



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA APLICADO AL
DESARROLLO DE ENERGÍA EÓLICA EN GUATEMALA**

José Fernando Gutiérrez del Cid

Asesorado por MA. Ing. Julio César Campos Paiz

Guatemala, enero de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Fredy Mauricio Monroy Peralta
EXAMINADOR	Ing. Julio César Molina Zaldaña
EXAMINADOR	Ing. Pablo Rodolfo Zúñiga Ramírez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA APLICADO AL DESARROLLO DE ENERGÍA EÓLICA EN GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha mayo de 2012.

José Fernando Gutiérrez del Cid



Guatemala, 16 de Octubre de 2014

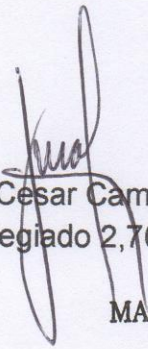
Ing. Julio Cesar Campos Paiz
Director Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Campos:

Por medio de la presente hago constar que he revisado y dado mi aprobación al informe final del trabajo de graduación **SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA APLICADO AL DESARROLLO DE ENERGÍA EÓLICA EN GUATEMALA**, realizado por el estudiante de Ingeniería Mecánica José Fernando Gutiérrez del Cid quien se identifica con el carné 2007-14918.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Atentamente,


Ing. Julio César Campos Paiz
Colegiado 2,701

MA Ing. Julio César Campos Paiz
Ingeniero Mecánico
Colegiado No. 2701



USAC

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.Mecanica.289.2014

El Coordinador del Área de Complementaria, de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado **SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA APLICADO AL DESARROLLO DE ENERGÍA EÓLICA EN GUATEMALA**. Del estudiante **José Fernando Gutiérrez del Cid**, recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador del Área de Complementaria
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, noviembre de 2014.



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.Mecanica.34.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, con la aprobación del Coordinador del Área de Diseño, del trabajo de graduación titulado **SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA APLICADA AL DESARROLLO DE ENERGÍA EÓLICA EN GUATEMALA**, del estudiante **José Fernando Gutiérrez del Cid**, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"

MA. Ing. Julio César Campos P.
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica



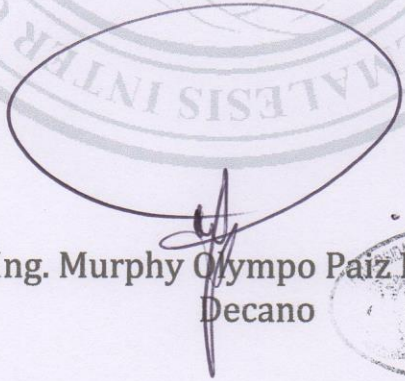
Guatemala, enero de 2015



DTG. 024.2015

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA APLICADO AL DESARROLLO DE ENERGÍA EÓLICA EN GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **José Fernando Gutiérrez del Cid**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 28 de enero de 2015

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por permitirme alcanzar esta meta. Por ser mi apoyo, mi luz y mi camino. Porque sé que siguiendo tus enseñanzas nunca me hará falta nada.
- Mis padres** Por creer en mí en todo momento, ser un ejemplo de vida a seguir y por el mejor regalo de todos, la educación.
- Mis hermanos** Por su apoyo incondicional.
- Mi abuela** Por todo su cariño, por sus sabios consejos y darme la motivación necesaria para culminar esta meta.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por cuidarme y mostrarme día a día el camino a seguir, por su infinita misericordia conmigo y sobre todo por rodear mi vida de ángeles.
- Mis padres** Por estar conmigo en todo momento, por el amor que solo un padre sabe dar, por el apoyo y enseñanzas que me brindaron, las cuales me hacen ser quien soy.
- La Universidad de San Carlos de Guatemala** Por las enseñanzas académicas y personales para convertirme en un profesional, pero sobre todo por darme el honor de ser parte de esta alma máter.
- Mis amigos** Por haber hecho de mi etapa universitaria un trayecto de vivencias que nunca olvidaré, los llevo en el corazón y nunca podré pagarle a la vida el privilegio de contar con su cariño, lealtad y apoyo, especialmente a Verónica González.
- INSIVUMEH** Por darme la oportunidad de empezar en el mundo laboral y brindarme los medios necesarios para concluir este proyecto, en especial a su director Ing. Eddy Sánchez.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. CARACTERIZACIÓN DE ENERGÍA EN GUATEMALA	1
1.1. Regulaciones y marco legal del sector energético	1
1.2. El subsector eléctrico.....	5
1.2.1. Marco institucional actual.....	6
1.2.2. Generación de energía en Guatemala.....	9
1.2.3. Consumo de energía en Guatemala.....	12
1.3. El subsector de hidrocarburos	15
1.3.1. Marco institucional actual.....	16
1.3.2. Políticas públicas	16
1.3.3. Situación actual	17
1.4. El subsector de energías renovables	18
1.4.1. Marco institucional	19
1.4.2. Políticas públicas	19
1.4.3. Participación de las energías renovables en el sector energético de Guatemala.....	20
1.5. Desarrollo del sector de energías renovables	21

2.	ENERGÍA EÓLICA.....	23
2.1.	El recurso del viento.....	23
2.1.1.	El viento como fuente de energía.....	24
2.1.2.	Aplicaciones de viento.....	26
2.1.3.	Formación de vientos globales.....	28
2.1.4.	El viento en Guatemala	29
2.1.5.	Velocidad media del viento y potencial real.....	31
2.1.6.	Medición de la velocidad y dirección del viento.....	34
2.1.7.	Efectos locales sobre el flujo del viento.....	35
2.2.	Energía eólica terrestre	38
2.3.	Energía eólica marina	39
2.4.	Mapa eólico de Guatemala	41
3.	COMPONENTES DE UN SISTEMA DE ENERGÍA EÓLICA	43
3.1.	Sistema de soporte	44
3.2.	Sistema de transmisión	46
3.3.	Sistema rotor o turbina eólica.....	47
3.4.	Sistema de control.....	48
3.5.	Torres de medición de variables eólicas	49
4.	INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	51
4.1.	Definición	51
4.2.	Objetos geográficos	51
4.3.	Funciones principales de un SIG	55
4.4.	Fases principales de un proyecto SIG.....	59
4.4.1.	Modelización del territorio.....	60
4.4.2.	Diseño de la base de datos	61
4.4.3.	Entrada y procesado de los datos	63

4.4.4.	Gestión de la base de datos	64
4.4.5.	Análisis geográfico.....	64
4.4.6.	Presentación de los resultados.....	67
4.5.	Justificación del empleo de un SIG	68
5.	RESULTADOS	69
5.1.	Zonas geográficas de alto potencial eólico.....	69
5.2.	Determinación de ubicación de parques eólicos	82
5.3.	Determinación de límites máximos de generación eólica	84
	CONCLUSIONES	89
	RECOMENDACIONES	91
	BIBLIOGRAFÍA	93
	APÉNDICES	95

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Organigrama subsector eléctrico	6
2.	Regiones de distribución por empresa distribuidora de energía eléctrica.....	8
3.	Generación por tipo de central generadora 2012.....	10
4.	Generación por tipo de combustible utilizado en 2012.....	12
5.	Distribución del consumo de energía 2012	13
6.	Flujo de energía 2012	14
7.	Participación en el consumo de energía	15
8.	Cuencas sedimentarias de Guatemala	17
9.	Áreas protegidas en Guatemala.....	18
10.	Mapa eólico de Guatemala	42
11.	Componentes de un sistema de energía eólica	43
12.	Tipo de torres	44
13.	Sistema de transmisión	47
14.	Ejemplo de hélices	48
15.	Representación raster y vectorial de objetos geográficos	54
16.	Esquema de un proyecto SIG	66
17.	Proyección mensual kWh en estación meteorológica Cuilco	70
18.	Dirección del viento en 2011 y 2012, estación meteorológica Cuilco..	71
19.	Proyección mensual kWh en estación meteorológica Chuitinamit	72
20.	Dirección del viento 2011 y 2012, estación meteorológica Chuitinamit	73
21.	Proyección mensual kWh en estación meteorológica Chinique	74

22.	Dirección del viento 2011 y 2012, estación meteorológica Chinique ...	75
23.	Proyección mensual kWh en estación meteorológica San Agustín Acasaguastlán	76
24.	Dirección del viento 2011 y 2012, estación meteorológica San Agustín Acasaguastlán	77
25.	Proyección mensual kWh en estación meteorológica Camotán	78
26.	Dirección del viento 2011 y 2012, estación meteorológica Camotán...	79
27.	Proyección mensual kWh en estación meteorológica Asunción Mita ..	80
28.	Dirección del viento 2011 y 2012, estación meteorológica Asunción Mita.....	81

TABLAS

I.	Generación 2012 por tipo de central generadora	9
II.	Generación por tipo de combustible utilizado. 2004-2012	11
III.	Consumo de energía anual en GWh.....	13
IV.	Potencial energético en Guatemala.....	21
V.	Centrales generadoras de energía renovable instaladas en Guatemala	22
VI.	Potencial energético estación meteorológica Cuilco.....	85
VII.	Potencial energético estación meteorológica Chuitinamit.....	85
VIII.	Potencial energético estación meteorológica Chinique.....	86
IX.	Potencial energético estación meteorológica San Agustín Acasaguastlán	86
X.	Potencial energético estación meteorológica Camotán	87
XI.	Potencial energético estación meteorológica Asunción Mita	87

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Área
A_T	Área barrida por el rotor
C_P	Coefficiente de potencia del rotor
ρ	Densidad
h	Hora
kg	Kilogramos
km	Kilómetros
kWh	Kilowatio por hora
MW	MegaWatio
m³	Metros cúbicos
%	Porcentaje
P	Potencia

r Radio

V Velocidad

GLOSARIO

Aerogenerador	Generador de energía eléctrica que es accionado por la fuerza del viento.
Anemómetro	Instrumento meteorológico utilizado para medir la velocidad de circulación del viento.
Área de barrido	Es el área que intercepta un aerogenerador de acuerdo con el diámetro de su rotor.
Curva de potencia	Relación entre la potencia de salida que puede generar un aerogenerador y la velocidad de viento.
Energía eólica	Es la energía que se puede obtener de la fuerza del viento.
Energía renovable	Energía que puede obtenerse de las fuentes naturales virtualmente inagotable, ya que contienen una inmensa cantidad de energía o pueden regenerarse naturalmente.
Fuerza de Coriolis	Fuerza inercial o aparente responsable de la desviación de la trayectoria de un cuerpo que se mueve sobre una superficie que rota.

INSIVUMEH	Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
Inversor	Dispositivo electrónico que convierte y amplifica corriente continua en alterna.
Raster	Malla o matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas (o una cuadrícula) en la que cada celda contiene un valor que representa información.
Regulador	Dispositivo electrónico diseñado para mantener un nivel de tensión constante.
Rosa de viento	Es una gráfica que muestra la frecuencia de ocurrencia de los viento en 16 sectores de dirección.
Rugosidad	Influencia de las irregularidades y de las condiciones del terreno sobre el comportamiento del viento.
Teoría de Betz	Esta teoría dice que puede convertirse $16/27$ o menos de la energía cinética del viento en energía mecánica usando un aerogenerador.
Vientos alisios	Vientos que soplan regularmente en los océanos Pacífico y Atlántico, en las zonas tropicales hacia el Ecuador.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación busca proveer una referencia para el aprovechamiento del recurso eólico para la generación de energía eléctrica que ayudaría a solucionar los problemas energéticos del país, reduciría la dependencia a los combustibles fósiles y los niveles de contaminación por emisiones de gases de efecto invernadero.

Se elaboró un sistema de información geográfica aplicado al desarrollo de energía eólica para identificar los puntos geográficos con mayor potencial eólico y proporcionar un punto de partida para el desarrollo de parques eólicos que se integren a los sistemas tradicionales de producción de energía, reduciendo los costos y contaminación o pequeños aerogeneradores como la minieólica Enair 70, que puede utilizarse para electrificación de comunidades en donde la grandes redes eléctricas no llegan debido a su ubicación geográfica.

Por medio de los informes históricos de treinta estaciones meteorológicas seleccionadas por su ubicación geográfica para cubrir la mayor parte del territorio del nacional, se creó una base de datos de los promedio mensuales de la velocidad y dirección del viento durante el 2011 y 2012. Con esta información se analizó y determinó el potencial eólico en las distintas estaciones seleccionadas, utilizando para ello un aerogenerador marca Vesta modelo V100-1.8MW que tiene un rango de operación de 3 m/s a 20 m/s.

La energía eólica en Guatemala puede ayudar a complementar a la energía hidroeléctrica existente, ya que en temporada seca se reduce la capacidad de generación de la energía hidroeléctrica y aumenta el potencial que tiene la energía eólica. Actualmente el complemento de la energía hidroeléctrica en temporada seca, es la energía generada por medio de combustibles fósiles lo cual provoca aumento en la tarifa eléctrica y mayores niveles de contaminación.

OBJETIVOS

General

Elaborar un sistema de información geográfica aplicado al desarrollo de energía eólica de Guatemala.

Específicos

1. Establecer el potencial eólico existente en las distintas regiones del país.
2. Crear una base de datos de la velocidad y dirección del viento en diferentes puntos geográficos del país.
3. Proponer posibles equipos para la utilización del potencial eólico existente.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad las emisiones de gases producidos por la quema de los combustibles fósiles utilizados en su mayoría para la generación de energía eléctrica, es un factor que afecta el medio ambiente; es por ello que se deben de aprovechar los recursos renovables con los que cuenta Guatemala.

Una forma de explotar dichos recursos, es la generación de energías renovables tal como la energía solar, eólica, hidráulica, geotérmica, mareomotriz y biomasa. La energía eólica es la energía obtenida del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire las cuales son transformadas por medio de aerogeneradores o turbinas eólicas, para generar energía eléctrica de manera limpia y renovable, con la cual se ayudará a la preservación de nuestro medio ambiente.

El aprovechamiento de los recursos energéticos renovables requiere de la realización de varias tareas en la que destaca: la determinación espacio-temporal de sus niveles de potencialidad energética dentro de un área determinada; esta tarea requiere de manejar y procesar información así como, presentar los resultados obtenidos dentro de un marco geográfico, esta información va descrita de manera mensual, estacional o anual. Un sistema de información geográfica (SIG) es un conjunto de métodos, herramientas y datos que están diseñados para actuar lógicamente y coordinadamente en la captura, almacenamiento, análisis, transformación y presentación de información especial.

1. CARACTERIZACIÓN DE ENERGÍA EN GUATEMALA

Se analizan los subsectores eléctrico, hidrocarburífero y de fuentes alternas y renovables de energía.

1.1. Regulaciones y marco legal del sector energético

La electrificación es un mandato constitucional, abordado en la Constitución Política de la República de la manera siguiente: “Declarar de urgencia nacional, la electrificación del país, con base en planes formulados por el Estado y las municipalidades, en el cual podrá participar la iniciativa privada” (artículo 129). El subsector eléctrico ha estado sujeto a un proceso de cambios y adaptaciones, a partir de la emisión de la Ley General de Electricidad, la cual fue aprobada el 15 de noviembre de 1996, el Reglamento de la misma fue aprobado el 2 de abril de 1997, con el propósito de liberalizar el desarrollo de las actividades del subsector.

Estos instrumentos jurídicos establecen el ambiente propicio para la competencia en la generación de electricidad, desmonopolizando el subsector, estableciendo además, claridad en la regulación y tarifas, asimismo se da la oportunidad para que desarrolladores privados participen en la generación, transmisión, distribución y comercialización de la electricidad.

En la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente (Decreto 68-86) se describen a grandes rasgos los componentes del ambiente y norma la obligatoriedad de presentar un Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental previo a realizar cualquier proyecto, obra, industria o cualquier otra actividad

que por sus características produzca deterioro a los recursos naturales. Esto afecta directamente a los proyectos de generación y transmisión de electricidad y a aquellos de distribución que podrían afectar zonas ambientalmente frágiles. Adicionalmente, el Decreto 68-86 ha sido reformado por el Decreto número 1-93, el cual establece una sanción a los funcionarios que aprueben la realización de proyectos sin exigir la presentación del Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA). En el subsector eléctrico, las empresas y los tipos de proyectos que necesitan EIA para su ejecución, están: las líneas de transmisión, plantas de generación de energía eléctrica y plantas geotermoeléctricas.

La Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) ha estado desarrollando un sistema de normas técnicas, operacionales y comerciales, las cuales en su conjunto definen el marco regulatorio que rige el subsector eléctrico. La labor de definición de normas ha sido prolífica, quedándole a CNEE que vela porque dicho normativo sea atendido para que los objetivos estratégicos asignados a la CNEE puedan lograrse.

El Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista (Acuerdo Gubernativo número 299-98) fue publicado el 25 de mayo de 1998. Este acuerdo contiene el Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista, estableciéndose sus funciones principales.

En la Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable (Decreto 52-2003), se declara de urgencia nacional el desarrollo racional de los recursos energéticos renovables, indicando que el Ministerio de Energía y Minas estimulará, promoverá, facilitará y creará las condiciones adecuadas para el fomento de inversiones que se hagan con este fin, a través de incentivos fiscales, económicos y administrativos.

Ley de Contrataciones del Estado (Decreto ley 57-92), esta ley regula todo lo concerniente a la compra y venta, y la contratación de bienes, suministros, obras y servicios que requieran los organismos del estado, sus entidades descentralizadas y autónomas, unidades ejecutoras, las municipalidades y las empresas públicas estatales o municipales.

El subsector de hidrocarburos está regido por la Ley General de Hidrocarburos, Decreto Ley 109-83, que regula y da seguimiento a las actividades exploratorias y de explotación de los yacimientos de hidrocarburos.

El aprovechamiento de las fuentes renovables de energía está regulado mediante la aplicación de la Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable (Decreto 52-2003) y su Reglamento. Ley del Alcohol Carburante y todas aquellas normativas relacionadas con las energías renovables. El Reglamento Técnico Centroamericano – RTCA – ha emitido el Reglamento sobre biocombustibles, especificaciones para el Biodiesel (B100) y sus mezclas con aceite combustible diésel.

El Marco de la Política del Ministerio de Energía y Minas constituyeron, junto con los objetivos estratégicos, la base fundamental con la que establecieron los objetivos operativos y actividades realizadas en el periodo 2005 a 2007.

El Marco de la Política del Ministerio es consecuencia de las directrices enunciadas por el Programa de Reactivación Económica y Social ¡Vamos Guatemala! El marco está constituido por las siguientes políticas:

- Velar por el cumplimiento de las leyes y reglamentos en las áreas de hidrocarburos, energía y minería.

- Formular y coordinar el marco de las políticas en las áreas de hidrocarburos, energía y minería.
- Formular planes indicativos para promover y facilitar la inversión privada, nacional e internacional, en las áreas de hidrocarburos, energía y minería, con énfasis en el aprovechamiento de las fuentes renovables y no renovables de energías, en concordancia con un desarrollo sostenible y preservando el medio ambiente.
- Orientar y facilitar el Plan de Electrificación Rural, y proyectos eléctricos para elevar el índice de electrificación a nivel nacional al 90 %.
- Impulsar la Interconexión Eléctrica Mesoamericana.
- Coordinar las actividades de hidrocarburos, energía, minería y ambientales del ministerio, con otros ministerios e instituciones nacionales e internacionales.
- Promover en las regiones la convergencia de las asimetrías regulatorias y de los mercados de hidrocarburos, energéticos y mineros.
- Atender las recomendaciones relativas al cambio climático, considerando el ámbito económico, regional y el entorno internacional.
- Promover la modernización del Ministerio y el desarrollo de la Planificación Estratégica.
- Divulgar las actividades e información de hidrocarburos, energía, minería y medio ambiente, para conocimiento y toma de decisiones.

El accionar del MEM es regido por la Constitución Política de la República, según los artículos 125 y 129 que textualmente dicen:

Artículo 125. “Explotación de recursos naturales no renovables. Se declara de utilidad y necesidad públicas, la explotación técnica y racional de hidrocarburos, minerales y demás recursos naturales no renovables.”

Artículo 129. “Electrificación. Se declara de urgencia nacional, la electrificación del país, con base en planes formulados por el Estado y las municipalidades, en la cual podrá participar la iniciativa privada.”

Además se rige por la Ley del Organismo Ejecutivo (Decreto 114-97). Artículo 34. “Ministerio de Energía y Minas. Le corresponde atender lo relativo al régimen jurídico aplicable a la producción, distribución y comercialización de la energía y de los hidrocarburos, y a la explotación.”

1.2. El subsector eléctrico

La Ley General de Electricidad determina con claridad los aspectos asociados con la rectoría, la facilitación, la regulación y la coordinación comercial de las actividades del subsector eléctrico y las sustenta en un marco institucional conformado por tres entidades: el Ministerio de Energía y Minas (MEM); la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE); y el Administrador del Mercado Mayorista (AMM); la cual garantizan que los generadores y consumidores obtengan las señales correctas para el funcionamiento eficiente del mercado eléctrico.

Figura 1. Organigrama subsector eléctrico



Fuente: Ministerio de Energía y Minas. *Guía del subsector eléctrico y de energías renovables*. p. 6.

1.2.1. Marco institucional actual

El Ministerio de Energía y Minas (MEM) es la autoridad máxima en el subsector eléctrico, encargado de dar las autorizaciones para generar, transportar y distribuir energía eléctrica. Su función primordial es facilitar la realización de inversiones privadas en las diversas actividades del subsector, alentar el estudio y utilización de los recursos renovables, gestionar la adquisición de préstamos y donaciones en beneficio de la electrificación rural, y seguir promoviendo los cambios estructurales en las empresas eléctricas estatales con el objetivo de lograr la maximización de la eficiencia dentro de un marco empresarial.

Además, el MEM tiene como objetivo coadyuvar con las entidades responsables en el establecimiento de regulaciones ambientales, para alcanzar un desarrollo eléctrico ambientalmente sustentable.

