque de 51 MW con 34 aerogeneradores GOLDWIND GW82-1500.

3.5 Impacto del parque sobre la sociedad y el medio ambiente.

Los principales impactos posibles serán los asociados al ruido en funcionamiento (ya comentado arriba) y los siguientes:

- ❖ Interferencia a aeronaves: Las torres, góndolas y rotores de los aerogeneradores son barreras físicas para una aeronave que vuele a baja altura por la zona. Será imprescindible acordar con las autoridades de la Aeronáutica las limitaciones de intervención en la zona (atendiendo a la posibilidad de vuelos bajos de aviones de pequeño porte) y las condiciones de señalización que se aplicarán a cada aerogenerador, por ejemplo, balizas para la visión nocturna.
- ❖ Accidentalidad de aves y murciélagos: El área barrida por el conjunto de los rotores de los aerogeneradores será una barrera física en movimiento para las bandadas de aves y murciélagos que vuelen a través de ellos. La amenaza de impactos de aves con las palas dependerá de varios factores: 1)

altura de vuelo de las aves y dirección más frecuente de éstas; 2) con el aumento de la potencia unitaria de la máquina, generalmente aumenta la altura de la torre y el diámetro de palas, por lo que, aun cuando aumenta el área de barrido, disminuye la velocidad de rotación o rpm de las palas.

A mayor diámetro, mayor área barrida y menor velocidad de rotación.

A mayor altura del eje del rotor, menor será la frecuencia de aves que vuelen a esas alturas por lo que la probabilidad de impacto con las palas será menor.

En el Certificado de Macrolocalización No. 001/2010 “Zona Herradura a Punta del Lirio”, emitido en septiembre de 2010 por el Instituto de Planificación Física, se anexa un dictamen del CITMA donde se alerta que esta zona se halla dentro de uno de los corredores migratorios de aves más importantes de nuestro país y que en la zona destaca la presencia de aves residentes con poblaciones amenazadas, por lo que estos elementos deberán ser tenidos en cuenta en el estudio de microlocalización así como en la solicitud de licencia ambiental. Estos aspectos deberán precisarse con especialistas del Instituto de Ecología y Sistemática (IES) perteneciente al CITMA.

- ❖ Impacto visual: La visibilidad del parque como un todo y de sus máquinas en particular a cierta distancia es lo que se conoce como impacto visual. Las turbinas de gran tamaño pueden ser visibles a muy grandes distancias en zonas llanas y con baja vegetación. Sin embargo, un impacto negativo sobre los observadores es notablemente subjetivo, dado que depende en gran medida de los gustos, sensibilidad e identificación personales con los beneficios que aporta su empleo.
- ❖ Efecto de destellos o parpadeo. Los destellos causados por la interferencia de las palas en rotación con los rayos del sol van a depender de las direcciones aleatorias del rotor siguiendo la dirección del viento, las horas de funcionamiento de la turbina, el diámetro del rotor y altura de la torre, las horas de insolación reales, los niveles del terreno, la altura de la vegetación y la latitud.

En el caso de La Herradura, el 71,7 % de las velocidades del viento a 50 m se hallan en los sectores ENE, E (predominante) y ESE, de manera que 6281 horas del año el rotor de las máquinas estaría orientado no en dirección sur, siguiendo las posiciones relativas del Sol, sino en direcciones no favorables para que se produzcan sombras o destellos detrás del rotor de los aerogeneradores.

- ❖ Interferencias radiotécnicas y a los radares: Puede ser importante si los parques eólicos se hallan muy cerca de zonas de concentración de grandes campos de antenas y radares. No aplica a este caso.
- ❖ Posibles derrames de lubricantes y líquido hidráulico: Son impactos muy excepcionales relacionados generalmente a errores de manipulación durante los mantenimientos o averías también causadas por omisiones de cambios durante los mantenimientos, y por tanto este riesgo puede disminuirse notablemente con medidas de disciplina tecnológica. Los aerogeneradores modernos comúnmente cuentan con bandejas colectoras en las zonas de manipulación o posibles derrames de lubricantes y líquidos hidráulicos, y pozos de succión para bombas de evacuación.