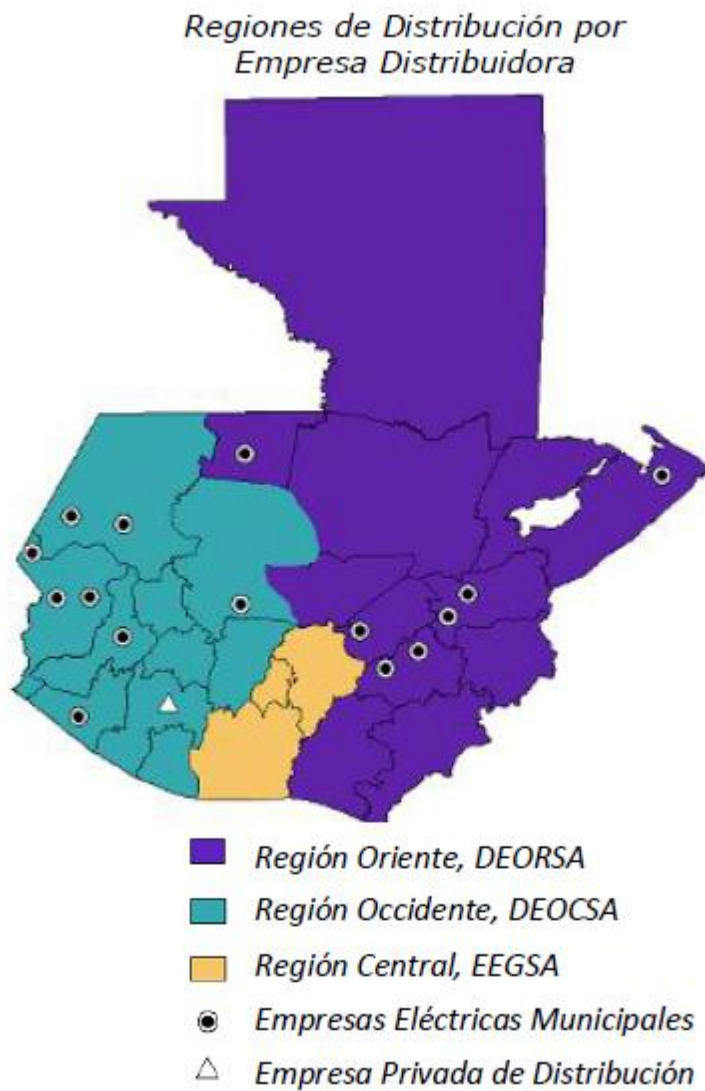
La Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) es un organismo técnico del Ministerio de Energía y Minas, con independencia funcional, encargado de formular, implantar y fiscalizar el marco regulatorio que define las reglas del juego para el desarrollo de las actividades inherentes al subsector eléctrico y la actuación de los agentes económicos que intervienen en el mismo.

El Administrador del Mercado Mayorista (AMM) integra generadores, transportistas, distribuidores, comercializadores, importadores, exportadores y Grandes Usuarios de electricidad. Los agentes que intervienen en el AMM son:

- Empresas generadoras (aproximadamente 45)
- Empresas comercializadoras (16 empresas)
- Empresas transportistas (INDE, TRELEC, RECSA, TREO, Transnova, TRECSA, EPR y DUKE Energy International Transmision Guatemala)
- Empresas distribuidoras (DEOCSA, DEORSA, EEGSA y EMMs)

En la figura 2 se muestra la distribución de las empresas DEORSA, DEOCSA, EEGSA, Empresas Eléctricas Municipales y Distribuidoras Privadas en todo el territorio nacional.

Figura 2. **Regiones de distribución por empresa distribuidora de energía eléctrica**



Fuente: Ministerio de Energía y Minas. *Guía del subsector eléctrico y de energías renovables.*

p. 12.

1.2.2. Generación de energía en Guatemala

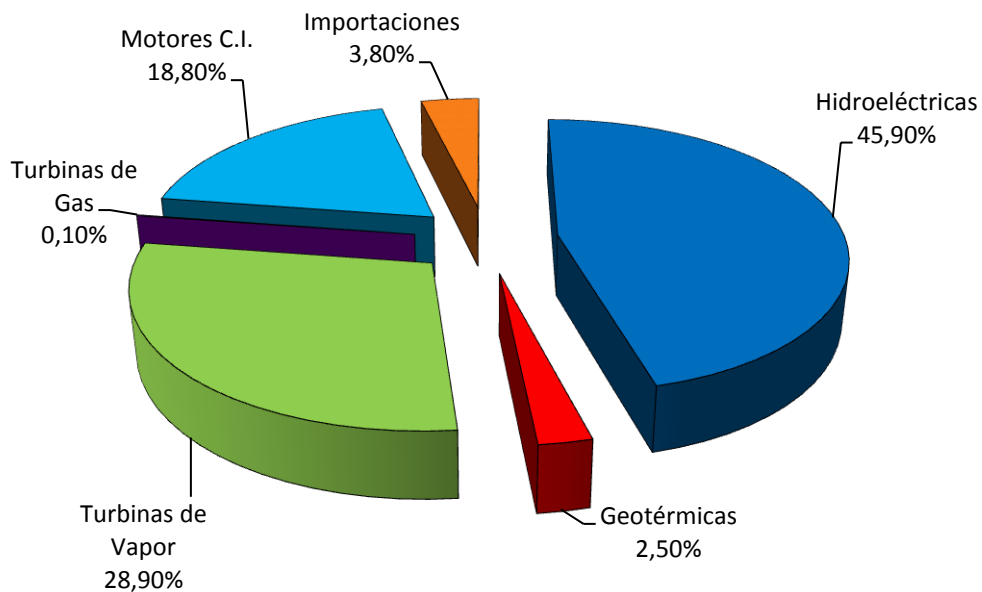
En Guatemala existen 5 tipos de centrales generadoras de energía, las cuales se pueden clasificar como públicas o privadas, En la tabla siguiente se muestra la generación por tipo de central para el 2012, en la que se observa que el 45,9 % de la producción provino de centrales hidroeléctricas, de centrales geotérmicas el 2,5 %, el 18,8 % de motores de combustión interna, de turbinas de vapor el 28,9 %, el 0,01 % de las turbinas de gas y el 3,8 % restante suministrado fue por medio de importaciones ya que en el 2010 entro en operación la interconexión Guatemala - México. Se puede apreciar que las hidroeléctricas son las mayores centrales generadoras de energía con un 45,9 %.

Tabla I. **Generación 2012 por tipo de central generadora**

Tipo de Central	GWh	%
Hidroeléctricas	4,457.5	45.9
Geotérmicas	245.6	2.5
Turbinas de Vapor	2,802.0	28.9
Turbinas de Gas	8.9	0.1
Motores C.I.	1,819.9	18.8
Importaciones	371.8	3.8
Total	9,705.8	100.0

Fuente: Ministerio de energías y Minas. *Estadísticas energéticas subsector eléctrico 2012*. p. 7.

Figura 3. **Generación por tipo de central generadora 2012**



Fuente: Ministerio de Energías y Minas. *Estadísticas energéticas subsector eléctrico 2012*. p. 7.

En la tabla II se observa como la generación de energía a partir de bagazo de caña, carbón mineral y de hidroenergía ha ido aumentando año con año en los 3 sistemas de generación de energía del país. Cabe mencionar que la hidroenergía en los autoprodutores comenzó a generar energía en el año 2006. La generación por *fuel oil* no ha variado mucho dentro del sistema nacional interconectado, lo contrario se observa en el sistema aislado, donde la generación por este tipo de energético está disminuyendo prácticamente a cero.

Tabla II. **Generación por tipo de combustible utilizado. 2004-2012**

SISTEMA ELECTRICO NACIONAL

Tipo de energético	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Hidroenergía	2,565.4	2,939.0	3,302.5	3,030.6	3,674.8	2,941.9	3,849.1	4,175.5	4,379.1
Geoenergía	219.1	165.8	163.2	263.1	294.2	386.6	271.0	245.7	245.6
Bagazo de Caña	660.0	716.6	777.2	876.4	861.5	1,113.9	1,558.1	1,493.6	1,593.9
Carbón Mineral	1,116.4	1,064.8	1,102.5	1,128.9	1,138.8	732.5	1,169.9	1,189.9	1,237.9
Fuel Oil	2,146.1	2,125.2	2,533.7	3,434.6	2,729.3	3,834.8	2,039.3	2,042.9	1,858.2
Diesel Oil	36.7	20.2	12.9	22.6	18.7	36.4	5.6	32.3	8.9
Orimulsión	947.8	1,017.1	273.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total	7,691.4	8,048.7	8,165.1	8,756.2	8,717.4	9,046.0	8,893.0	9,179.8	9,323.7

SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO

Tipo de energético	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Hidroenergía	2,564.5	2,938.2	3,277.8	3,006.9	3,651.1	2,918.6	3,825.8	4,152.3	4,434.9
Geoenergía	219.1	165.8	163.2	263.1	294.2	386.6	271.0	245.7	245.6
Bagazo de Caña	418.2	473.7	543.9	602.2	568.0	691.0	925.2	931.8	996.5
Carbón Mineral	1,116.4	1,064.8	1,102.5	1,128.9	1,138.8	732.5	1,169.9	1,189.9	1,237.9
Fuel Oil	1,973.3	1,776.4	2,314.3	3,133.8	2,449.7	3,484.0	1,960.8	1,940.3	1,767.7
Diesel Oil	5.1	10.6	10.6	17.8	13.8	31.5	5.6	32.3	8.9
Orimulsión	947.8	1,017.1	273.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total	7,244.2	7,446.7	7,685.5	8,152.7	8,115.7	8,244.2	8,158.4	8,492.3	8,691.6

SISTEMA AISLADO

Tipo de energético	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Hidroenergía	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Fuel Oil	19.6	43.5	65.6	101.6	101.6	71.5	0.0	0.0	0.0
Diesel Oil	31.5	9.6	2.3	4.9	4.9	4.9	0.0	0.0	0.0
Totales	52.1	53.9	68.7	107.3	107.3	77.2	0.9	0.9	0.9

AUTOPRODUCTORES

Tipo de energético	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Hidroenergía	0.0	0.0	23.8	22.8	22.8	22.4	22.4	22.4	22.6
Fuel Oil	153.3	305.3	153.8	199.3	178.0	279.3	78.4	102.5	90.5
Bagazo de Caña	241.8	242.8	233.2	274.2	293.5	422.9	632.9	561.8	597.4
Totales	395.1	548.1	410.9	496.3	494.4	724.5	733.7	686.7	710.5

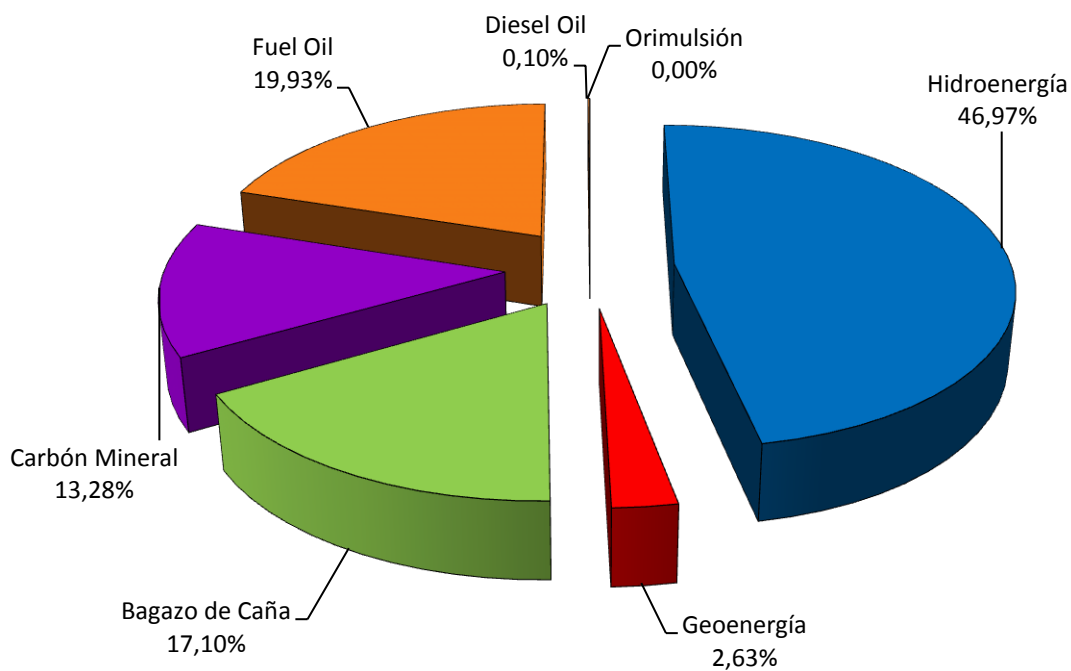
GENERACION ELECTRICA POR TIPO DE RECURSO

Tipo de energético	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Renovable	3,444.4	3,821.4	4,242.9	4,170.1	4,830.5	4,442.4	5,678.2	5,914.9	6,218.6
No Renovable	4,246.9	4,227.3	3,922.3	4,586.1	3,886.8	4,603.6	3,214.8	3,265.0	3,105.1
Totales	7,691.4	8,048.7	8,165.1	8,756.2	8,717.4	9,046.0	8,893.0	9,179.8	9,323.7

Fuente: Ministerio de Energías y Minas. *Estadísticas energéticas subsector eléctrico 2012.*

En la figura 4 se muestran los porcentajes de generación por tipo de energético del 2012. Como se observa, la hidroenergía muestra el mayor porcentaje de generación con un 46,97 % y la orimulsión el menor porcentaje con un 0,0 % del total de generación en el 2012.

Figura 4. **Generación por tipo de combustible utilizado en 2012**



Fuente: Ministerio de Energías y Minas. *Estadísticas energéticas subsector eléctrico 2012*.

p. 11.

1.2.3. Consumo de energía en Guatemala

Para el consumo se considera los consumos propios de cada central generadora para su operación, las pérdidas de energía, la energía vendida por cada empresa de distribución y el consumo de los grandes usuarios independientes o bien a través de una empresa comercializadora.

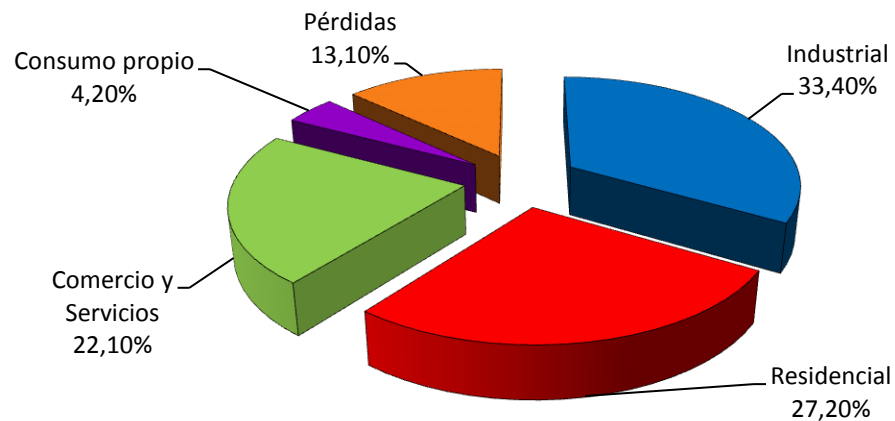
Tabla III. **Consumo de energía anual en GWh**

Actividad	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Industrial	2,254.1	2,412.5	2,692.3	2,678.2	2,921.8	2,806.3	3,010.9	3,054.0	3,121.6	3,126.3
Residencial	1,840.8	1,959.7	1,730.8	2,271.1	2,332.5	2,407.1	2,435.9	2,470.5	2,525.2	2,545.9
Comercio y Servicios	1,526.5	1,552.7	1,622.2	1,253.6	1,924.8	1,964.0	1,993.7	2,023.8	2,068.6	2,068.6
Consumo Propio	13.3	15.0	22.5	40.7	257.5	252.9	321.3	381.1	344.0	393.1
Pérdidas	1,030.9	1,093.3	1,441.8	945.8	1,195.9	1,215.8	1,227.3	1,186.9	1,258.8	1,226.2
Total	6,665.6	7,033.1	7,509.5	7,189.4	8,632.5	8,646.1	8,989.1	9,116.3	9,318.2	9,360.1

Fuente: Ministerio de Energías y Minas. *Estadísticas energéticas subsector eléctrico 2012*.

p. 8, 9.

Figura 5. **Distribución del consumo de energía 2012**



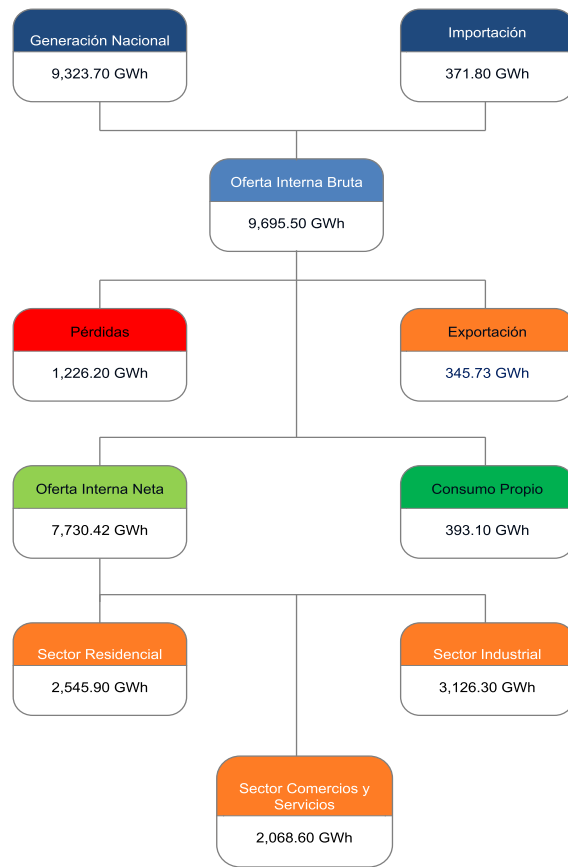
Fuente: Ministerio de Energías y Minas. *Estadísticas energéticas subsector eléctrico 2012*.

p. 14.

En la figura 6 se muestra el flujo de energía eléctrica en el 2012. Se presenta la composición de la oferta interna bruta de energía eléctrica, que está constituida por la generación del Sistema Eléctrico Nacional y por la importación de energía; también se muestran los valores de las pérdidas de energía y de las exportaciones de energía eléctrica; finalmente, se visualiza la desagregación

por sector el consumo de energía, el cual está constituido por los sectores residencial, industrial, y el de servicios y consumo.

Figura 6. **Flujo de energía 2012**



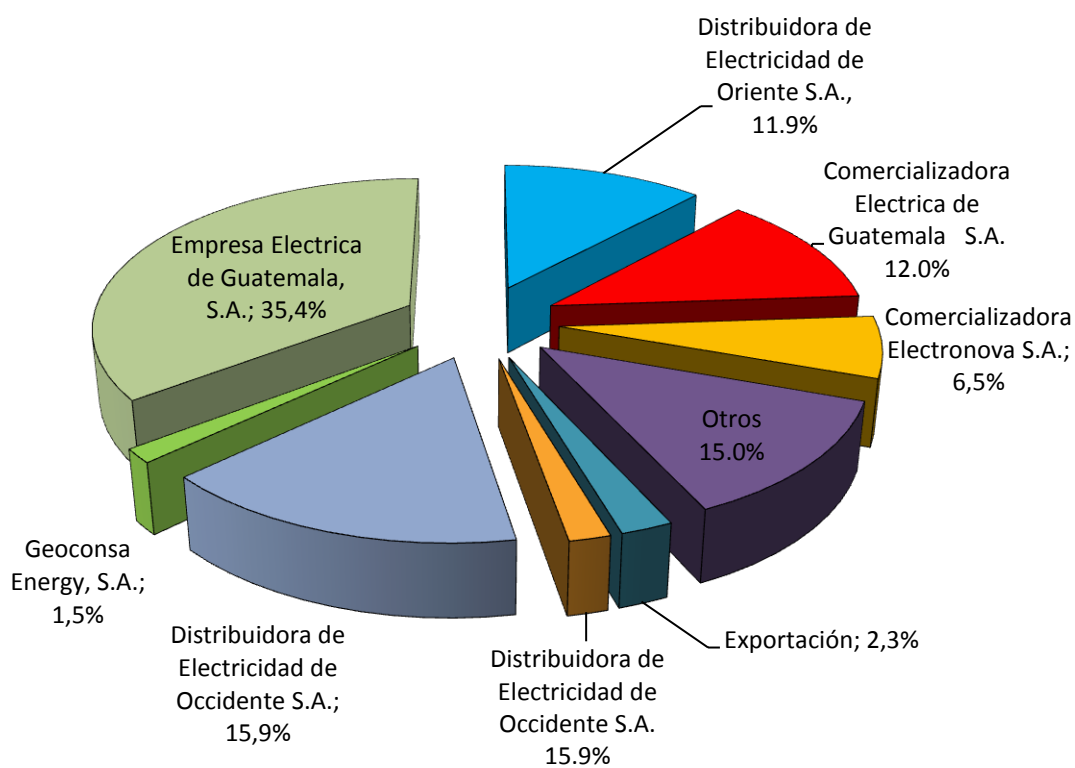
Fuente: Ministerio de Energías y Minas. *Estadísticas energéticas subsector eléctrico 2012*.

p. 10.