Otros impactos posibles

No se identifican otros posibles impactos de interés por su frecuencia, persistencia o trascendencia, dado que:

- ❖ Riesgo de embalamiento: Es muy improbable que algún aerogenerador se embale (se sobre-acelere su rotación) al ser sometido a vientos de alta velocidad, por fallo de los sistemas de regulación de potencia y velocidad de rotación, provocando riesgos de fallo catastrófico de sus palas o torre. Las máquinas que se propone utilizar en este proyecto cuentan con sistemas triples redundantes de control de potencia y de frenado aerodinámico (mediante los sistemas de cambio de paso o pitch de las palas con accionamiento individual en cada una y suministro energético autónomo y redundante), así como sistema redundante de control de la velocidad de giro de su rotor de velocidad variable.

Las referencias a fallos catastróficos de este tipo son escasas, con significación estadística sumamente baja, y se relacionan en general a máquinas con muchos años de servicio (que acumulan fatigas estructurales y cuyos controles han fallado por insuficiente revisión u omisión de la sustitución de componentes en plazos establecidos), o a unidades nuevas de tipos insuficientemente probados antes de extenderse su comercialización.

❖ Nivel extraordinario de ruido

Puede ocurrir por avería importante de algún rodamiento o engranaje del multiplicador o si surgen grietas en zonas próximas a las puntas de las palas. En ambos casos las averías son fáciles de detectar y corregir en muy corto tiempo tras manifestarse, aunque las reparaciones de multiplicadores pueden ser costosas y obligar a bajar el conjunto averiado o incluso la góndola completa, según las características tecnológicas propias, exigiendo la intervención de una grúa de gran capacidad y posiblemente de una grúa auxiliar.

Esta tecnología aporta beneficios medio ambientales directos y tangibles porque:

- ❖ No genera emisiones de gases contaminantes a la atmósfera ni de residuales líquidos o sólidos que puedan contaminar el terreno o las aguas subterráneas.
- ❖ Produce una reducción neta de emisiones de gases contaminantes de la atmósfera al desplazar consumos apreciables de los combustibles fósiles que deben quemarse para generar la electricidad equivalente a la que pueden producir los aerogeneradores.

Predicción y evaluación de los impactos.

Es muy improbable que algún aerogenerador se embale (se sobre-acelere su rotación) al ser sometido a vientos de alta velocidad, por fallo de los sistemas de

regulación de potencia y velocidad de rotación, provocando riesgos de fallo catastrófico de sus palas o torre. Las máquinas que se propone utilizar en este proyecto cuentan con sistemas triples redundantes de control de potencia y de frenado aerodinámico (mediante los sistemas de cambio de paso o pitch de las palas con accionamiento individual en cada una y suministro energético autónomo y redundante), así como sistema redundante de control de la velocidad de giro de su rotor de velocidad variable.

Las referencias a fallos catastróficos de este tipo son escasas, con significación estadística sumamente baja, y se relacionan en general a máquinas con muchos años de servicio (que acumulan fatigas estructurales y cuyos controles han fallado por insuficiente revisión u omisión de la sustitución de componentes en plazos establecidos), o a unidades nuevas de tipos insuficientemente probados antes de extenderse su comercialización.

3.6 Conclusiones del Capítulo:

1. Se propuso un parque eólico con capacidad para generar 176.3 GW/a con tecnología Goldwind con su modelo GW/82 1.5 MW.
2. La puesta en marcha del parque aportaría un ahorro al año de t de petróleo lo que equivale a 26 238 280.00 CUC.
3. Reducirá los impactos ambientales debidos al calentamiento global por emisiones de gases de efecto invernadero y las lluvias ácidas. Se dejaría de emitir 99 033 ton de CO₂ al medio ambiente.
4. La inversión basada en costo de tecnología se recupera en 5.3 años.