Entre las principales empresas, distribuidoras, comercializadoras y demás entidades que participan en el consumo de la energía eléctrica en Guatemala se encuentra que la Empresa Eléctrica de Guatemala (EEGSA) consume un total del 35,4 % entre su tarifa social y no social, un 15,9 % es consumido por la

Distribuidora de electricidad de Occidente (DEOCSA), un 11,9 % por la Distribuidora de Electricidad de Oriente (DEORSA) y un 2,27 % es exportado. El resto del consumo se divide entre municipalidades, comercializadoras y otras empresas, como se muestra en la figura 7

Figura 7. Participación en el consumo de energía



Fuente: elaboración propia, datos administrador del mercado mayorista, Informe Estadístico Anual 2012.

1.3. El subsector de hidrocarburos

A continuación se realiza un análisis de la situación actual del subsector de hidrocarburos en Guatemala.

1.3.1. Marco institucional actual

La entidad encargada del subsector de hidrocarburos es el Ministerio de Energía y Minas, a través de la Dirección General de Hidrocarburos, la cual se encarga de normar las actividades de exploración, explotación, transporte, transformación de hidrocarburos, la comercialización de los productos derivados del petróleo, gas natural y otros hidrocarburos. Se rige por la Ley de Comercialización de Hidrocarburos, Decreto Número 109-97 y su reglamento Acuerdo Gubernativo 522-99, y la exploración y explotación de hidrocarburos se rige por la Ley de Hidrocarburos Decreto Ley Número 109-83, y su reglamento, Acuerdo Gubernativo 1034-83, sin embargo, existen otros reglamentos que regulan actividades específicas. Dicha normativa creó los mecanismos para estimular la inversión en operaciones petroleras en el país.

Regula a la vez la participación de las diferentes empresas dedicadas a la importación y comercialización de hidrocarburos, así como de gas licuado de petróleo.

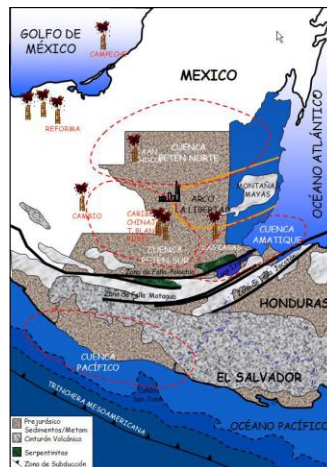
1.3.2. Políticas públicas

Promover el desarrollo y aprovechamiento racional de los yacimientos hidrocarburíferos con que cuenta el país, estableciendo una política petrolera orientada a tener mejores resultados en la exploración y explotación de los recursos, con el objeto de lograr la independencia energética del país y el autoabastecimiento de hidrocarburos.

1.3.3. Situación actual

Guatemala cuenta con cuatro cuencas sedimentarias de interés hidrocarburífero que son: La cuenca Petén Norte o Paso Caballos, la cuenca Petén Sur o Chapayal, la cuenca de Amatique y la cuenca del Pacífico, las tres primeras se ubican al norte del país, donde se encuentra la mayor biodiversidad, por lo que varias localidades han sido declaradas áreas protegidas, y vestigios de culturas antiguas con que cuenta el país. A continuación se presentan las figura 8 sobre las cuencas sedimentarias del país, y la figura 9 sobre las áreas declaradas protegidas donde se extrae petróleo.

Figura 8. **Cuencas sedimentarias de Guatemala**

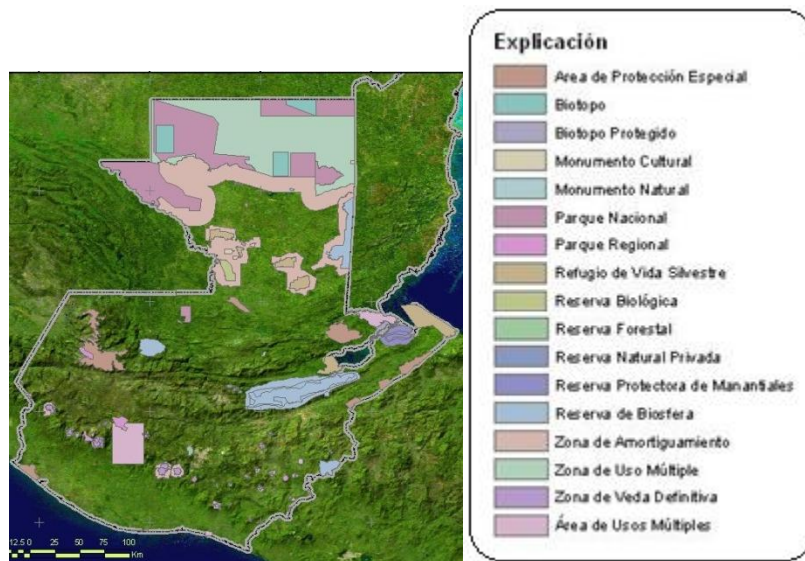


Fuente: Dirección General de Hidrocarburos.

Todos los campos petroleros actualmente activos se localizan en la Cuenca Petén. En la parte norte de la cuenca la gravedad del petróleo es alrededor de 16o API, mientras que en la parte sur, los campos petroleros tienen gravedades del orden de 22o - 38o API. En la cuenca de Amatique

existen varios manaderos de petróleo que indican la presencia de hidrocarburos en el subsuelo. La cuenca Pacífica es una cuenca terciaria de más de 10 000 pies de espesor, donde se han reportado muestras de gas.

Figura 9. **Áreas protegidas en Guatemala**



Fuente: <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2012/05/4.-%C3%81reas-protegidas.jpg>.

Consulta: agosto de 2013.

1.4. **El subsector de energías renovables**

A continuación se realiza un análisis de la situación actual del subsector de energías renovables en Guatemala.

1.4.1. Marco institucional

La entidad encargada del subsector de Fuentes Renovables de Energía es el Ministerio de Energía y Minas, a través de la Dirección General de Energía, a su vez del Departamento de Energías Renovables.

1.4.2. Políticas públicas

La Dirección de Energía tiene como visión coadyuvar al desarrollo energético para fortalecer el crecimiento económico y social del país, para lo cual tiene como misión contribuir al desarrollo energético sustentable, impulsando el suministro y utilización eficiente y competitiva de la energía eléctrica, de las energías renovables, y de los usos pacíficos de la energía nuclear, con la finalidad de apoyar la sustentabilidad económica, social y ambiental del país.

El Ministerio de Energía y Minas ha tomado acciones técnicas, con el fin de estimular el aprovechamiento de las fuentes alternas de energía, entre las que destacan las siguientes:

- Creación del centro de información y promoción de recursos renovables.
- Programa de identificación, localización y evaluación del potencial energético renovable.
- Programa de promoción de proyectos energéticos.

1.4.3. Participación de las energías renovables en el sector energético de Guatemala

Para el 2012, como lo muestra la figura 4, el aporte de las energías renovables con la hidroenergía y el bagazo de caña son de las principales productoras de energía a nivel nacional. Razón por la cual es importante continuar con la implementación de energías renovables como la eólica que puede ser el complemento perfecto de la hidroenergía en temporada seca, ya que cuenta con un valioso potencial.

Las energías a partir del viento, el sol, residuos urbanos y agrícolas no se toman en cuenta dentro del balance energético nacional ya que solo se trabajan a pequeña escala y no se ha contabilizado su aportación al sistema energético nacional.

La principal importancia de estas fuentes energéticas, no es solo su aporte al sistema nacional, sino más bien que representan la posibilidad de abastecer a las poblaciones rurales y muy lejanas del sistema nacional interconectado, además son de bajo impacto ambiental, por lo que en la electrificación rural han jugado y seguirán jugando un papel muy importante.

Las implicaciones socioeconómicas del uso de las fuentes renovables de energía son muy altas para las regiones aisladas, sobre todo cuando se buscan desarrollos tecnológicos apropiados para aprovechar de forma más económica y eficiente los recursos energéticos renovables que sean aprovechables.

1.5. Desarrollo del sector de energías renovables

Guatemala cuenta con considerable cantidad de recursos energéticos y por consiguiente un potencial para aprovecharlos, como lo muestra la tabla 7.6, en donde se observa a la energía eólica con uno de los mayores potenciales pero no siendo utilizado. Por lo que a la fecha no han sido aprovechados intensamente.

El gobierno a través del Decreto Número 52-2003 (Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable) busca la electrificación del país a través de los recursos naturales renovables suficientes en cantidad y calidad, creando condiciones adecuadas para el fomento de inversiones que se hagan con este fin.

Tabla IV. **Potencial energético en Guatemala**

Recurso	Potencial MW	Utilizado MW	Porcentaje Utilizado
Hidroeléctrico	6000 MW	900 MW	15%
Geotérmico	1000 MW	50 MW	5%
Eólico	280 MW	0	0%
Solar	5.3Kwh/m ² /día	n/c	Utilizado en sistemas aislados
Biomásico	n/c	306.5 MW	n/c

Fuente: Segeplan. Política energética 2013-2027. p. 15

En la tabla V se muestran las centrales generadoras de energía renovable instaladas en Guatemala.

Tabla V. **Centrales generadoras de energía renovable instaladas en Guatemala**

PLANTAS GENERADORAS	UNIDADES	POTENCIA MW		FECHA DE INSTALACIÓN	UBICACIÓN	
		DE PLACA	EFFECTIVA		MUNICIPIO	DEPARTAMENTO
HIDROELÉCTRICAS		987.96	941.58			
CHIXOY	5	300.00	280.98	27 de noviembre de 1983	San Cristóbal	Alta Verapaz
HIDRO XACBAL	2	94.00	97.05	8 de agosto de 2010	Chajul	Quiché
PALO VIEJO	2	85.00	86.301	31 de mayo de 2012	San Juan Cotzal	Quiché
AGUACAPA	3	90.00	79.76	22 de febrero de 1982	Pueblo Nuevo Viñas	Santa Rosa
JURÚN MARINALÁ	3	60.00	61.66	12 de febrero de 1970	Palín	Escuintla
RENACE	3	68.10	66.72	Marzo de 2004	San Pedro Carchá	Alta Verapaz
EL CANADÁ	2	48.10	47.20	Noviembre de 2003	Zunil	Quetzaltenango
LAS VACAS	2	39.00	35.85	Mayo de 2002	Chinautla	Guatemala
EL RECREO	2	26.00	26.13	Jul-07	El Palmar	Quetzaltenango
SECACAO	1	16.50	16.23	Julio de 1998	Senahú	Alta Verapaz
LOS ESCLAVOS	2	15.00	13.23	17 de agosto de 1966	Cuilapa	Santa Rosa
MONTECRISTO	2	13.50	13.18	Mayo de 2006	Zunil	Quetzaltenango
PASABIEN	2	12.75	12.15	22 de junio de 2000	Río Hondo	Zacapa
MATANZAS	1	12.00	11.78	1 de julio de 2002	San Jerónimo	Baja Verapaz
POZA VERDE	3	12.51	9.85	22 de junio de 2005	Pueblo Nuevo Viñas	Santa Rosa
RIO BOBOS	1	10.00	10.36	10 de agosto de 1995	Quebradas, Morales	Izabal
CHOLOMA	1	9.70	9.65	11 de diciembre de 2011	Senahú	Alta Verapaz
SANTA TERESA	2	17.00	16.69	9 de octubre de 2011	Tucurú	Baja Verapaz
PANAN	3	7.32	7.68	18 de septiembre de 2011	San Miguel Panán	Suchitepequez
SANTA MARÍA	3	6.00	5.86	25 de junio de 1927	Zunil	Quetzaltenango
PALÍN 2	2	5.80	-	Julio de 2005	Palín	Escuintla
GEOTÉRMICAS		49.2	31.7			
ZUNIL	7	24	13.89	4 de agosto de 1999	Zunil	Quetzaltenango
ORTITLAN	3	25.2	17.81	01 de julio de 2007	San Vicente Pacaya	Escuintla

Fuente: Ministerio de Energías y Minas. *Estadísticas Energéticas Subsector eléctrico 2012.*

p. 25, 29.

2. ENERGÍA EÓLICA

2.1. El recurso del viento

La superficie de la tierra está formada de desiertos, océanos y terrenos montañosos que absorben la energía solar en distintas magnitudes, debido a esto, la superficie de la tierra se calienta en forma irregular. Las regiones alrededor de Ecuador, a la latitud de 0° , se calientan más por el sol que el resto del planeta, debido a que el aire caliente es más ligero que el aire frío, se eleva a una altura de aproximadamente 10 kilómetros y se comienza a dispersar a través del norte y del sur. Si la tierra no girará, este aire caliente pasaría a los polos norte y sur, y gradualmente retomarí­a el ecuador; sin embargo, debido a la rotación de la tierra, el viento es desviado hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur, esta fuerza de curvatura se conoce como fuerza de Coriolis.

La fuerza de curvatura (Coriolis) afecta la formación de los vientos globales, previene que la elevación del aire caliente en el Ecuador se mueva demasiado lejos, en la latitud de 30 grados en ambos hemisferios, el aire se comienza a enfriar formando una zona de alta presión en estas áreas. En el Ecuador hay una zona de baja presión, cerca del nivel de suelo, debido a la elevación del aire caliente y a los polos, hay un área de alta presión por el enfriamiento del aire. A los vientos antes mencionados, se les llama también “vientos geostró­ficos”, dependen principalmente de las diferencias de temperatura sobre la tierra, no están afectados en forma notable por la superficie irregular de la tierra. El viento geostró­fico se encuentra a alturas sobre 1 000 m sobre el nivel de la tierra, para alturas menores (hasta 100 m) la

rugosidad y obstáculos de la superficie de la tierra entran en juego, los vientos en este nivel se llaman los vientos superficie.

Los vientos locales también juegan un papel importante en la determinación de la dirección y velocidad del viento en el área dada. La dirección del viento en cualquier localidad es la combinación de los vientos globales prevalentes y los vientos locales en esta área. En algunos casos, el viento local puede jugar un papel mayor que el de los vientos globales (de gran escala).

2.1.1. El viento como fuente de energía

El viento es el resultado del movimiento de masas de aire en la atmósfera. Este movimiento es causado principalmente por la radiación solar, la cual es absorbida y reflejada en forma distinta por las diferentes capas de la atmósfera y por los diferentes tipos de superficies existentes sobre la tierra. De este modo, la atmósfera se calienta en forma desigual, originando la circulación por convección.

Este hecho se manifiesta a nivel planetario, con un mayor calentamiento del aire en las zonas tropicales que lo hacen ascender y su lugar es ocupado por aire más frío proveniente de los polos. Esta acción se combina con la rotación de la tierra y la fuerza de la gravedad contribuyendo a la formación de los vientos.

La energía eólica tiene su origen en la solar, específicamente en el calentamiento diferencial de masas de aire por el sol, ya sea por diferencias de latitud (vientos globales) o el terreno (mar-tierra o vientos locales). Las diferencias de radiación entre distintos puntos de la tierra generan diversas áreas térmicas y los desequilibrios de temperatura provocan cambios de densidad en las masas de aire que se traducen en variaciones de presión.

Como consecuencia de esta desigualdad de presiones se producen movimiento de las masas de aire, desde las zonas de alta presión a las zonas de baja presión; asociado al movimiento de una masa hay energía, denominada energía cinética, que depende de su masa y su velocidad.

De los sistemas de vientos globales, uno de los más importantes es el de los alisios, el cual tiene su origen en el mayor calentamiento de la región ecuatorial. En general, este sistema es activo entre las latitudes de 30 grados norte y sur, por lo que es de alta relevancia para la región de América Central.

La dirección del viento está determinada por efectos topográficos y por la rotación de la tierra. Es de gran importancia el conocimiento de las direcciones dominantes para la instalación de aerogeneradores para producir energía eléctrica proveniente de este recurso.

La energía eólica consiste en el aprovechamiento que realiza el hombre de la energía del viento. La energía eólica ha sido aprovechada desde la antigüedad para mover barcos impulsados por velas o hacer funcionar molinos de grano. Hoy se emplea sobre todo para generar energía limpia y segura, a través de aerogeneradores o generadores eólicos, que consisten en un sistema mecánico de rotación, provisto de palas que a través de un generador producen energía eléctrica.

Los aerogeneradores tienen diversos usos, y pueden satisfacer demandas de pequeña potencia o agruparse y formar granjas eólicas (cuando los generadores de energía eólica se instalan en filas) conectados al sistema eléctrico nacional.

2.1.2. Aplicaciones de viento

El viento puede ser aprovechado en general para las siguientes aplicaciones:

- Aplicaciones mecánicas

La aplicación mecánica más frecuente de la energía eólica es el bombeo de agua, para lo cual son especialmente adecuadas las turbinas de baja potencia. Esta aplicación demanda un alto par de arranque y de una baja velocidad específica de viento, por lo que esta aplicación se le conoce como un “Sistema Eólico Lento”.

Los sistemas mecánicos operan prácticamente con la misma tecnología, desarrollada en el siglo IX, mientras que los nuevos están más adaptados a la variabilidad del viento. También se usan aerogeneradores para el bombeo de agua, los que generalmente no requieren de baterías o acumuladores para almacenar la energía producida por el aerogenerador.

Al comparar los sistemas mecánicos y eléctricos para bombeo de agua, se puede decir que los primeros son más baratos y que pueden operar a velocidades del viento más bajas; adicionalmente, su mantenimiento es más simple y barato. Los sistemas eléctricos tienen la ventaja de que el

aerogenerador no tiene que instalarse en el sitio del pozo de agua, sino que puede ser en un punto donde haya más viento.

Generación de energía eléctrica en sistemas aislados

La producción de energía eléctrica, puede ser aprovechada para usos productivos y para el uso en viviendas que se encuentran alejadas del Sistema Nacional Interconectado, para lo cual existen diferentes configuraciones tales como:

Sistemas Individuales: estos sistemas consisten en el aprovechamiento del viento para la generación de energía eléctrica para una vivienda. Generalmente, estos sistemas consisten en un pequeño aerogenerador, con una o varias baterías dependiendo de las cargas que se tengan que alimentar, para almacenar la energía generada y un regulador que controla la carga y descarga de las baterías. Dependiendo del tipo de la aplicación, se puede incluir un inversor para transformar la electricidad de corriente directa en alterna (110 voltios).

Sistemas centralizados: estos sistemas consisten en la satisfacción de la demanda de energía eléctrica de una comunidad. En estos sistemas la generación de energía eléctrica a través del aerogenerador, es almacenada y transformada en un “Sistema Eólico Central” y que luego se distribuye, a través de redes de distribución hasta cada una de las viviendas. Generalmente este tipo de sistemas cuenta con más de una fuente de generación, con el objetivo de lograr una mayor confiabilidad del sistema.

Sistemas híbridos: pequeños aerogeneradores brindan una solución atractiva para la electrificación rural, en comunidades aisladas del Sistema

Nacional Interconectado, por su operación económica y simple. Sin embargo, la fluctuación del viento no permite obtener una generación de electricidad constante, por esta razón, frecuentemente, se usa un aerogenerador o aerogeneradores en combinación con otra fuente de generación eléctrica, por ejemplo, sistemas fotovoltaicos, un generador eléctrico a base de combustible diésel. Este tipo de sistema se llama un “Sistema Híbrido”, la mayor ventaja de estos sistemas es que provee mayor confiabilidad para el suministro de energía eléctrica comparado con un sistema individual. La combinación del aprovechamiento del viento por medio de aerogeneradores con sistemas fotovoltaicos es muy apropiada para comunidades aisladas del sistema eléctrico convencional, porque no requieren de la compra y transporte de combustibles como el diésel.

Comunicación: el aprovechamiento del viento, resulta también de interés en la navegación, las repetidoras de radio y televisión y en las estaciones meteorológicas. Este tipo de aplicaciones generalmente, se da en este tipo de aplicaciones, cuando estos se encuentran alejados del suministro de la red de distribución eléctrica.

2.1.3. Formación de vientos globales

Debido a la curvatura de la tierra y su rotación alrededor de un eje inclinado, la cantidad de energía solar que alcanza la superficie de la tierra varía en distintos sitios. En adición a esto, la cantidad de irradiación varía con las estaciones, la superficie de la tierra absorbe esta energía calorífica radiada y re-radiada hacia la atmósfera en longitudes de onda grandes.

La atmósfera se calienta principalmente debido a la liberación del calor latente del vapor de agua combinado con la mezcla turbulenta vertical, esto sucede principalmente en las regiones tropicales donde la temperatura y niveles de vapor son altos. Para mantener un equilibrio de calor, este es transportado de las latitudes cercanas al Ecuador a las latitudes cercanas a los Polos. Los sistemas de viento de gran escala actúan como medio de transporte para este calor y ayudan a mantener el equilibrio del mismo, a este fenómeno se le conoce como Circulación de Hadley.

2.1.4. El viento en Guatemala

Guatemala se encuentra afectado por el patrón de los vientos alisios. Estos vientos se desplazan con una componente del Norte (puede ser NNE, NE, NNO) durante los meses de octubre, noviembre, diciembre, enero y febrero; debido a un sistema de alta presión que se ubica por esa época en la parte central de los Estados Unidos Norteamericanos y la prolongación de este sistema de presión a través del golfo de México y la península de Yucatán (en la República Mexicana), el viento penetra al territorio del golfo de México por el departamento de Izabal y se encañona entre las Sierras del Merendón y Las Minas.

Estos hacen que los vientos se aceleren y registren velocidades un poco más altas en el oriente del país. Estos vientos pasan a la zona central y se dirigen a la parte noroeste del país disminuyendo considerablemente su velocidad, el área cubierta por estos vientos estaría comprendida entre la Sierra de los Cuchumatanes y el Pie del Monte de la Costa Sur.

Durante los meses de marzo a junio, el viento mantiene un componente sur, por la presencia de sistemas de baja presión ubicados a lo largo del océano Pacífico que son responsables de gobernar la circulación o flujo del viento. Cuando estos sistemas de presión son lo suficientemente grandes, hacen que el viento logre rebasar los macizos montañosos del Pie de Monte y la Sierra de los Cuchumatanes, llegando hasta los departamentos de Alta Verapaz, Huehuetenango y Quiché.