CONCLUSIONES GENERALES:

De acuerdo a los resultados obtenidos en este Trabajo de Diploma se consideran las siguientes conclusiones:

1. Se determina un potencial eólico de 170.63 GWh/a en la zona Herradura 1.
2. En el mundo los principales fabricantes y usuarios de aerogeneradores son los países desarrollados tales como EE.UU, Alemania, España, Holanda, India, Dinamarca y China.
3. La capacidad eólica instalada en Cuba es de 11.7 MW.
4. La velocidad media del viento en la zona La Herradura es de 6.84 m/s.
5. Se propone un parque de 51 MW de la tecnología Goldwind 1.5 MW.
6. La inversión basada en costo de tecnología se recupera en 5.03 años.
7. Se ahorran 46 062 t de petróleo que representan 26 238 280.00 CUC en un año, así como se dejarían de emitir 99 033 t de CO₂ al año.

RECOMENDACIONES

- 1- Continuar el análisis de la data de la estación Herradura1 y de zonas aledañas con potencial suficiente para la construcción de futuros parques eólicos.
- 2- Continuar desarrollando las energías alternativas renovables y limpias para la sustitución de los combustibles fósiles en la producción de energía eléctrica.

BIBLIOGRAFÍA:

- Alexandria, VA: American Wind Energy Association; 11 p. Wind Energy Conversion Systems Terminology. (1985). AWEA Standard 5.1-1985.
- Berris, Luis y Emir Madruga. "Cuba y las Fuentes renovables de energía". Editorial Cuba Solar, 1998.
- Clark, I. "Practical Geostatistics". Geostokos Limited, United Kingdom, 119 p, 1977. Versión digital. Consulta: 28-09-2009. Disponible en: <http://uk.geocities.com/drisobelclark/PG1979>.
- Closa, C. "Fuentes de energía no convencional". Revista Metalurgia y Electricidad (553):94-96. Julio de 1980.
- Comité Estatal de Normalización, República de Cuba. "Norma Cubana 57-11 Geodesia y Cartografía: Planos Topográficos a las escalas 1:2000, 1:1000 y 1:500". La Habana, 10 p, 1982a.
- Comité Estatal de Normalización, República de Cuba. "Norma Cubana 57-32 Geodesia y Cartografía: Red Planimétrica Nacional, Requisitos Generales". La Habana, 6 p, 1982b.
- Design Criteria Recommended Practices: Wind Energy Conversion Systems (1988). AWEA 3.1-1988. Arlington, VA: American Wind Energy Association; 25p.
- Fernández Díez, P. "Energía Eólica". Revista Metalurgia y Electricidad (509): 63-68, Febrero de 1980.
- Fernández Jiménez, Luis Alfredo. "Modelos avanzados para la predicción a corto plazo de la producción eléctrica en parques eólicos". Tesis doctoral.
- García Guerra, P. A. "Geoestadística Operacional". Departamento Nacional de Producción Mineral, Ministerio de Minas y Energía, República Federativa de Brasil, Brasilia DF, 145 p, 1988.
- Golden Software INC. "Surfer Version 7". User Manual, USA, 1999.
- Manzanilla, R. "Generación automática de triangulaciones de Delaunay". Proceedings del I Seminario Venezolano de Métodos Numéricos en Ingeniería, Caracas, p. 77-91, marzo 1993

- Moreno Figueredo, Conrado. “Diez Preguntas y Diez Respuestas Sobre Energía Eólica” .
- Moreno Figueredo, Conrado. “El viento como fuente de energía”. Editorial Ciencia y Técnica, Manual de la Facultad de Ingeniería Energética, pp. 106-108, La Habana, 1987.

ANEXOS:

Tabla 1 Parámetros de Weibull.