En los restantes meses de julio a septiembre, el viento también mantiene una componente norte, debido a la presencia del anticiclón semipermanente del Atlántico, que mantiene un flujo a través del departamento de Izabal; excepto en situaciones donde aparecen los huracanes o tormentas tropicales que hacen que el flujo cambie completamente, pero ello, es forma transitoria.

Existen lugares que han sido evaluados, lográndose llevar los estudios a nivel de factibilidad. Dentro estos estudios se encuentra el proyecto eólico Buenos Aires, con una potencia de 15 MW y una producción en promedio anual de energía de 40 GWh. Este proyecto se encuentra en el lado sur oriente del departamento de Guatemala, en la falda del volcán de Pacaya y a 35 kilómetros de la ciudad capital de Guatemala.

En el documento denominado Plan de Negocios, del Proyecto Eólico El Rodeo, se contempla la instalación de un potencia de 3,900 kW y una producción anual de 11,100,672 kWh. Este proyecto se encuentra ubicado en la aldea El Rodeo del municipio de San Marcos, a 285 kilómetros de la ciudad capital de Guatemala.

Adicionalmente, existen entidades privadas que se encuentran realizando mediciones de viento (velocidad y dirección), con el objeto de definir la capacidad del proyecto de generación eólica. Estas estaciones de medición se encuentran en Jutiapa, en Villa Canales y en San Vicente Pacaya. Finalmente, el desarrollo de proyectos de energía eólica en Guatemala puede ser un complemento a la producción proveniente de centrales hidroeléctricas, ya que cuando estas centrales presentan sus niveles más bajos de generación en época de verano, la generación eólica presenta sus niveles más altos, por lo que, su época de producción tiende a ser complementaria con las centrales hidroeléctricas. Es común que el aumento de la velocidad de los vientos haga disminuir las precipitaciones.

2.1.5. Velocidad media del viento y potencial real

La energía disponible en el viento prevalente depende en mucho de la potencia en el viento y la duración la cual el viento sopla a una velocidad particular. La velocidad del viento nunca es estable en un sitio dado. Se mantiene cambiante con el tiempo, y por tanto, la potencia también varía en forma importante.

Debido a la variabilidad normal del viento y el efecto de esta sobre el cubo de la velocidad del viento, la ecuación de la potencia solo se debe usar para velocidades promedio de largo plazo.

Normalmente, la densidad de potencia real del viento en la mayoría de los sitios se encuentra en el rango de 1,7 veces a 3 veces mayor que la calculada con la velocidad media del viento.

La densidad de potencia es otro concepto usado en los estudios para la facilidad de producción eólica y es simplemente expresar las ecuaciones de la potencia del viento, en términos del área, es decir:

$$\frac{P}{A} = 0,6125V^3, \text{ tomando la densidad del aire}$$

$$\rho = 1,225 \frac{Kg}{m^3}$$

Donde:

P = potencia en watts.

V = velocidad en m/s

$$\frac{P}{A} = \text{Densidad de potencia en watts/m}^2$$

$$A = \text{área en m}^2$$

También

$$\frac{\rho}{A} = 0,0058V^2$$

Donde:

P = potencia en watts

A = área en pies²

V = velocidad en km/h

De lo anterior, se observa que la potencia (P) depende de la densidad del aire, el área de intercepción del viento y de la velocidad del viento. Aumentando cualquiera de estas cantidades, se incrementa la potencia disponible del viento, pero aún más, los cambios ligeros en la velocidad del viento producen efectos significativos en la potencia disponible.

La ecuación general para el potencial eólico es: (FECYT, 2004; Perrin y col., 2006; Rodríguez-López, 2008)

$$P_{max} = \frac{1}{2} \rho V_v^3 A_T$$

Donde:

P_{max} = potencia máxima expresada en W

ρ = densidad del aire seco en kg/m³

V = velocidad media en m/s

A_T = área barrida por el rotor = πr^2

El límite superior para la potencia que un aerogenerador puede extraer del viento es el definido por el C_p , de acuerdo con la teoría de Betz este es igual a 16/27 o 0,592. Aunque este teorema se demuestra para máquinas de eje horizontal, sus conclusiones son aplicables a las de eje vertical.

Al utilizar incluir el coeficiente de potencia del rotor en la ecuación 1 se obtiene la siguiente ecuación:

$$P_{max} = \frac{1}{2} C_p \rho V_v^3 A_T$$

Donde:

P_{max} = potencia máxima expresada en W

ρ = densidad del aire seco en kg/m^3

V = velocidad media en m/s

A = área barrida por el rotor $m^2 = \pi r^2$

C_p = coeficiente de potencia del rotor = $16/27$

2.1.6. Medición de la velocidad y dirección del viento

La velocidad del viento en la vecindad de la flora y la fauna determina el índice del calor correctivo y el transporte de masa entre estos organismos y su medio ambiente. Los objetivos básicos de la medición de la velocidad del viento son para determinar si la localización es adecuada para la instalación de una turbina de viento y también para estimar la potencia de salida de un sistema de conversión de la energía. Hay muchas formas para medir la velocidad del viento, algunos métodos comunes se basan en la observación del efecto del viento sobre el crecimiento de las plantas en la zona y medición en sitio usando equipos de monitoreo del viento.

Indicadores vegetativos: los árboles en las proximidades del sitio, bajo consideración, pueden ser un indicador un poco rustico de la dirección y velocidad del viento. Si los árboles están permanentemente deformados, se puede suponer que el viento es alto en el área y se pueden tener severas deformaciones en el tronco, lo cual ocurre a velocidades de 24 a 30 km/h. El efecto de rasurado y ondeo de las copas de los árboles se pueden observar en localidades con velocidades de viento del orden de 10 a 15 km/h. Sin embargo, la ausencia de deformaciones no necesarias implica que el recurso de viento es débil. Algunas especies de árboles son más sensibles al viento que otras, por lo

que la deformación de los arboles no se puede usar como una herramienta primaria en la selección del sitio para turbinas de viento. Para una información más precisa acerca de la velocidad del viento en una localidad dada, se debe usar la medición de la velocidad del viento con instrumentos.

Instrumentos de medición: los instrumentos básicos para la medición de la velocidad y dirección del viento son:

Anemómetro: es el instrumento destinado a medir la velocidad del viento. Existen varios tipos de anemómetros pero el utilizado para este caso es: el de copa. El anemómetro de copa es el utilizado para medir la componente horizontal del viento, el cual es un componente crucial para la elección del emplazamiento, ya que es la que determina la potencia del viento.

Veleta: es el instrumento utilizado para determinar la dirección del viento.

La evaluación de la dirección del viento permite determinar la mejor posición para los aerogeneradores.

2.1.7. Efectos locales sobre el flujo del viento

Los distintos tipos de terreno tienen diferentes efectos sobre la velocidad y dirección del viento. A continuación se estudiarán brevemente las características y sus efectos sobre el viento.

- Superficies no lisas o irregulares

Esto se refiere a la condición de la superficie de la tierra. Una superficie irregular es aquella que tiene obstrucciones, ya sea en la forma de edificios o

árboles. Estas obstrucciones interfieren con el flujo suave del aire. La velocidad del viento se reduce sustancialmente cerca de la tierra, debido a estas irregularidades del terreno, esta velocidad del viento depende de la altura de las diferentes superficies, entre mayor es la altura de la obstrucciones, mayor es la altura a la cual la velocidad del viento se reduce por la superficie; sin embargo, el efecto de la irregularidad en la superficie, se observa únicamente hasta cierta altura sobre la cual el efecto no existe.

- Árboles y construcciones

Los árboles y edificios son los obstáculos más comunes al viento en la vecindad del sitio de una turbina de viento, bajan tanto a los vientos superiores como a los inferiores, provocando turbulencia. Las reglas usadas para la selección de los sitios para las turbinas de viento cuando se tienen obstáculos son los siguientes:

- La turbina de viento se debe localizar con viento alto a una distancia de más de dos veces la altura de la obstrucción.
- La turbina de viento se debe localizar para viento bajo a una distancia mínima de 10 veces y preferentemente 20 veces la altura de la obstrucción.
- Si la turbina de viento está localizado inmediatamente viento abajo del obstáculo, entonces el cubo de la turbina de viento debe estar situado al menos dos veces a la altura de la obstrucción sobre el nivel del suelo.

La relación ancho/alto de la construcción o edificio determina la influencia de la velocidad del viento. Cuando esta relación es de 3 o más (para estructuras muy anchas), la reducción en la potencia del viento es de alrededor 10 % a una distancia de 20 veces la altura del edificio viento abajo, en tanto que en edificios altos y estrechos (relación ancho/alto menor que 3), se reduce la potencia del viento menos del 10 % a la distancia de solo 5 veces la altura del edificio. La mayoría de las estructuras residenciales, tales como casas, graneros y cocheras tienen relación ancho/alto 1.

- Protuberancias

Las protuberancias son sitios muy útiles para la instalación de sistemas de energía del viento, ya que la potencia del viento se incrementa con la altura sobre el nivel del suelo; sin embargo, el flujo de aire alrededor de las protuberancias es bastante complicado, debido a la forma de la protuberancia y del terreno circundante.

- Capas de inversión de temperatura

Durante las noches de viento frío de invierno, se puede formar una capa delgada de viento frío justo en la superficie de la tierra, esto ocurre especialmente sobre terreno plano, en donde los arboles están escasos o están en valles. Estas capas de aire denso frío amortiguan la transferencia de la energía del viento desde el aire a alturas altas del aire cercano a tierra, por lo tanto, la turbulencia se afecta. Si un fenómeno como este ocurre en los sitios a consideración para centros de energía del viento, entonces la altura del cubo de la torre del aerogenerador debe ser mayor a 20 m.

2.2. Energía eólica terrestre

La energía eólica se considera una forma indirecta de energía solar. Entre el 1 y 2 % de la energía proveniente del sol se convierte en energía cinética dando origen al viento, esto por el calentamiento desigual del aire en distintas regiones, calentamiento que provoca una variación en la densidad del mismo y por tanto diferencias en la presión ejercida por la masa de aire en la superficie terrestre.

Luego, son estas diferencias de presión las que producen los movimientos de grandes masas de aire, que son finalmente el viento que nosotros se percibe en la superficie. La energía cinética de estas masas de aire, el viento, puede transformarse en energía mecánica útil.

La energía eólica, transformada en energía mecánica ha sido históricamente aprovechada, pero su uso para la generación de energía eléctrica es más reciente, existiendo aplicaciones de mayor escala sólo desde mediados de la década del 70, en respuesta a la crisis del petróleo y a los impactos ambientales derivados del uso de combustibles fósiles.

Una de las características de este recurso es su condición aleatoria y variable, por cuanto depende de condiciones atmosféricas que no pueden ser controladas ni modificadas. Esto lleva a que se requieran exhaustivas mediciones como condición previa para el desarrollo de proyectos destinados a su aprovechamiento.

2.3. Energía eólica marina

La energía eólica marina es, al igual que la eólica terrestre, una aplicación de la fuerza producida por el viento. La diferencia respecto a la obtenida en tierra radica en que los aerogeneradores (molinos) se ubican mar adentro. Su coste de instalación es muy superior al de las zonas terrestres, pero también su vida útil es mayor. Además, los costes de las cimentaciones y anclajes han disminuido de forma espectacular en los últimos años, con lo que el precio del megawatio (MW) de potencia se está igualando al de otras energías renovables. Dinamarca es el país que inició la energía eólica marina y en sus mares se encuentran en la actualidad los mayores parques de aerogeneradores. Esta manera de obtención de energía cuenta además con el beneplácito de organizaciones ecologistas como Greenpeace, que apuestan por ella por su carácter renovable y su escasa incidencia en el ecosistema.

La energía eólica marina tiene, según los expertos, un futuro prometedor, sobre todo en países con una alta densidad de población que reduce las posibilidades de hallar un emplazamiento apropiado en tierra. En el mar, el viento se encuentra con una superficie de rugosidad variable, las olas, y sin obstáculos como islas, islotes, etc., lo que implica que la velocidad del viento no experimenta grandes cambios. Así, pueden emplazarse torres más bajas que en la superficie terrestre. Además, el viento es, por lo general, menos turbulento que en tierra, con lo que se amplía el periodo de trabajo útil de un aerogenerador. La baja turbulencia del mar se debe, ante todo, al hecho de que las diferencias de temperatura a distintas altitudes de la atmósfera que se producen sobre el mar son inferiores a las de tierra adentro.

En la actualidad los parques offshore, esta es su denominación internacional, se sitúan en aguas poco profundas, alejados de las rutas marinas comerciales, de los emplazamientos militares y de los espacios de interés natural u ornitológico. La distancia de la costa debe ser como mínimo de dos kilómetros para aprovechar mejor el régimen de vientos, de características diferentes a los que llegan a tierra.

En un principio, los anclajes de los aerogeneradores se efectuaban con hormigón a través de la cimentación por gravedad, es decir, con la construcción en un dique seco de grandes estructuras que después se fijaban en el emplazamiento elegido y se rellenaban con grava y arena. Un diseño posterior, el monopilote, consiste en una perforación del lecho marino, de un diámetro de 3,5 a 4,5 metros y una profundidad de 10 a 20 metros, en la que se introduce un gran cilindro metálico que sirve de base a la torre. Los parques eólicos se conectan a tierra por cables submarinos enterrados para reducir el riesgo de daños ocasionados por equipos de pesca, anclas, etc. En zonas estratégicas del parque se colocan, entre otras instalaciones de servicio, centros de transformación que convierten la baja o media tensión en alta para favorecer así el transporte hasta la costa. Una vez en tierra, tan solo resta conectar la línea eléctrica con la red de distribución existente.

Los aerogeneradores marinos no tienen un efecto significativo en la vida de las aves acuáticas. Esta es la conclusión de dos experimentos realizados en Dinamarca, con los que se pudo comprobar que las aves se mantenían a una distancia segura de las turbinas y, por otro lado, que los rotores que giran no las ahuyentaban de sus áreas de alimentación.

Dinamarca, pionera, el primer parque eólico marino, compuesto por 11 aerogeneradores, se construyó en Dinamarca en 1991 en el mar Báltico y, en 2002, tras la puesta en marcha de varios parques con distinta potencia, se inauguró el parque de Horns Rev, el más grande del mundo con 80 aerogeneradores y con una potencia instalada de 160 MW.

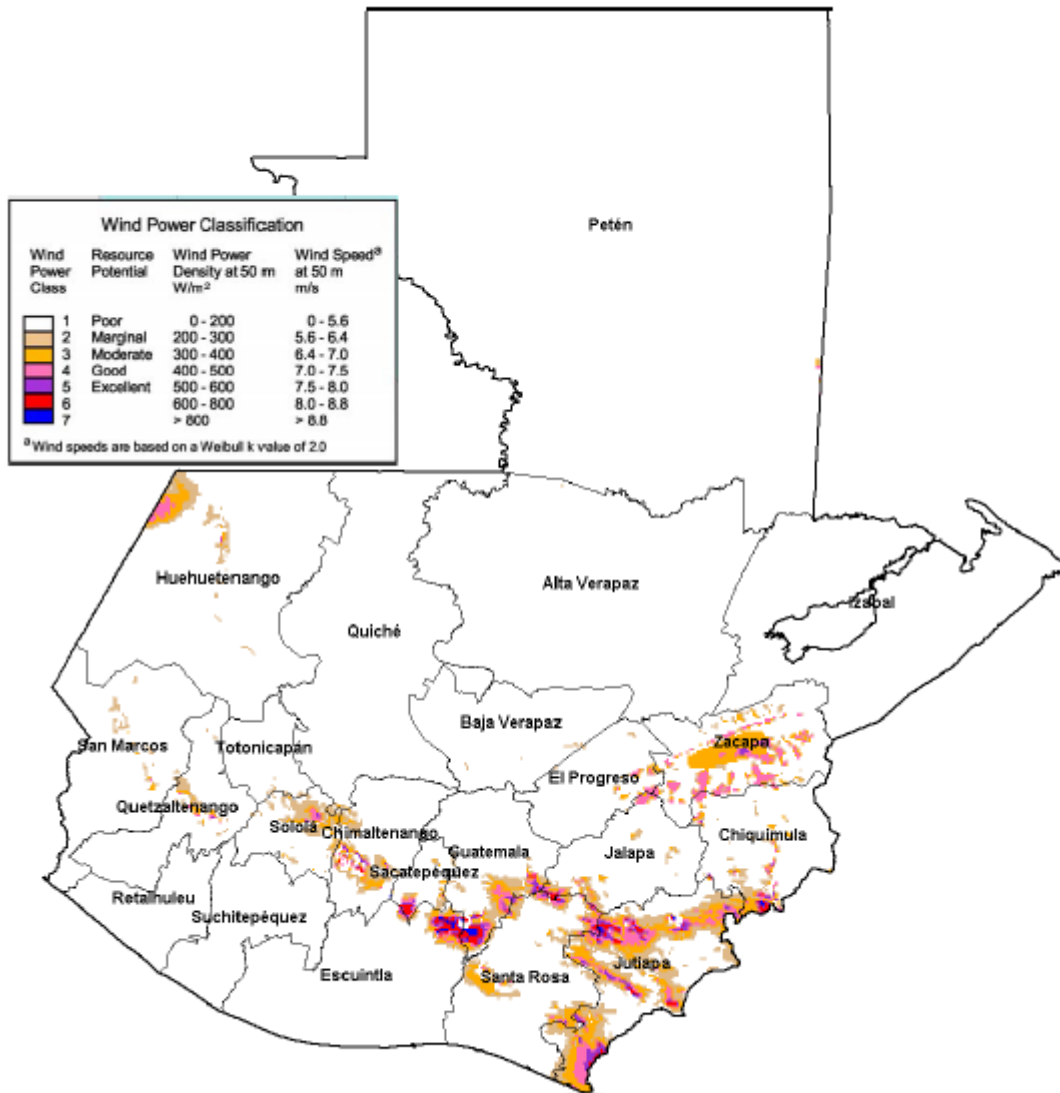
Tras los años de uso de energía eólica marina en Dinamarca se puede concluir que, aunque se ha requerido una importante inversión económica, la producción de electricidad es más estable y un 20 % superior a la energía eólica terrestre. Además, la vida útil del parque, con un buen mantenimiento, puede llegar a duplicarse. En la actualidad el 50 % del consumo eléctrico familiar danés proviene de este tipo de energía. En el resto de Europa destacan algunos proyectos, entre los que se encuentra la instalación en el Reino Unido de 3 000 aerogeneradores en sus costas este y oeste con capacidad para abastecer al 15 % de la población británica.

En Alemania se prevé la instalación de 60 000 MW antes de 2025 e Irlanda ha aprobado la construcción del mayor parque eólico del mundo en el mar de Irlanda, con una producción de 520 MW, equivalente al 10 % de las necesidades energéticas del país.

2.4. Mapa eólico de Guatemala

En la figura 10 se muestra el mapa eólico de Guatemala.

Figura 10. Mapa eólico de Guatemala

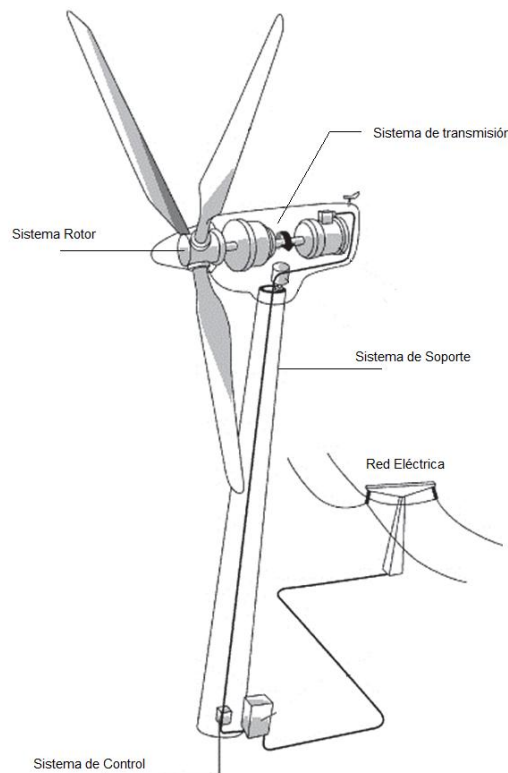


Fuente: Ministerio de Energía y Minas. *Resumen mediciones del viento en Guatemala*. p. 2.

3. COMPONENTES DE UN SISTEMA DE ENERGÍA EÓLICA

Los aerogeneradores, con hélice de eje horizontal, por lo general, responden a un diseño relativamente estandarizado, conformado por las siguientes partes fundamentales: sistema de control, sistema de transmisión y sistema rotor o turbina eólica.

Figura 11. Componentes de un sistema de energía eólica



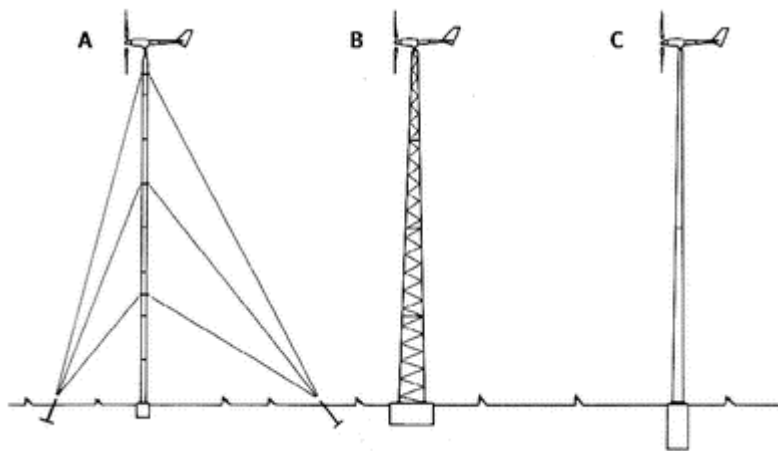
Fuente: WIZELIUS, Tore. *Developing wind power projects*. p. 75.

3.1. Sistema de soporte

Consiste en la torre de soporte del aerogenerador y su correspondiente fundación de anclaje. Su función es mantener el aerogenerador a la altura correcta de funcionamiento por sobre el nivel del suelo, debiendo ser capaz de tolerar el peso de este y las diversas exigencias que conllevan la exposición a fuertes vientos y el sostener un cuerpo de gran envergadura rotando.

Hay cuatro tipos de torres: de mástil tensado (A), de celosía (B), tubulares (C) e híbridas, tal como se aprecia en la figura 12.

Figura 12. Tipo de torres



Fuente: www.cubosolar.cu. Consulta: agosto de 2014.

Las torres de tipo celosía facilitan la circulación de aire a través de la misma, disminuyendo las solicitaciones mecánicas sobre el rotor de la máquina. Estas pueden estar hechas de hierro o madera. Otra ventaja de las torres de

celosía es su costo, puesto que una torre de celosía requiere solo la mitad de material que una torre tubular sin sustentación adicional con la misma rigidez

Los diseños tubulares son construidos en metal o concreto, y requieren escaso mantenimiento, menor que el caso de la torre de celosía. La mayoría de los grandes aerogeneradores se entregan con torres tubulares de acero, fabricadas en secciones de 20-30 metros con bridas en cada uno de los extremos, y son unidas con pernos en el lugar de instalación. Las torres son tronco-cónicas (es decir, con un diámetro creciente hacia la base), con el fin de aumentar su resistencia y al mismo tiempo ahorrar material.

Muchos de los aerogeneradores pequeños están construidos con delgadas torres de mástil sostenidas por cables tensores. La ventaja es el ahorro de peso y, por lo tanto, de costo. Las desventajas son el difícil acceso a las zonas alrededor de la torre, lo que las hace menos apropiadas para zonas agrícolas.

Algunas torres están hechas con diferentes combinaciones de las ya mencionadas, que podría ser un híbrido entre una torre de celosía y una torre tensada.

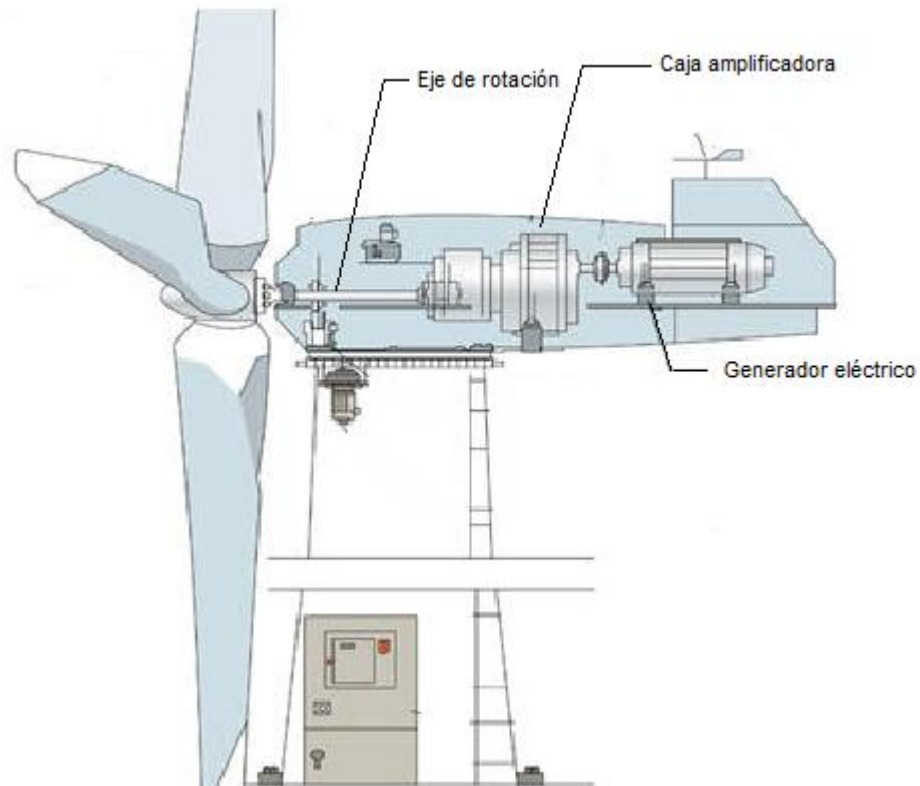
Las fundaciones se realizan de concreto reforzado, y deben ser acordes con la altura de la torre y la envergadura de la máquina rotatoria que esta debe soportar.

En la zona superior de la torre debe existir un cabezal y una plataforma, que permitan anclar el aerogenerador a la torre y a la vez lo deje libre de rotar para orientarse según la dirección del viento.

3.2. Sistema de transmisión

Compuesto por el eje de rotación, la caja amplificadora de revoluciones y el generador eléctrico como puede apreciarse en la figura 13. Su función principal consiste en transmitir la energía cinética de la rotación de las aspas al generador eléctrico, equipo que se encarga de transformar esta energía cinética en energía eléctrica. El generador eléctrico puede ser de diversos tipos, ya sea de corriente alterna o continua. Sin embargo, los más usados en la industria hoy en día son los generadores eléctricos de corriente alterna, de preferencia generadores sincrónicos, principalmente para máquinas de baja potencia (menores a 100 kW) y generadores de inducción, principalmente en máquinas de alta potencia (mayores a 100 kW). La caja amplificadora de revoluciones es un componente opcional, que solo se ocupa de modificar la velocidad de giro del eje que conecta con el generador eléctrico. Luego, dependiendo del criterio de diseño de la máquina y la forma de operar de esta, puede considerarse o no.

Figura 13. **Sistema de transmisión**



Fuente: [ecen.com /eee83/eee83e/economic_viability_of_the_wind.htm](http://ecen.com/eee83/eee83e/economic_viability_of_the_wind.htm).

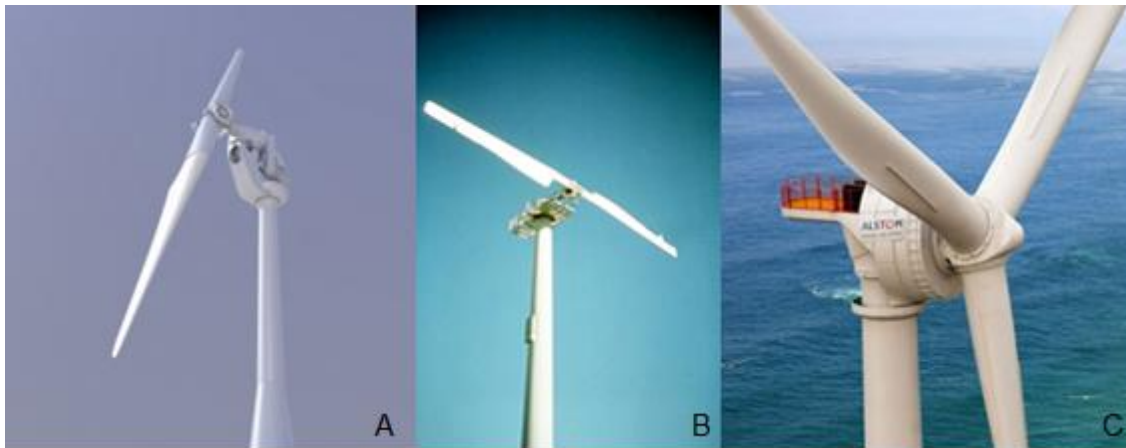
Consulta: agosto de 2014.

3.3. Sistema rotor o turbina eólica

Está compuesto por el conjunto de aspas y una masa central, que en conjunto conforman la hélice, encargada de extraer parte de la energía cinética del viento y transformarla en energía cinética de rotación del eje del aerogenerador.

Las aspas pueden seguir diversos perfiles aerodinámicos, diseñados para poder captar la máxima energía cinética. A su vez la hélice puede estar compuesta ya sea por una (A), dos (B), tres (C) como se aprecia en la figura 14, siendo el modelo de tres aspas el que predomina fuertemente en el mercado mundial de aerogeneradores.

Figura 14. **Ejemplo de hélices**



Fuente: www.ecovive.com, www.mailxmail.com, www.evwind.com. Consulta: agosto de 2014.

3.4. Sistema de control

Según sea la forma de operación del aerogenerador, se eligen distintos tipos de control de este. Los principales objetivos del sistema de control son mantener constante el nivel del voltaje generado por la máquina, puesta es macha y cese de operación del aerogenerador, ya que estos cuentan con rangos de velocidad del viento para su correcto funcionamiento.

Esta tarea se ve dificultada por la naturaleza errática y variable de la intensidad y dirección del viento, lo que genera fluctuaciones en los niveles de tensión que se registran en bornes de la máquina.

3.5. Torres de medición de variables eólicas

Las torres de medición pueden tener una altura aproximada de 50 metros y estas cuentan con equipos que miden el comportamiento del viento cada cierto período de tiempo (5, 10, 15 minutos, entre otros) y lo almacenan en el datalogger o registrador de datos. Existen diferentes masas de torres de medición, pero la calidad de los equipos varía de acuerdo al precio de los mismos. Sus componentes básicos son los siguientes:

- Medidores de velocidad, ubicados uno a 10, 20, 30, 40 y 50 metros de altura dependiendo del interés de la empresa interesada.
- Un medidor de dirección de viento, ubicado a 20 o 30 metros de altura.
- Un sensor de temperatura.
- Radiación solar.
- Registrador (Data logger)
- Pararrayo.
- Torre tubular.

4. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

4.1. Definición

Se puede entender que un SIG es un conjunto de herramientas basadas en un soporte informático que, manejando datos geográficos permiten resolver problemas espaciales. Dichos problemas espaciales pueden resolverse por medios “no automáticos”, pero hay tres casos en los que se hace imprescindible el empleo de SIG:

- Problemas complejos
- Procesos repetitivos
- Necesidad de manejar gran cantidad de información

Para resolver estas situaciones existen paquetes informáticos comercializados de propósito general o específicos que se denominan SIG. Estos SIG se han generalizado a partir de la década de los 80, aunque se vienen empleando desde hace unos 30 años.

4.2. Objetos geográficos

La información geográfica pretende la descripción del territorio. Para ello, dicho territorio (espacio geográfico) se concibe como un conjunto de elementos básicos o unidades espaciales que se denominan objetos geográficos. También se utilizan los siguientes nombres: objetos espaciales, unidades espaciales,

unidades de observación, elemento, entidad, objeto, etc. Se empleará preferentemente “objeto geográfico”.

Un objeto geográfico tiene asociada información de dos tipos:

- Información espacial: Incluye la situación y forma del objeto geográfico así como su relación espacial con otros objetos.
- Información temática: Incluye las propiedades o características no espaciales del objeto geográfico que se denominan atributos, también: atributos descriptivos, atributos temáticos, datos temáticos o datos descriptivos.

Tipos principales de objetos geográficos

- Punto: define un objeto del territorio cuyo contorno es demasiado pequeño para ser mostrado por una línea o un área.
- Línea: objeto geográfico de forma lineal demasiado pequeño para ser mostrado como un área.
- Área: es una figura cerrada cuyo límite o contorno encierra un área homogénea.

Todos los objetos geográficos tienen dimensión superficial, en el sentido de que “ocupan” un determinado espacio del territorio. La escala de representación es la que condiciona esta dimensión e incluso hace desaparecer objetos.

- Formas de representar los objetos geográficos

Hay dos sistemas principales para representar los objetos geográficos o lo que es lo mismo, el territorio, según la forma de definir numéricamente la componente espacial de los objetos geográficos:

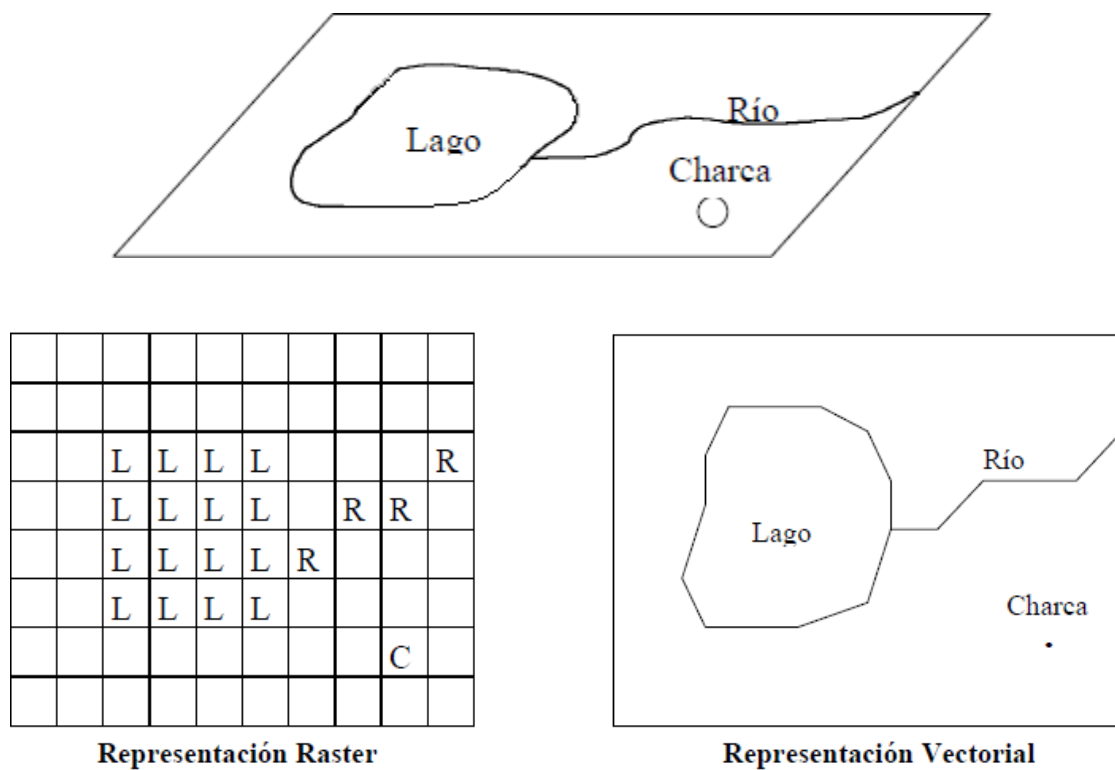
Vectorial: el territorio se representa a partir de la asociación de vectores, que representan las fronteras del objeto geográfico, y que se localizan en el espacio mediante las coordenadas del punto inicial y final. De esta manera, la información espacial se estructura como una lista de coordenadas asociada a cada objeto geográfico. Un punto se representa por una pareja de coordenadas x,y . Una línea como una serie ordenada de parejas de coordenadas x,y . Un área como una serie de coordenadas x,y empezando y terminando en el mismo punto.

La distinción de los objetos geográficos es explícita a través de las coordenadas que los definen. El sistema vectorial es adecuado para representar objetos geográficos que sean resultado de la intervención del hombre. Es más eficiente en procesos de búsqueda temática de objetos geográficos.

Raster: el territorio se representa empleando una rejilla de rectángulos regulares de igual tamaño denominados celdas o "píxeles". La información tiene una estructura matricial, en la que cada celda o píxel tiene un valor y una localización determinados. Un punto se representa por una celda, una línea como un grupo de celdas interconectadas y un área es representada por varias celdas adyacentes. Con esta representación no se considera de forma explícita los objetos geográficos, sino que estos surgen de la ordenación espacial de los valores en la rejilla.

Es decir, la distinción de los objetos geográficos es implícita en los píxeles contiguos del mismo valor. Este sistema es adecuado para representar elementos naturales que no posean bordes marcados. Es más eficiente en procesos de búsqueda temática en puntos arbitrarios del espacio.

Figura 15. **Representación raster y vectorial de objetos geográficos**



Fuente: GUTIÉRREZ, J. y COULD, M. *Sistemas de información geográfica*. 1994. p. 84

Relaciones espaciales entre objetos geográficos

Los mapas representan relaciones espaciales entre objetos geográficos de forma implícita y depende del objetivo de quién diseña y/o utiliza el mapa el que

se especifiquen gráficamente unas relaciones espaciales u otras entre dichos objetos geográficos.

La topología es el campo de las matemáticas que estudia las relaciones de los elementos en el espacio. En nuestro caso, la topología nos permite definir explícitamente las relaciones espaciales entre objetos geográficos.

Los tres conceptos principales topológicos de varios SIG son:

- Conectividad
- Definición de área
- Proximidad

En un sistema raster las relaciones topológicas son implícitas a la posición de cada pixel en la malla, al igual que la geocodificación, y no pueden ser explícitas.

4.3. Funciones principales de un SIG

Se describirá los SIG a través de las funciones que realizan, y que principalmente son:

- Entrada y procesado de información.

Se refiere a todos los sistemas de captura de datos, espaciales y temáticos, para ponerlos a disposición del SIG. También se incluyen funciones de edición de los datos espaciales.

Entrada de datos espaciales: Un SIG tiene una dependencia total de las fuentes de información que utilice. Por ejemplo, nunca se podrá realizar una cartografía coherente a escala 1:2500 si la fuente de información es de 1:5000.

Edición de datos espaciales: cualquiera que sea el proceso de entrada de datos espaciales hay que asegurar que la capa digitalizada esté libre de errores.

Entrada de datos temáticos: la información de tipo descriptivo se introducirá por teclado, salvo que se disponga de ella en formato digital, importándose directamente si el formato de los archivos es el mismo que la base de datos relacional del SIG, o en caso contrario, convirtiéndolos previamente a ese formato.

- Gestión de las bases de datos

Incluye tareas como poner los datos espaciales en coordenadas reales, unir coberturas contiguas y mantener la base de datos.

Como se ha indicado los objetos geográficos que representan datos temáticos diferentes se almacenan en coberturas separadas o capas. Estas capas temáticas tienen una estructura vertical. Además, para facilitar la automatización y actualización de los datos las coberturas son divididas espacialmente, en un conjunto de coberturas contiguas o adyacentes como hojas de un mapa, formando una estructura horizontal.

Para el análisis y representación de los datos estas coberturas adyacentes deben ser unidas. Para el análisis espacial las coberturas separadas en capas temáticas deben interrelacionarse. Para todos estos procesos las coberturas deben estar en el mismo sistema real de coordenadas. La forma de realizar estas tareas en un SIG se basa en el empleo de puntos de control, denominados “tics”, que representan posiciones sobre la superficie de la tierra cuyas coordenadas reales son conocidas.

Todo SIG dispone de funciones de transformación de coordenadas, de varios sistemas de proyección de la superficie de la tierra, entre sí. Para realizar esta transformación el SIG necesita conocer las coordenadas reales de los tics y el sistema de coordenadas en que esté el mapa (los tics deben de estar en el mismo sistema de coordenadas que el resto del mapa).

Antes de la etapa de digitalización se establecen tics para el área de estudio. Una vez que un mapa es digitalizado, los tics permiten a todos los objetos geográficos de una cobertura ser representados en un sistema de coordenadas común.

En la estructuración horizontal de coberturas, para la unión de coberturas adyacentes, se utilizan los tics, ya que registrando estas posiciones comunes para cada hoja del mapa se suministrará una referencia común para cada cobertura. En la estructura vertical de coberturas, para relacionar las distintas capas temáticas sin problemas, lo que se hace es emplear los mismos tics para todas las capas.

En definitiva empleando los mismos tics y el mismo sistema de proyección para las distintas coberturas se asegura el control geográfico del área de estudio.

- Análisis geográfico

Se refiere a las herramientas que permiten el análisis de los datos, con el objetivo de extraer información ya existente o de generar nuevos datos. El análisis geográfico a realizar dependerá del objetivo que se persiga en una aplicación concreta. Los tipos de análisis a realizar pueden clasificarse de forma general en análisis espaciales y análisis tabulares.

Análisis espacial: el análisis espacial se basa en las relaciones topológicas entre los objetos geográficos. Es la función más característica de un SIG, incluye tareas de medidas espaciales y de relaciones espaciales. Las medidas espaciales pueden ser medidas geométricas básicas como longitud, perímetro, área, volumen o medidas más complejas como dispersión. Las relaciones espaciales incluyen las características topológicas básicas como conectividad, contigüidad e inclusión. A continuación se mencionan los análisis espaciales más importantes que permiten los SIG: Superposición, área de influencia y análisis de redes.

Análisis tabular: el análisis tabular consiste en realizar operaciones entre los ítems de la tabla, o tablas, de atributos de objetos geográficos. Estas operaciones pueden ser aritméticas (adición, resta, multiplicación, división, potencia, etc.) o lógicas (funciones: and, or, etc). Los objetos geográficos pueden pertenecer a distintas capas temáticas con lo que el análisis tabular se convierte en una superposición condicionada por las operaciones aritméticas o lógicas realizadas.

- Presentación de resultados

Es el paso final del proceso en el que los resultados se presentan como informes y mapas. La presentación de los resultados del análisis y de la propia información inicial se puede hacer de tres formas diferentes: Tablas, gráficos y mapas. Habitualmente los resultados se presentarán como un informe y uno o varios mapas. Un SIG cuenta con herramientas para facilitar la realización, tanto de las tablas y gráficos de los informes, como sobre todo para la realización de la cartografía temática.

El mapa, o mapas, a realizar debe cumplir con el objetivo buscado en la aplicación del SIG. Para conseguir que cumpla con dicho objetivo no basta con que el análisis geográfico sea realizado correctamente. Son necesarios también unos conocimientos mínimos de composición cartográfica para manejar adecuadamente las funciones de representación cartográfica que suministra el SIG.

4.4. Fases principales de un proyecto SIG

A continuación se describen las fases principales de un proyecto SIG típico. En la figura 16 se representa el diagrama de flujo del proyecto SIG.