Datos de Weibull

Sector	Emplazamiento actual				Referencia: clase de rugosidad 1			
	Parámetro A	Velocidad de viento	Parámetro k	Frecuencia	Parámetro A	Parámetro k	Frecuencia	
	[m/s]	[m/s]		[%]	[m/s]		[%]	
0 N	6,59	5,86	1,803	2,4	5,75	1,710	2,4	
1 NNE	6,60	5,84	2,068	3,9	5,64	1,940	3,9	
2 NE	7,51	6,65	2,018	8,4	6,51	2,010	8,8	
3 ENE	9,22	8,31	3,584	22,2	7,77	3,540	23,5	
4 E	9,08	8,25	4,127	29,0	8,80	4,030	27,5	
5 ESE	6,40	5,75	3,322	12,8	7,58	3,520	13,0	
6 SE	5,12	4,56	2,830	6,1	6,26	3,040	6,2	
7 SSE	4,68	4,14	2,256	3,7	5,72	2,310	3,6	
8 S	4,55	4,03	2,143	3,2	5,70	2,210	3,2	
9 SSO	4,01	3,55	2,006	2,1	4,91	2,080	2,0	
10 SO	3,54	3,14	2,041	1,5	4,02	2,040	1,5	
11 OSO	3,39	3,02	1,795	1,0	3,82	1,820	1,0	
12 O	3,29	2,92	1,881	0,7	3,37	1,880	0,6	
13 ONO	3,03	2,72	1,615	0,6	2,49	1,500	0,6	
14 NO	3,29	2,95	1,623	0,9	2,88	1,530	0,9	
15 NNO	4,95	4,39	2,029	1,4	4,42	1,910	1,4	
Todos	7,60	6,74	2,451	100,0	7,34	2,633	100,0	

Figura1 Densidad del aire.

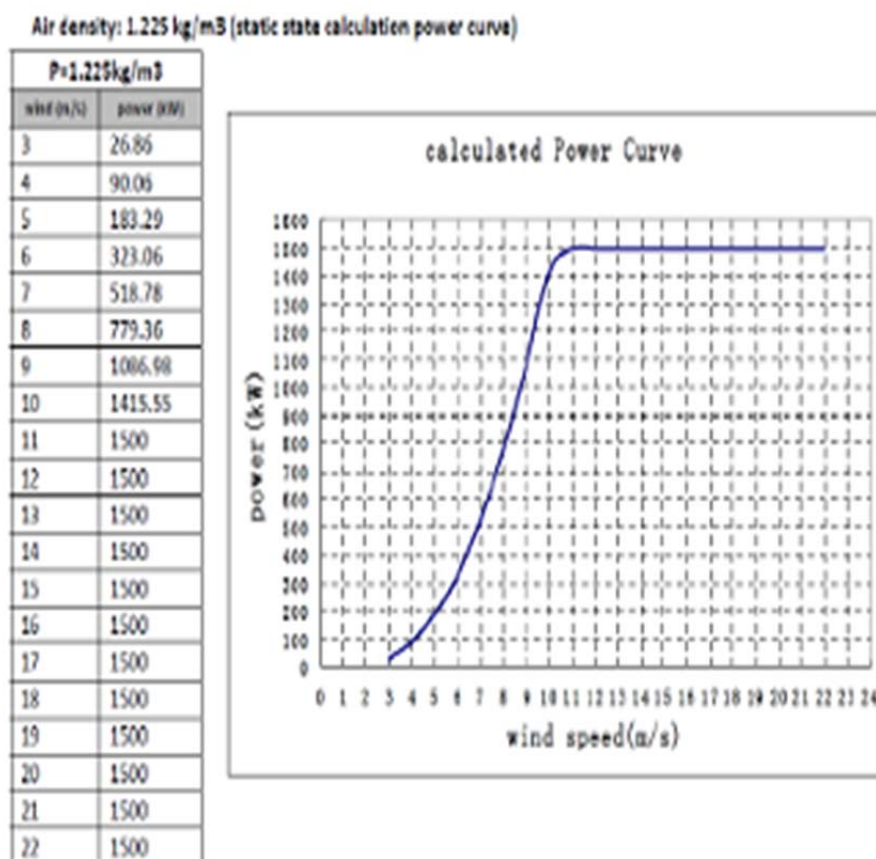
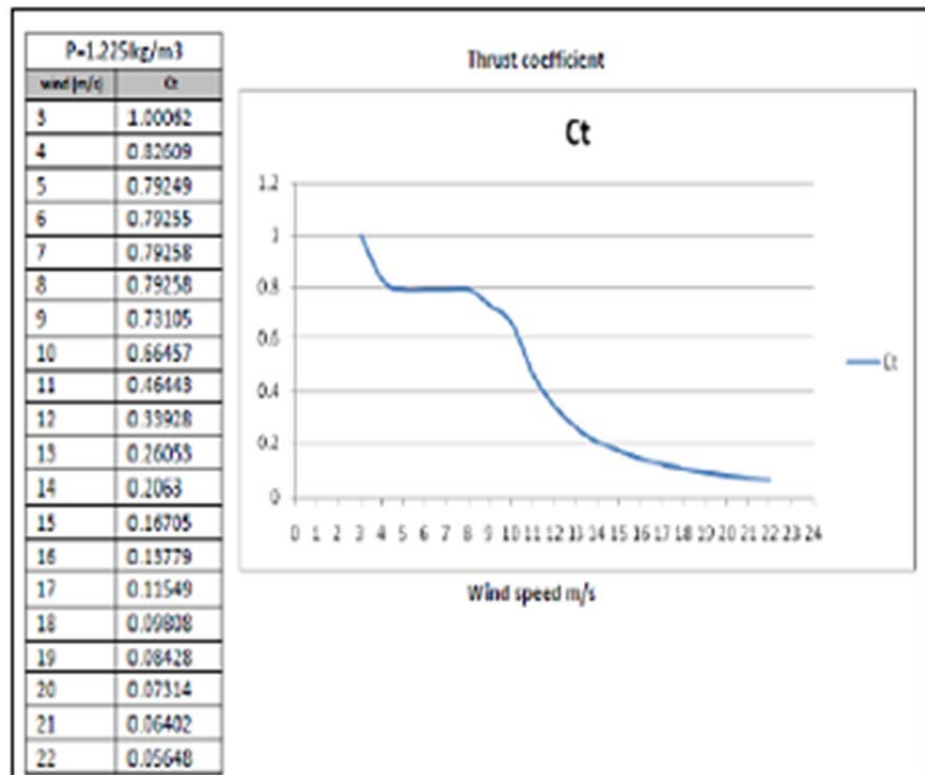


Figura 2 Coeficiente de turbulencia.



El gráfico de la Figura4 muestra la variación del sonido en función de la distancia. En la práctica, la absorción o la reflexión del sonido por superficies blandas o duras pueden modificar los resultados aquí mostrados.

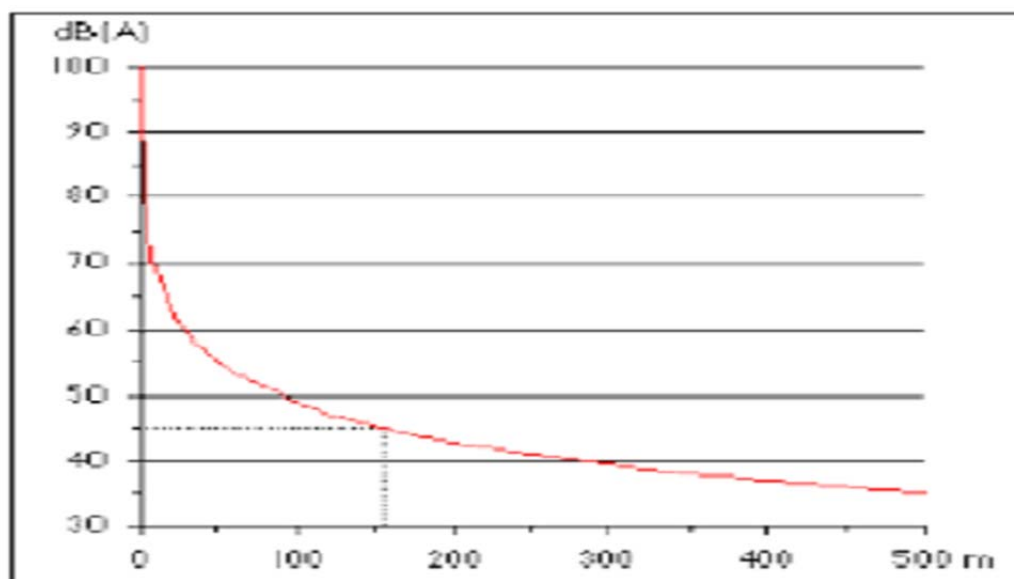


Figura4 Comportamiento del ruido (dB(A)) de un aerogenerador en función de la distancia.