Planificación del proyecto:

- Objetivos
- Especificar el problema a resolver
- Determinar los resultados del proyecto: informes, mapas, etc.
- Quién va a utilizar esos resultados
- Plantearse si va a haber otros usuarios de los mismos datos

4.4.1. Modelización del territorio

Se trata de establecer un modelo conceptual del territorio que permita acceder a los objetivos buscados, habrá que definir los siguientes aspectos:

- Datos geográficos necesarios

Para solucionar el problema establecido, en los objetivos del proyecto se debe determinar la parte de la realidad geográfica en la que se centrará. Esto nos llevará a la selección de una serie de variables geográficas que influyen o pueden influir en el resultado del proyecto. Estas variables conducirán a los datos geográficos que se necesitan para la implementación del SIG.

- Forma de representar la realidad geográfica

El segundo paso será investigar que datos están disponibles y en que formato, ya que, la forma en que se presenten los datos, junto con el tipo de objetos geográficos y el objetivo buscado, serán determinantes para el tipo de sistema de representación de la realidad que utilizaremos: vectorial o raster. La resolución, el grado de definición de la realidad geográfica, depende de la resolución de los datos disponibles y de la aplicación final del SIG.

- Planteamiento del análisis geográfico

Una vez establecido se trabajará en sistema vectorial o raster (o en ambos) se debe definir el análisis geográfico que se va a realizar, ya que la forma de dicho análisis será determinante en el diseño de la base de datos. El objetivo del análisis geográfico es resolver el problema o problemas que ha dado lugar al proyecto SIG. Para ello partiendo de la definición del problema se debe encontrar una secuencia de operaciones que produzca resultados significativos. Esto dará lugar a unos criterios de selección espaciales, que serán aplicados en la fase de análisis geográfico. Por tanto, aunque el análisis geográfico se realiza más tarde, es en este momento del proyecto cuando se debe definirlo.

- Forma de presentar los resultados

Se debe esbozar la forma en que se pretende presentar los resultados, debido a que nos influirá en las fases siguientes del proyecto.

4.4.2. Diseño de la base de datos

La fuente de datos disponible juega un papel muy importante en el diseño de la base de datos. Los pasos principales para el diseño de la base de datos son:

- Identificar objetos geográficos y sus atributos

Estos objetos geográficos y sus atributos vendrán determinados por el análisis que se vaya a realizar y por los mapas que se deseen generar como resultado.

- Organizar las capas de datos

Las capas de datos son organizadas habitualmente de forma que los tipos de objeto geográfico: puntos, líneas y polígonos, estén almacenados en coberturas separadas. Dentro de cada tipo de objeto, se establecerán capas por temas (por ejemplo, para la característica "línea", se establecerá una cobertura para líneas eléctricas y otra para carreteras, ya que los atributos asociados a líneas eléctricas y carreteras son distintos).

- Identificar las coberturas que deben ser digitalizadas

Se refiere a la automatización para introducir los datos de una cobertura procedentes de un mapa en papel, etc.

En definitiva, el diseño de la base de datos incluye:

- Determinar el límite del área de estudio
- Sistema de coordenadas a emplear
- Capas (coberturas y redes) que se necesitan
- Objetos geográficos en cada cobertura
- Atributos de cada objeto geográfico
- Codificación y organización de atributos

4.4.3. Entrada y procesado de los datos

El primer paso es recopilar los datos necesarios para el proyecto, para las capas y atributos identificados en la etapa de diseño. Una vez conseguidos los datos hay que introducirlos en el SIG. Los datos pueden estar en distintos formatos, básicamente en nuestro caso las posibilidades serán que existan datos en formato digital, de no existir datos en formato digital se intentará conseguir el mejor mapa manuscrito posible para digitalizarlo, escanearlo o introducir directamente la información escribiendo las coordenadas.

Después de meter los datos en el SIG, se debe construir la topología y asegurarnos que las coberturas están libres de errores. Los pasos a realizar para cada cobertura son: construir la topología, identificar errores, corregir errores y reconstruir la topología.

Por último, nos falta introducir los datos de atributos, pero previamente a la entrada de datos temáticos se debe conocer:

Los datos temáticos (atributos) necesarios en cada cobertura para cumplir el objetivo que se busca con el SIG.

Los parámetros específicos de cada atributo. Estos parámetros darán lugar a los distintos ítems de la “Tabla de atributos de objetos geográficos”.

Los tipos de valores a almacenar (números y letras) en cada parámetro. Siempre que se tenga parámetros con valores muy repetidos, expresiones largas o intervalos numéricos, va a ser interesante introducir estos valores como un código en la base de datos para reducir el tamaño final de esta y agilizar el procesamiento de los datos.

La longitud máxima de dígitos asociada a cada parámetro a partir del valor correspondiente a ese parámetro que tenga más dígitos.

Será muy útil establecer un diccionario de datos conteniendo para cobertura, el nombre de los atributos, sus parámetros y una descripción de sus valores (longitud máxima, código si existe, etc.), En definitiva un diccionario de datos consistirá en un catálogo de todas las tablas del SIG con una descripción de todas las columnas de cada tabla.

4.4.4. Gestión de la base de datos

En esta fase del proyecto se deberán realizar las siguientes tareas:

- Poner los datos espaciales en coordenadas reales
- Unir coberturas adyacentes
- Mantener la base de datos (actualización de datos, etc.)

4.4.5. Análisis geográfico

Los pasos a seguir en esta fase son:

- Criterios para el análisis geográfico

En la modelización territorial, anteriormente descrita, se apuntaba la necesidad de establecer unos criterios de selección espaciales, que se plasmasen en una serie de operaciones que diesen lugar a la solución del problema planteado en el proyecto SIG. Antes de aplicar estos criterios se debe considerar la cobertura a la que afecta el criterio y como la afecta.

- Revisión de los datos

A partir de los criterios del análisis se debe considerar si se tiene todos los datos necesarios para poder aplicarles dichos criterios. Puede que se encuentre que sea necesario realizar un procesamiento adicional de algunas coberturas o/y que se necesite añadir atributos a una o varias coberturas.

- Realización del análisis espacial y tabular

En este punto del proyecto SIG se llevará a cabo la secuencia de operaciones espaciales y tabulares establecida anteriormente.

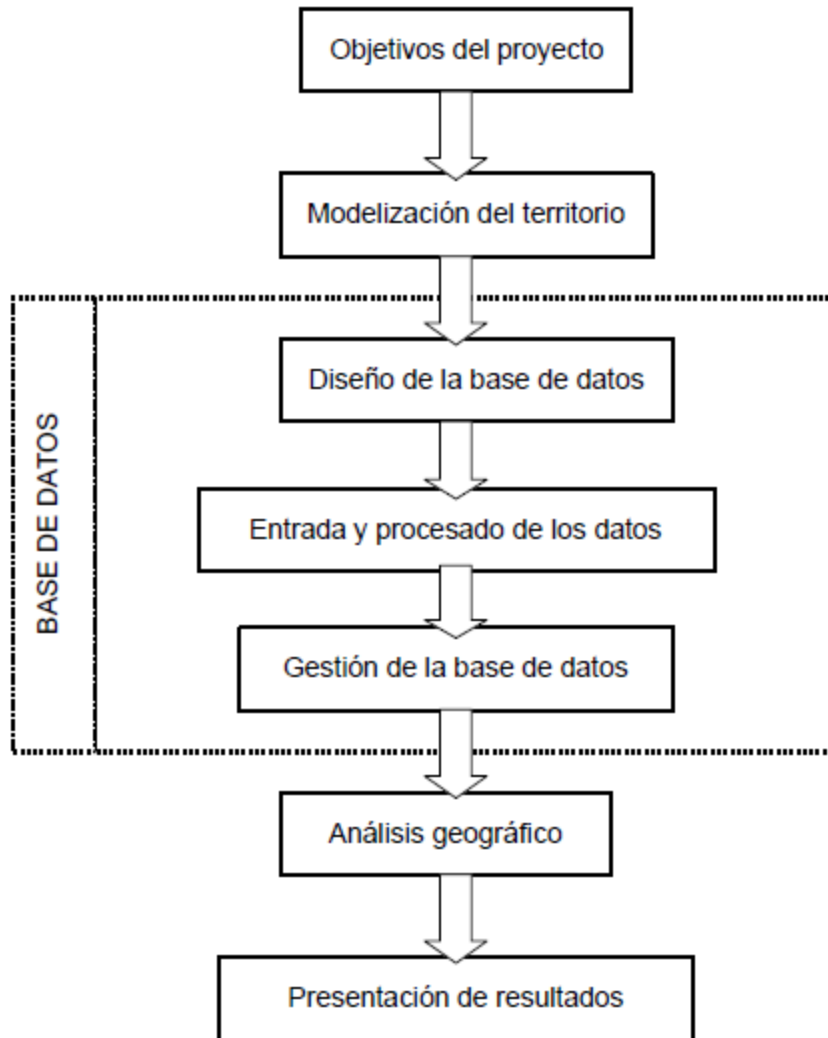
- Interpretar y evaluar los resultados

Se analizarán los resultados del modelo, los SIG tiene algunos comandos que pueden ayudar en esta tarea. A partir del análisis de los resultados se debe valorarlos. Para conseguir esto, lo más útil es establecer unos criterios de aceptación de los resultados. Si es necesario, se realizará un estudio de campo para validar los resultados.

- Refinar el análisis si es necesario

La evaluación de los resultados puede conducirnos a la necesidad de reestructurar el análisis geográfico realizado. Una de las ventajas de un SIG, es que permite fácilmente repetir y ajustar los pasos del análisis. Esto puede ser utilizado con el fin de rehacer el análisis modificándolo para hacerle más adecuado, o para realizar análisis alternativos y comparar sus resultados.

Figura 16. **Esquema de un proyecto SIG**



Fuente: ARMADOR GUERRA, Julio. *Análisis de los parámetros técnicos en la aplicación de los sistemas de información geográfica a la integración regional de energías renovables en la producción descentralizada de energía.* p. 184.

4.4.6. Presentación de los resultados

Una vez establecida la validez de los resultados se debe concluir el proyecto materializando la solución del mismo a través de la realización de un informe final, que constará de una parte escrita (con tablas y gráficos) acompañada de uno o varios mapas. Pasos para crear el mapa (o mapas) del informe final

- Definir el objetivo del mapa

Se trata de determinar la información que debe mostrar el mapa y que dependerá del mensaje que se quiere transmitir con el mapa y a la audiencia a la que va destinado.

- Tamaño y escala del mapa

El tamaño del mapa depende del uso al que esté destinado y, evidentemente, del dispositivo de impresión disponible.

La escala está limitada por el tamaño del mapa y depende de la resolución de los datos originales y del nivel de detalle que se quiere presentar.

- Composición cartográfica

Se trata de conseguir que el mapa sea capaz de transmitir la información a la audiencia a la que está destinado. Para ello debe realizarse empleando las normas y convenciones del lenguaje cartográfico.

4.5. Justificación del empleo de un SIG

Valorar la integración de las energías renovables en la electrificación rural requiere estudiar un gran número de datos, la mayoría de ellos dependientes de la localización geográfica.

Además de estas razones, el objetivo del proyecto de fragmentar el territorio correspondiente a la unidad de estudio en zonas en las que sea más apropiada una determinada tecnología de suministro de energía eléctrica, hace especialmente adecuado el empleo de un SIG como soporte del método.

En definitiva, un SIG es la herramienta capaz de manejar los datos necesarios, produciendo además nuevos datos como, por ejemplo, mapas de distancia, a partir de los datos existentes, con el fin de generar mapas sintéticos que presenten los resultados del estudio.

5. RESULTADOS

Se obtuvieron los resultados tras la recopilación de datos correspondiente al 2011 y 2012 de las variables velocidad y dirección del viento en varios puntos geográficos del país. Los datos fueron recolectados a través de las estaciones meteorológicas del Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH).

5.1. Zonas geográficas de alto potencial eólico

Se analizaron los datos del potencial eólico de 30 puntos geográficos nacionales por medio de los cuales sobresalen 6 con un mayor potencial eólico.

Los resultados de estos 6 puntos geográficos con mayor potencial eólico se presentan a continuación:

Para calcular la potencia se utilizó una turbina Marca Vesta Modelo V100-1.8/2.0 MW, utilizando la siguiente fórmula.

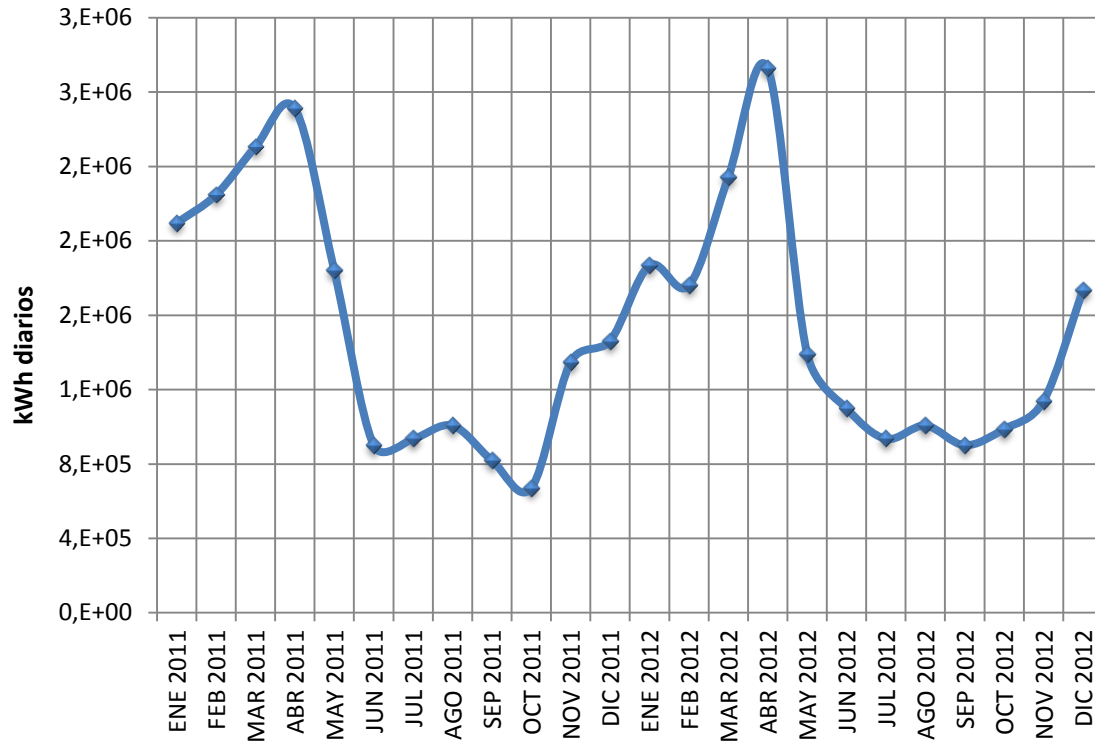
$$P_{max} = \frac{1}{2} C_p \rho V_v^3 A_T \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

- P_{max} = potencia máxima expresada en W
- ρ = densidad del aire seco en kg/m^3
- V = velocidad media en m/s
- A = área barrida por el rotor $m^2 = \pi r^2$

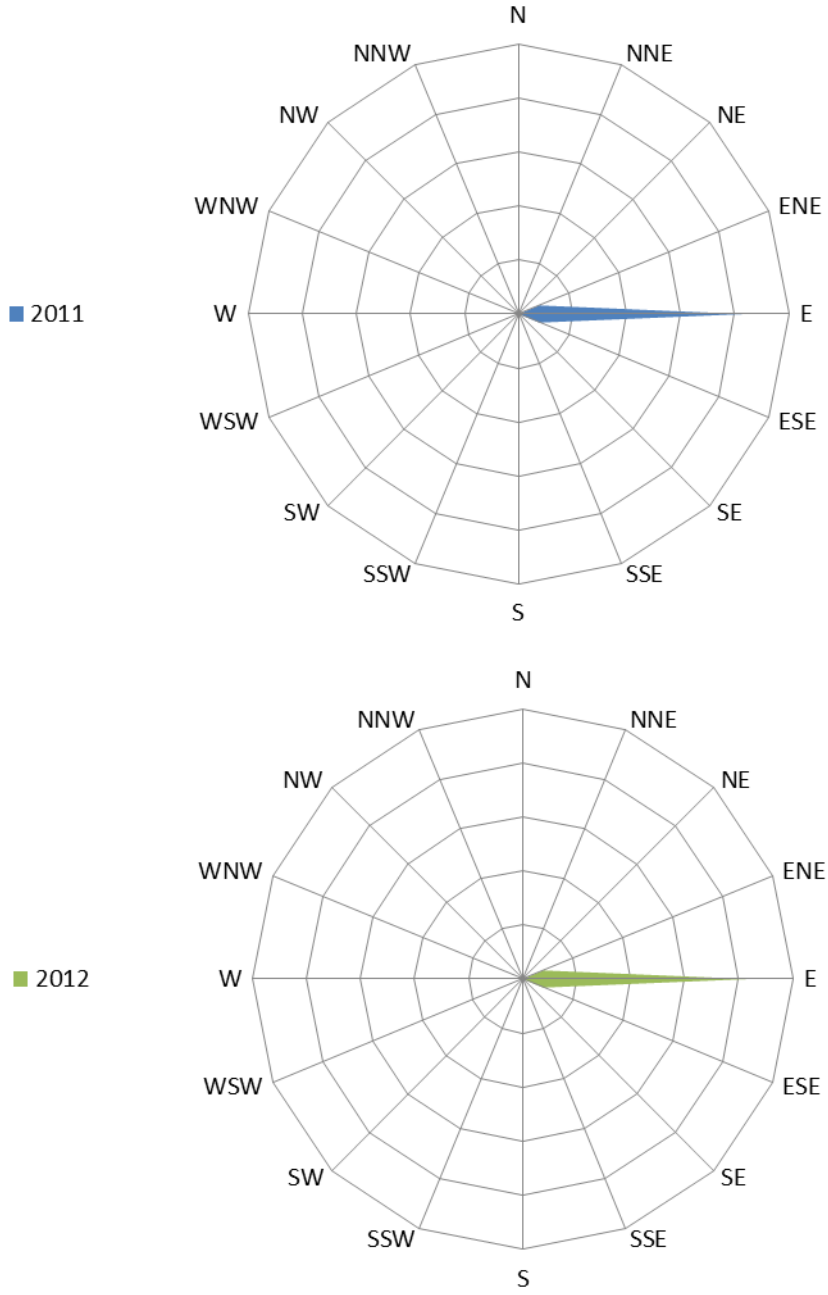
- $C_p =$ coeficiente de potencia del rotor = 16/27

Figura 17. **Proyección mensual kWh en estación meteorológica Cuilco**



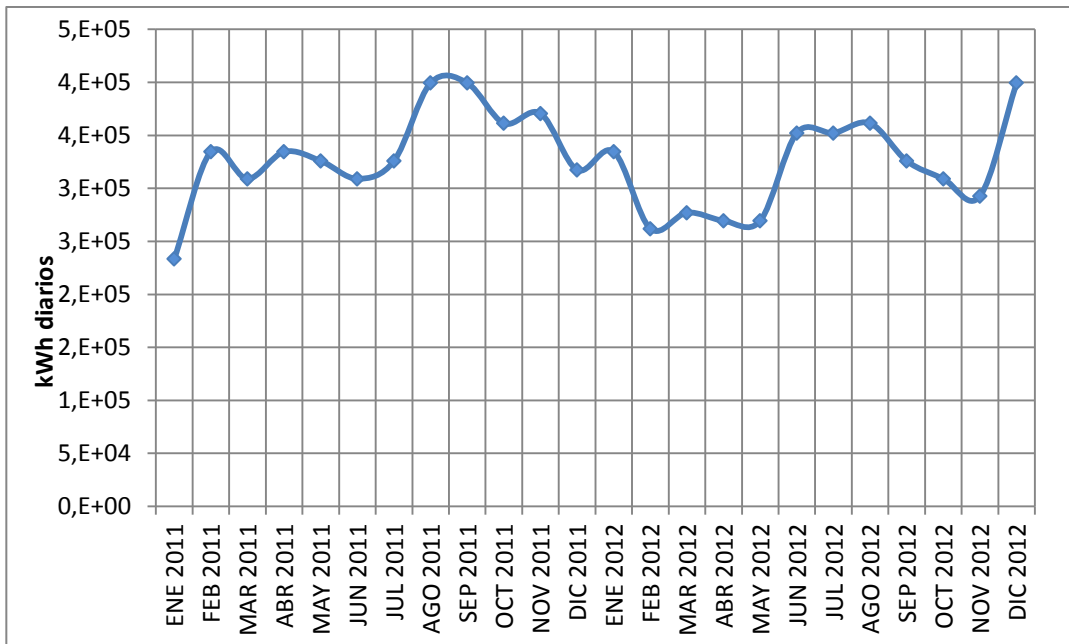
Fuente: elaboración propia.

Figura 18. Dirección del viento en 2011 y 2012, estación meteorológica **Cuilco**



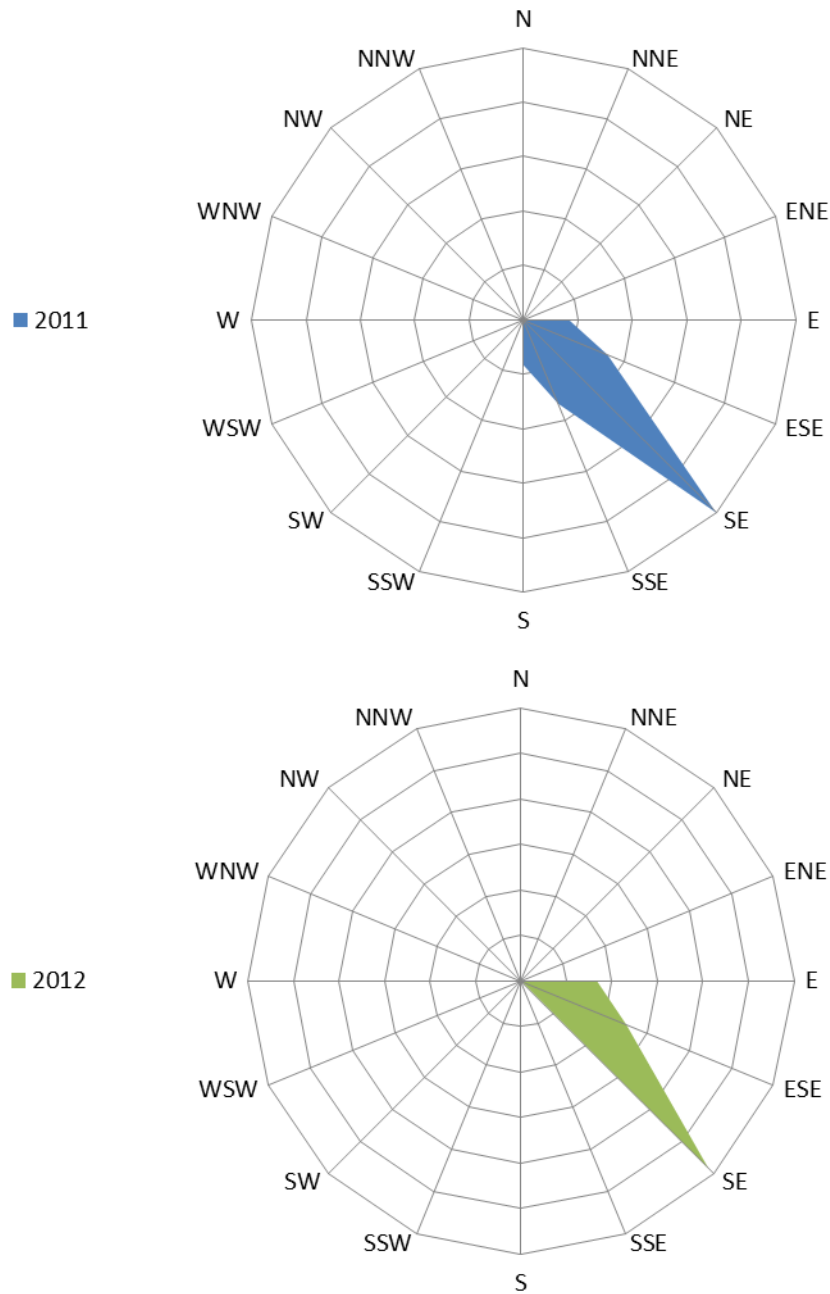
Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Proyección mensual kWh en estación meteorológica Chuitinamit**



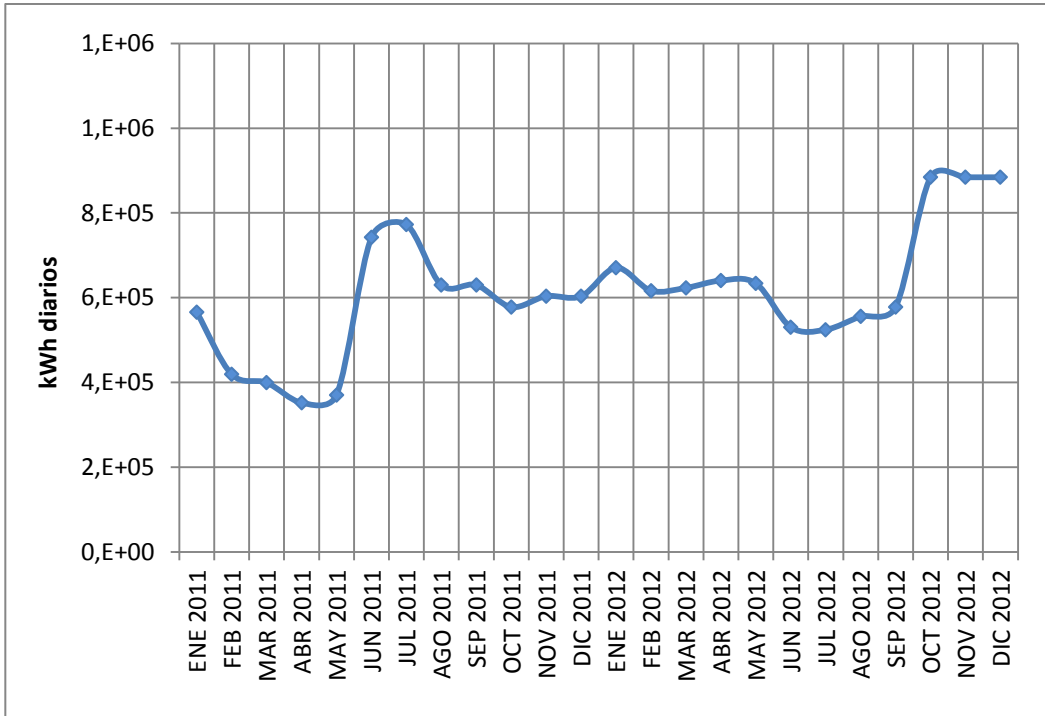
Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Dirección del viento 2011 y 2012, estación meteorológica Chuitinamit**



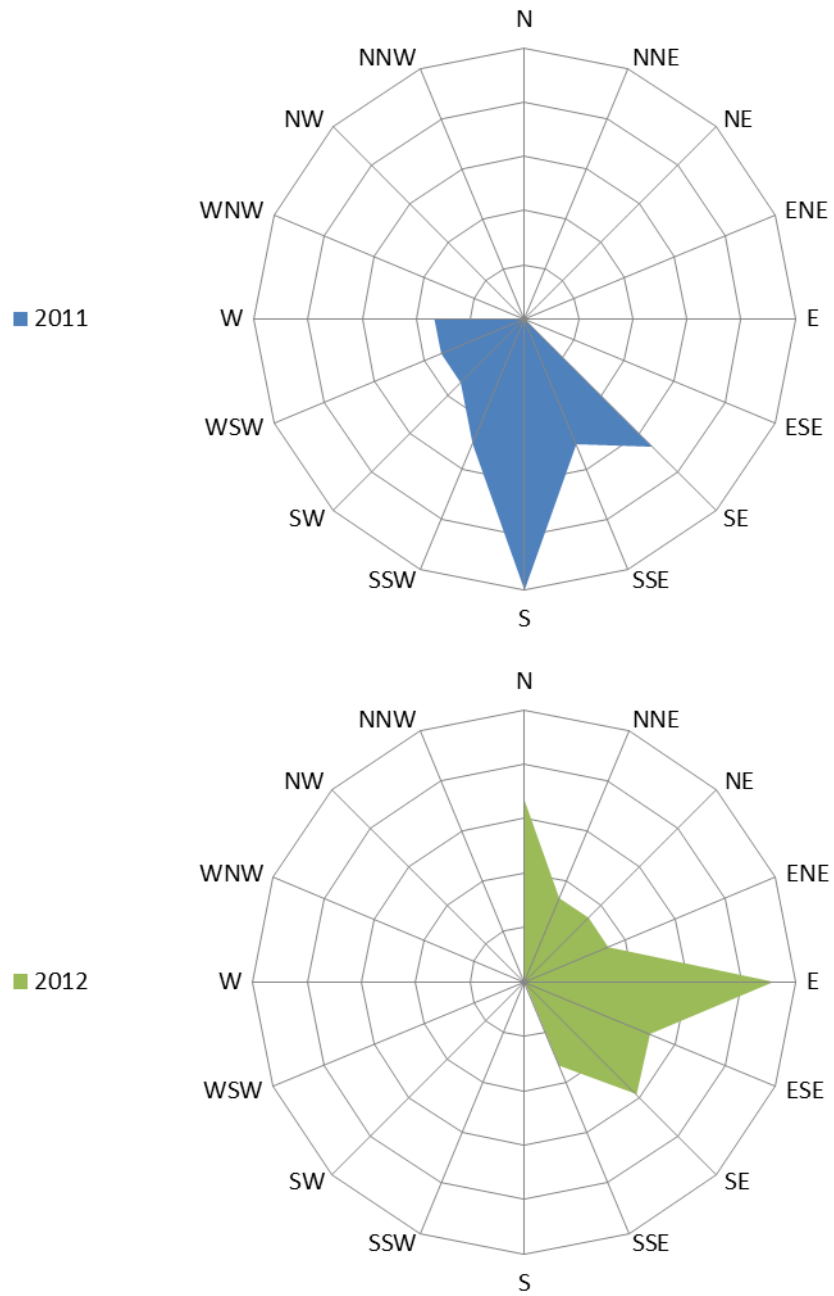
Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Proyección mensual kWh en estación meteorológica Chinique**



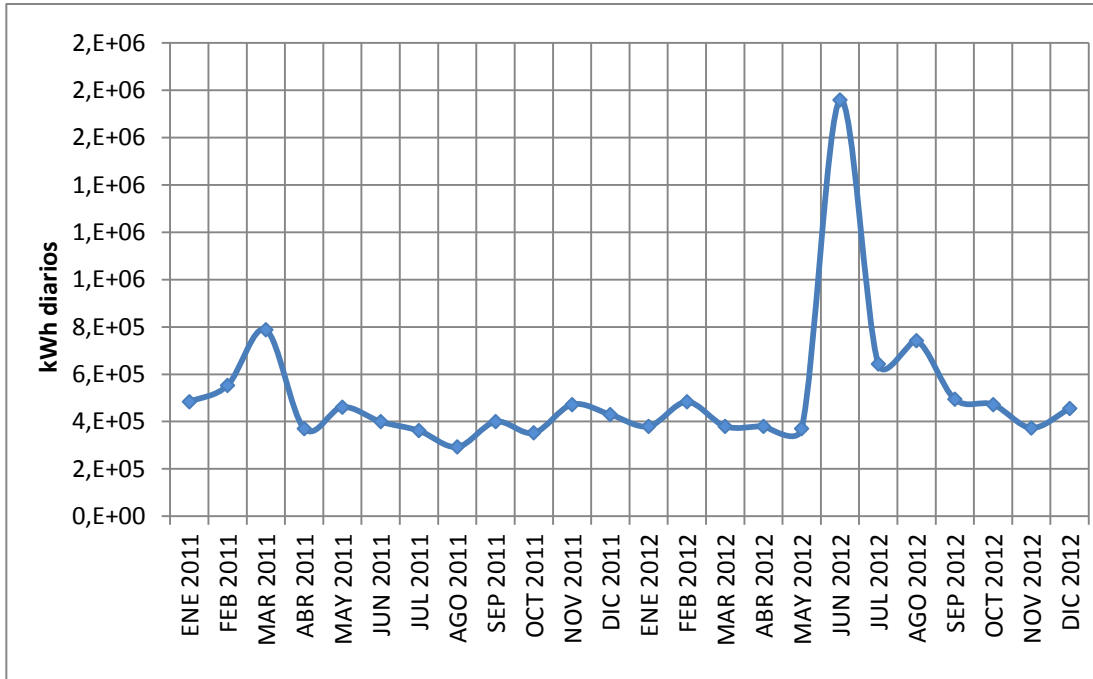
Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Dirección del viento 2011 y 2012, estación meteorológica Chinique**



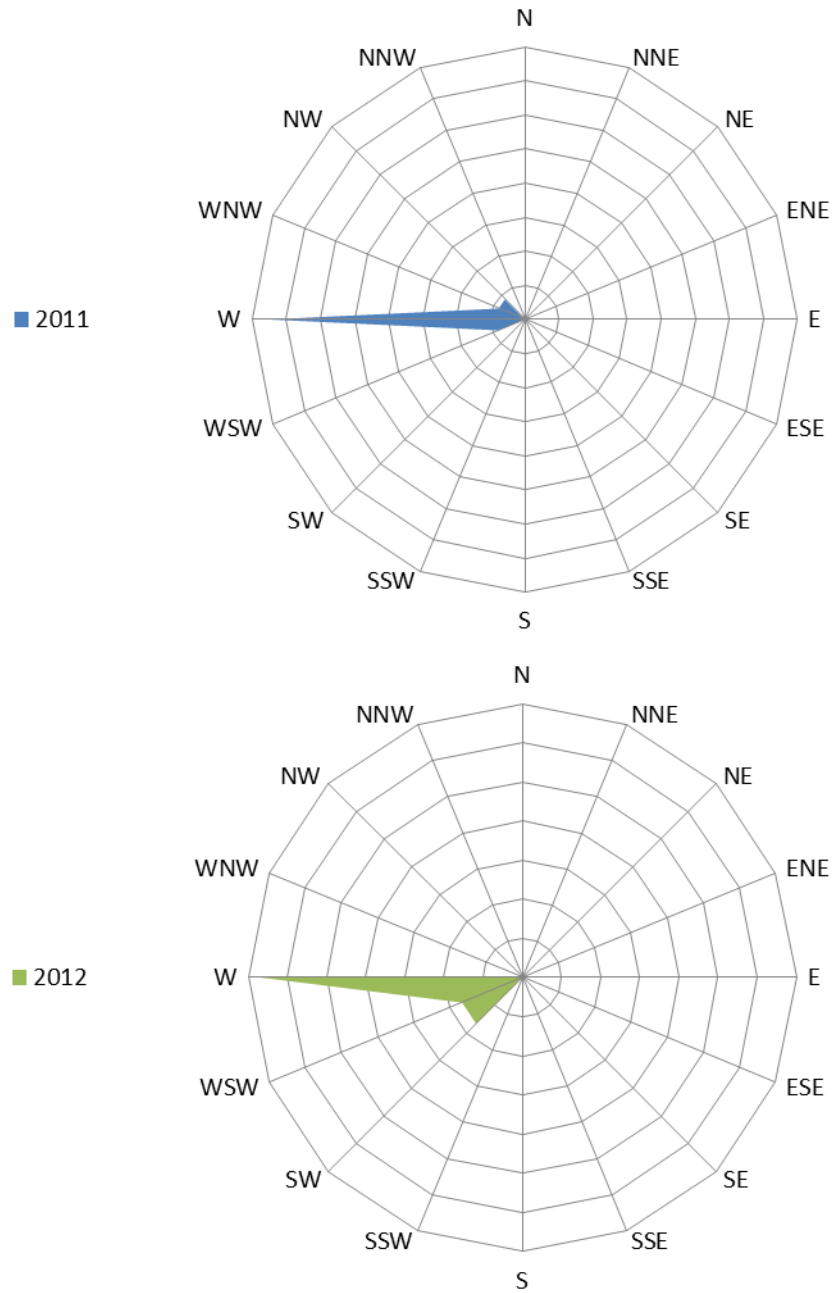
Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Proyección mensual kWh en estación meteorológica San Agustín Acasaguastlán**



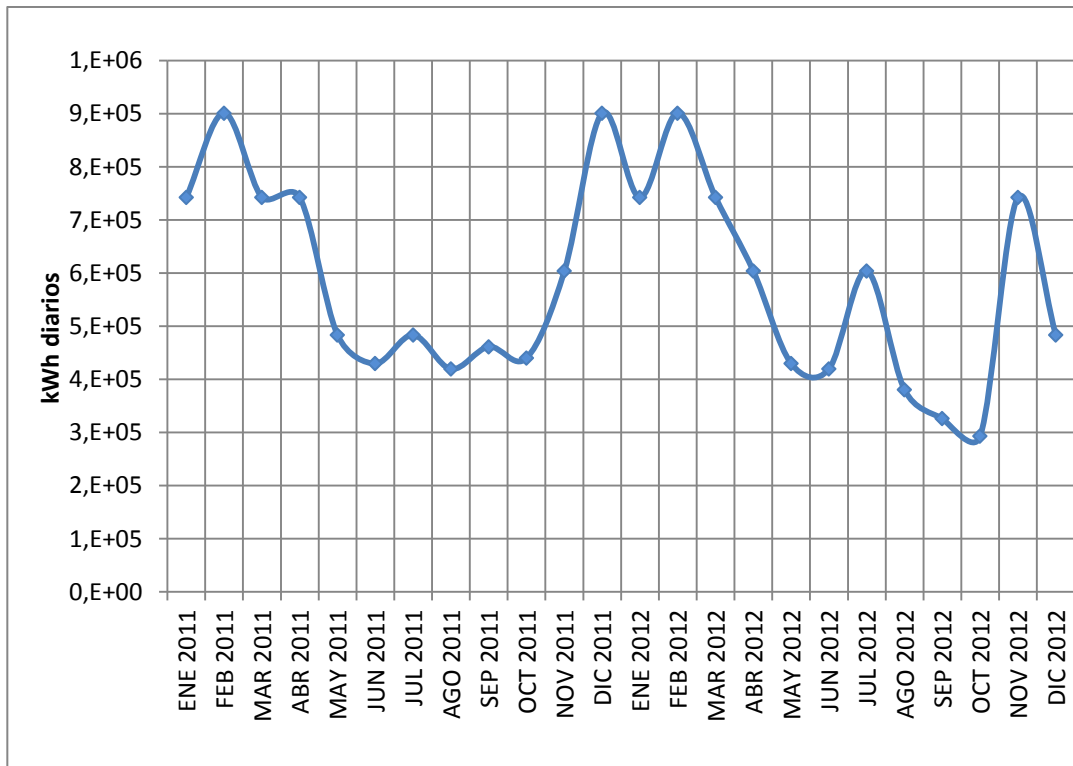
Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Dirección del viento 2011 y 2012, estación meteorológica San Agustín Acasaguastlán**



Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Proyección mensual kWh en estación meteorológica Camotán**



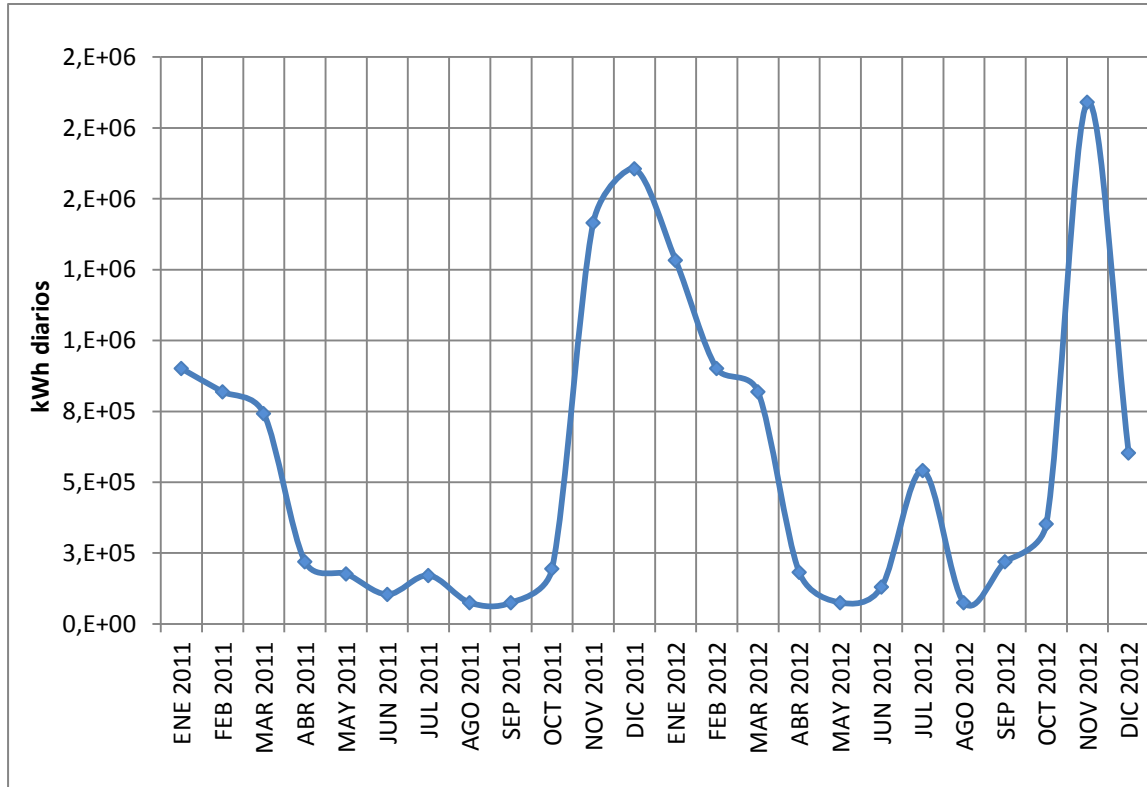
Fuente: elaboración propia.

Figura 26. Dirección del viento 2011 y 2012, estación meteorológica Camotán



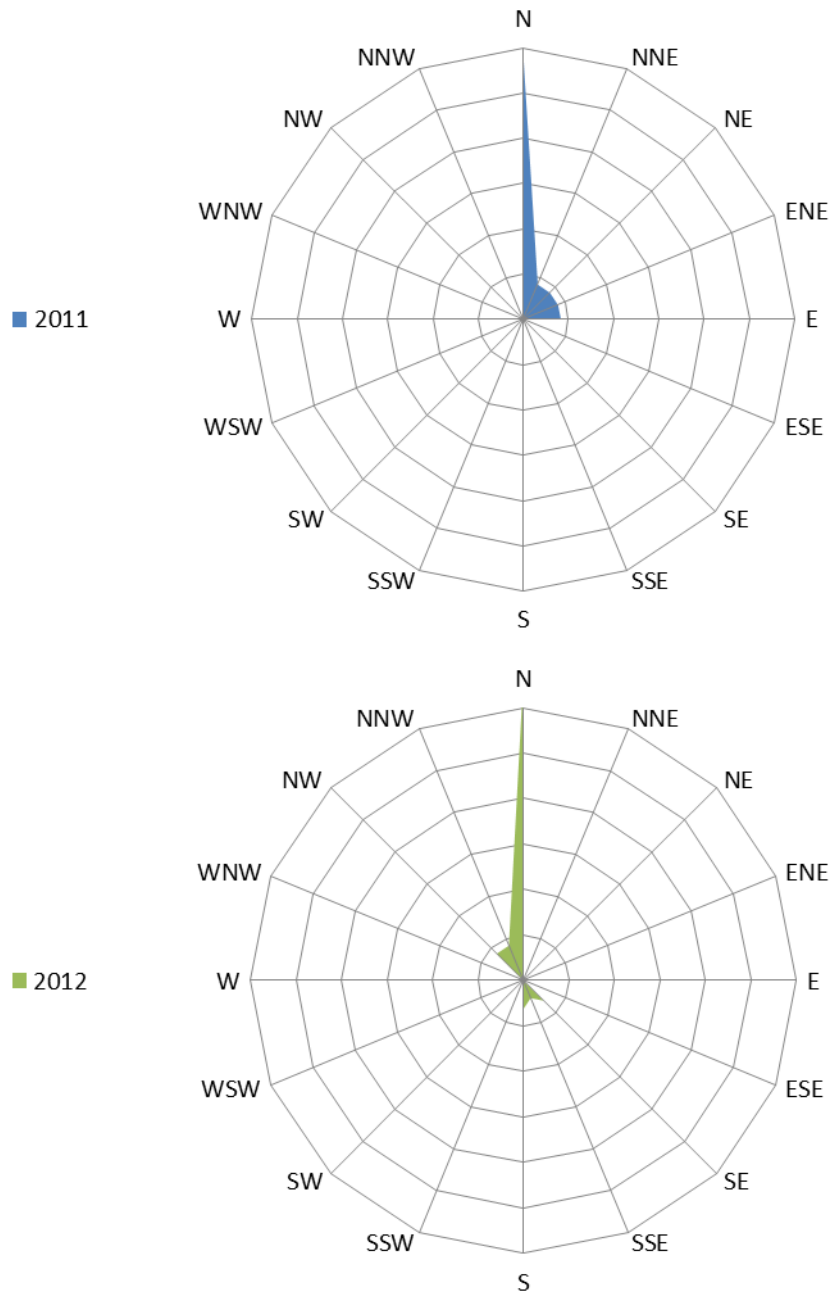
Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Proyección mensual kWh en estación meteorológica Asunción Mita**



Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Dirección del viento 2011 y 2012, estación meteorológica Asunción Mita**



Fuente: elaboración propia.

5.2. Determinación de ubicación de parques eólicos

En base a la información que se obtuvo acerca de las condiciones óptimas para la producción de energía eólica se definieron cuatro etapas para la ubicación de parques eólicos:

- Investigación y evaluación:

Esta etapa abarca todas las tareas destinadas a la selección de sitios con un potencial eólico atractivo para la generación de energía. Entre estas tareas están la instalación de torres de medición (la altura de anemómetro y veleta debe ser a la altura a la que se desea instalar el buje del rotor en caso no se pueda, se hará en dos alturas distintas que comúnmente son 10 m y 20 m), estudios del viento para determinar la velocidad, dirección y continuidad del viento (mediciones preferiblemente cada 10 minutos o 15 minutos), evaluación de los principales factores ambientales y geográficos (capas de inversión de temperatura, rugosidad del terreno, protuberancias o construcciones) y ubicación y distancia entre aerogeneradores. Esta fase tiene una duración aproximada de 2 años.

- Desarrollo y gestión

Durante esta etapa se trabaja en la obtención de los permisos, autorizaciones y licencias necesarias según la legislación de la región o el país, que permitan la construcción y funcionamiento del parque eólico. Adicional se tiene que negociar los terrenos afectados por el proyecto y las compañías comercializadoras y distribuidoras con las que se establecerá la conexión del proyecto, para convertir el sitio con alto potencial eólico en disposición en un

parque productor y comercializador de energía eléctrica. Esta etapa puede tener una duración entre 3 a 4 años aproximadamente.

- Obra civil, instalación y puesta en marcha

Esta etapa abarca toda la creación de accesos al sitio, ingeniería básica del parque (ubicación, altura y capacidad de las turbinas eólicas), solicitud y evaluación de ofertas de proveedores, construcción de plataformas de montaje, instalación eléctrica y modificaciones de las conexiones de red, montaje de equipos, pruebas de funcionamiento de equipos y puesta en marcha de los mismos.

- Operación y mantenimiento

Consta de todas las gestiones técnicas y administrativas que requiere la actividad de explotación de parques eólicos, para su operación y el mantenimiento de todos los equipos.

Los aerogeneradores en la actualidad están diseñados para un funcionamiento automático, aunque la intervención del operador sigue siendo necesaria para el seguimiento y fines de mantenimiento, los sistemas de control automáticos son de especial importancia respecto de la fiabilidad del funcionamiento, debido a que los aerogeneradores normalmente se operan sin personal.

Al igual que cualquier otro sistema técnico, los aerogeneradores deben ser revisados periódicamente y, en el caso que ocurran defectos, estos deben ser reparados. En los aerogeneradores convencionales los componentes de conversión de energía mecánica-eléctrica, tales como ejes, rodamientos,

engranajes y generador, requieren un mantenimiento similar al de otros sistemas técnicos. El tipo e intervalo de trabajo de mantenimiento requerido deben estar contenidos en el manual del aerogenerador y este se ve completado por los datos del sistema de control y vigilancia del aerogenerador.

5.3. Determinación de límites máximos de generación eólica

Los límites máximos de generación eólica son determinados por dos factores importantes: el primer factor la velocidad máxima del viento en la estación meteorológica es variable pero no es completamente aleatorio. En escalas de tiempo son relevantes para los operadores de sistemas de potencia, el viento es estadísticamente predecible por medio de los datos históricos, es este caso el 2011 y 2012. El segundo factor son los temporales los cuales no se pueden determinar y pueden afectar en la potencia que produce el generador.

En las siguientes tablas se puede observar los límites máximos de generación energética que se tiene en cada una de las 6 estaciones meteorológicas con mejor potencial eólico, también se aprecia que en octubre a marzo se tiene los máximos potenciales de todo el año.

Tabla VI. **Potencial energético estación meteorológica Cuilco**

Cuilco		
Promedio Mensual de kWh diarios		
Mes	2011	2012
Enero	2,095,823.83	1,867,401.46
Febrero	2,247,638.14	1,759,694.10
Marzo	2,505,501.95	2,342,152.85
Abril	2,711,334.69	2,928,142.64
Mayo	1,840,074.07	1,392,715.40
Junio	900,963.38	1,099,855.23
Julio	935,173.59	935,173.59
Agosto	1,006,170.21	1,006,170.21
septiembre	819,110.11	900,963.38
Octubre	670,580.93	988,095.73
Noviembre	1,348,032.80	1,138,899.76
Dicembre	1,461,573.77	1,733,430.45
Promedio	1,545,164.79	1,507,724.57

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Potencial energético estación meteorológica Chuitinamit**

Chuitinamit		
Promedio Mensual de kWh diarios		
Mes	2011	2012
Enero	233,425.18	334,534.35
Febrero	334,534.35	261,977.98
Marzo	309,030.44	277,088.47
Abril	334,534.35	269,462.62
Mayo	325,883.03	269,462.62
Junio	309,030.44	352,293.62
Julio	325,883.03	352,293.62
Agosto	399,417.13	361,404.21
septiembre	399,417.13	325,883.03
Octubre	361,404.21	309,030.44
Noviembre	370,670.54	292,769.11
Dicembre	317,382.17	399,417.13
Promedio	335,051.00	317,134.77

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Potencial energético estación meteorológica Chinique**

Chinique		
Promedio Mensual de kWh diarios		
Mes	2011	2012
<i>Enero</i>	565,599.34	670,580.93
<i>Febrero</i>	419,384.38	616,601.43
<i>Marzo</i>	399,417.13	623,184.31
<i>Abril</i>	352,293.62	640,518.70
<i>Mayo</i>	370,670.54	633,814.09
<i>Junio</i>	742,370.95	530,436.65
<i>Julio</i>	772,463.48	524,525.45
<i>Agosto</i>	629,813.88	555,748.78
<i>septiembre</i>	629,813.88	578,075.35
<i>Octubre</i>	578,075.35	884,175.68
<i>Noviembre</i>	603,575.08	884,175.68
<i>Dicembre</i>	603,575.08	884,175.68
Promedio	555,587.72	668,834.39

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Potencial energético estación meteorológica San Agustín Acasaguastlán**

San Agustin Acasaguastlan		
Promedio Mensual de kWh diarios		
Mes	2011	2012
<i>Enero</i>	483,255.99	380,093.93
<i>Febrero</i>	553,304.14	483,255.99
<i>Marzo</i>	787,809.99	380,093.93
<i>Abril</i>	370,670.54	380,093.93
<i>Mayo</i>	461,293.25	370,670.54
<i>Junio</i>	399,417.13	1,759,694.10
<i>Julio</i>	361,404.21	643,213.73
<i>Agosto</i>	292,769.11	742,370.95
<i>septiembre</i>	399,417.13	494,494.06
<i>Octubre</i>	352,293.62	472,189.50
<i>Noviembre</i>	472,189.50	373,481.01
<i>Dicembre</i>	429,612.82	454,836.67
Promedio	446,953.12	577,874.03

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Potencial energético estación meteorológica Camotán**

Camotan		
Promedio Mensual de kWh diarios		
Mes	2011	2012
Enero	742,370.95	742,370.95
Febrero	900,963.38	900,963.38
Marzo	742,370.95	742,370.95
Abril	742,370.95	603,575.08
Mayo	483,255.99	429,612.82
Junio	429,612.82	419,384.38
Julio	483,255.99	603,575.08
Agosto	419,384.38	380,093.93
septiembre	461,293.25	325,883.03
Octubre	440,006.23	292,769.11
Noviembre	603,575.08	742,370.95
Dicembre	900,963.38	483,255.99
Promedio	612,451.95	555,518.80

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Potencial energético estación meteorológica Asunción Mita**

Asunción Mita		
Promedio Mensual de kWh diarios		
Mes	2011	2012
Enero	900,963.38	1,282,817.00
Febrero	819,110.11	900,963.38
Marzo	742,370.95	819,110.11
Abril	219,961.76	182,696.72
Mayo	176,927.78	75,446.88
Junio	104,383.29	130,372.22
Julio	171,281.59	541,188.42
Agosto	75,446.88	75,446.88
septiembre	75,446.88	219,961.76
Octubre	194,608.09	352,293.62
Noviembre	1,415,422.27	1,840,074.07
Dicembre	1,606,025.29	603,575.08
Promedio	541,829.02	585,328.85

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Seis de las treinta estaciones meteorológicas presentaron un potencial eólico alto, principalmente durante los meses de octubre a marzo coincidiendo con la época seca donde la energía hidroeléctrica tiene su temporada baja. Esto muestra que estas dos energías renovables son complementarias para el caso de Guatemala.
2. Se creó una base de datos con la velocidad y dirección del viento de treinta estaciones meteorológicas del INSIVUMEH localizadas en todo el territorio nacional, para determinar el potencial eólico existe en cada una e identificar lugares con un alto potencial para generar energía eólica.
3. El tipo de turbina eólica o aerogenerador a utilizar se debe elegir con base distintos factores: velocidad media anual del viento, dirección del viento, posibles temporales y turbulencias en el emplazamiento. Para determinar el potencial en las estaciones se utilizó una turbina eólica marca Vesta Modelo V100-1.8/2.0 MW.
4. La instalación de parques eólicos para la generación de energía eólica en Guatemala es una opción viable debido al potencial que existente en el país sin explotar y la Ley incentivos para el desarrollo de proyectos de energías renovables, el cual exonera de aranceles e impuesto a proyecto de esta índole.

RECOMENDACIONES

1. Continuar con las mediciones de velocidad y dirección del viento en diferentes puntos del país con el apoyo de otras instituciones privadas o públicas como el Ministerio de Energía y Minas, para conocer el comportamiento estacional de nuevas emplazamientos. Instalando equipos confiables y calibrados mediante estándares internacionales para realizar una correcta evaluación.
2. Para seleccionar un emplazamiento adecuado se debe de tomar en cuenta las protuberancias, capas de inversión de temperatura, contaminación sónica e impacto visual (como la población cercana al emplazamiento puede percibir la tecnología).
3. Impulsar el desarrollo de proyectos de energía eólica terrestre y marina disminuyendo la dependencia a los productos derivados del petróleo para la generación de energía eléctrica, evitando así la contaminación que estos causan y contribuyendo para alcanzar desarrollo sostenible en el país.
4. Estudiar la posibilidad de instalación de parques de energía eólica a menor escala para la electrificación de pequeñas comunidades donde las grandes redes distribuidoras de energía eléctrica no están presentes.

5. Es recomendable considerar los siguientes factores para la instalación de parques eólicos: disponibilidad transporte de gran capacidad, estado técnico de los accesos al emplazamiento, cualidades técnicas y distancia a la red de distribución de energía eléctrica y características climáticas.

BIBLIOGRAFÍA

1. AMADOR GUERRA, Julio. *Análisis de los parámetros técnicos en la aplicación de los sistemas de información geográfica a la integración regional de las energías renovables en la producción descentralizada de electricidad*. Tesis doctoral de Ing. Industrial. Escuela Técnica Superior de Ing. Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, 2000. 201 p.
2. BAILLARIE ROSENMAN, Paul. *Diseño de aerogeneradores con imanes permanentes para aplicaciones en electrificación rural*. Trabajo de graduación de Ing. Civil Electricista. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, 2007. 119 p.
3. CASTRO BIZE, Nicolás Oscar. *Evaluación de la infraestructura asociada a zonas de desarrollo eólico en el sector norte del sic*. Trabajo de graduación de Ing. Civil Electricista. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, 2007. 67 p.
4. KETTERER HOPPE, Javiera Ninel. *Metodología básica para la definición de la ubicación óptima de un generador virtual*. Trabajo de graduación de Ing. Civil Electricista. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, 2009. 126 p.

5. Ministerio de Energía y Minas. *Informe balance energético 2012*. Dirección General de Energía, 2013. 9 p.
6. _____. *Guía del subsector eléctrico y de las energías renovables*. Dirección general de energía, 2011. p. 15.
7. _____. *Estadísticas energéticas subsector eléctrico 2012*, Dirección general de energía. 2012. p. 29.
8. _____. *Ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de energía renovable*. Diario de Centroamérica, 10 de noviembre de 2003, Decreto No. 52-2003. 6 p.
9. _____. *Reglamento de la ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de energía renovable*. Diario de Centroamérica, 22 de junio de 2005, Acuerdo Gubernativo No. 211-2005. 7 p.
10. VASSAUX CASTRO; Luis Pedro. *Estudio técnico de factibilidad de generación de energía eléctrica por medio de aerogeneradores en el municipio de Puerto Barrios*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2004. 77 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Promedio de potencial eólico Anual de las 30 estaciones meteorológicas del INSIVUMEH**

Potencial eólico kWh			
No.	Estación	2011	2012
1	FLORES, AEROPUERTO MUNDO MAYA PETEN.	53,265.24	54,528.45
2	TODOS SANTOS	57,706.44	69,493.47
3	HUEHUETENANGO	53,515.05	98,970.85
4	CUILCO	1,545,164.79	1,507,724.57
5	CHUITINAMIT	335,051.00	317,134.77
6	CHINIQUE	555,587.72	668,834.39
7	COBAN	27,467.38	32,025.99
8	CAHABON	4,484.93	50,945.33
9	CUBULCO	2,494.44	1,611.20
10	SAN AGUSTIN ACASAGUASTLAN	446,953.12	577,874.03
11	PASABIEN	29,991.33	27,758.24
12	CAMOTAN	612,451.95	555,518.80
13	ESQUIPULAS	84,295.08	88,900.81
14	POTRERO CARRILLO	2,506.71	10,109.15
15	LA CEIBITA	44,355.97	10,486.00
16	ASUNCION MITA	541,829.02	585,328.85
17	LOS ESCLAVOS	3,581.89	4,658.75
18	MONTUFAR	36,268.16	51,309.04
19	PUERTO DE SAN JOSE	91,080.47	60,789.64
20	INSIVUMEH	95,889.54	497,490.12
21	ALAMEDA ICTA	50,274.11	11,951.93
22	EL CAPITAN	43,667.21	21,758.64
23	LAVOR OVALLE	310,027.14	344,095.61
24	SAN MARCOS	28,078.98	1,974.65
25	BASE MILITAR RETALHULEU	58,109.57	73,323.21
26	CAMPERICO	6,482.78	22,438.04
27	SAN AGUSTIN CHIXOY	8,088.29	4,951.32
28	LAS VEGAS	179,088.28	1,293.08
29	PUERTO BARRIOS	70,497.40	117,484.84
30	TECUN HUMAN	111,193.90	106,987.75

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Especificación técnicas turbina eólica marca Vesta V100-1.8/2.0 MW (50/60hz)**

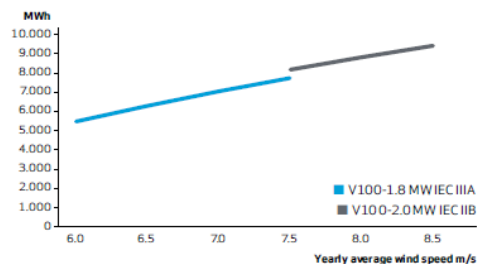
V100-1.8/2.0 MW™

Facts & figures

POWER REGULATION	Pitch regulated with variable speed
OPERATING DATA	
Rated power	1,800/2,000 kW (50/60 Hz*)
Cut-in wind speed	3 m/s
Rated wind speed	12 m/s
Cut-out wind speed	20 m/s
Wind class	IEC S (IEC IIIA average wind/ IEC IIA extreme wind) IEC IIB (50/60 Hz)
Operating temperature range:	standard turbine: -20 °C to 40 °C low temperature turbine: -30 °C to 40 °C
*The rated power for V100 IEC IIIA 60 Hz is limited to 1950 kW in North America	
SOUND POWER	Max 105 dB*
(Mode 0, 10 m above ground, hub height 80 m, air density 1.225 kg/m³)	
*for further information on noise limits please contact Vestas	
ROTOR	
Rotor diameter	100 m
Swept area	7,854 m²
Air brake	full blade feathering with 3 pitch cylinders
ELECTRICAL	
Frequency	50/60 Hz
Generator type	4-pole (50 Hz)/6-pole (60 Hz) doubly fed generator, slip rings
GEARBOX	
Type	two helical stages and one planetary stage
BLADE DIMENSIONS	
Length	49 m
Max chord	3.9 m

TOWER	
Type	tubular steel tower
Hub heights	80 m, 95 m and 120 m (IEC IIIA)
NACELLE DIMENSIONS	
Height for transport	4 m
Height installed (incl. CoolerTop*)	5.4 m
Length	10.4 m
Width	3.5 m
HUB DIMENSIONS	
Max. transport height	3.4 m
Max. transport width	4 m
Max. transport length	4.2 m
Max. weight per unit for transportation	70 metric tonnes

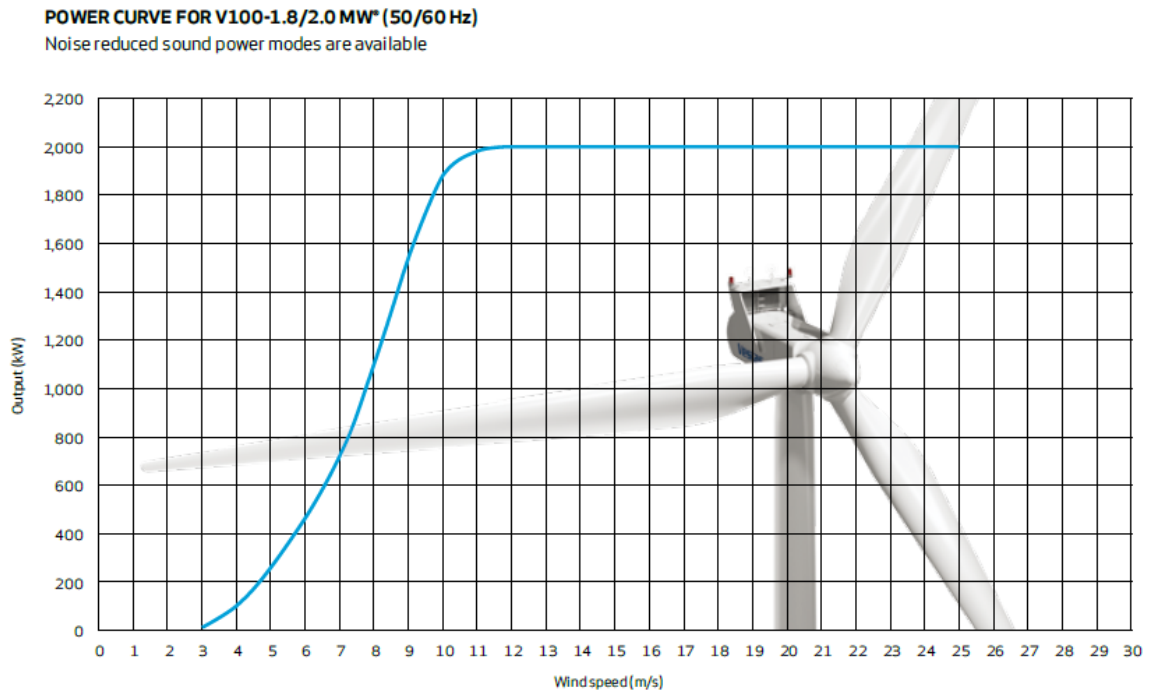
TURBINE OPTIONS



Assumptions
One wind turbine, 100% availability, 0% losses, k factor =2, Standard air density = 1.225, wind speed at hub height

Fuente: http://www.vestas.com/en/products_and_services/turbines/v100-2_0_mw. Consulta: agosto de 2012.

Apéndice 3. **Curva de potencia turbina eólica marca Vesta V100-1.8/2.0 MW (50/60hz)**



Fuente: http://www.vestas.com/en/products_and_services/turbines/v100-2_0_mw. Consulta: agosto de 2012.

