

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY



**DESARROLLO METODOLÓGICO DE EVALUACIÓN
TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA LA MEJOR
IMPLEMENTACIÓN DE GENERADORES EÓLICOS DE BAJA
ESCALA**

TESIS QUE PARA OPTAR EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN DESARROLLO SOSTENIBLE
PRESENTA

GONZALO ANDRÉS VALENTI MORALES

Asesor: Dr. JOSÉ LUIS CUEVAS
Comité de Tesis: Dr. CÉSAR OCTAVIO MALDONADO
MSc. JORGE EDUARDO AGUIRRE

Jurado: Dr. JOSÉ LUIS CUEVAS
Dr. CÉSAR OCTAVIO MALDONADO
MSc. JORGE EDUARDO AGUIRRE

Atizapán de Zaragoza, Edo. Méx. Mayo de 2011.

DEDICATORIA

Agradezco a las personas que más amo en la vida, mi FAMILIA, de quienes he recibido todo el amor que una persona puede necesitar para vivir. A mi madre y padre, por estar conmigo en mi pensamiento y corazón desde el día que partí. A mi hermano por todo su apoyo y cariño y a mi abuelita por la gran labor de pedir a Dios cada día y cada minuto por nosotros sus hijos.

A mis profesores de quienes he recibido conocimiento, consejos y sobre todo su amistad.

A mis asesores con quienes he trabajado en este tiempo y de los cuales aprendí de su experiencia y conocimiento.

A mis amigos del alma, con quienes he compartido momentos inolvidables.

A ti por llegar a mi vida cuando menos lo esperaba.

RECONOCIMIENTOS

En primer lugar quiero hacer extensivo el reconocimiento al Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Estado de México, que por poco menos de seis años ha sido responsable de mi formación como profesional y ciudadano, el cual me ha apoyado en todo momento para culminar mi carrera profesional y la maestría.

Reconocer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico recibido a lo largo de este período y por depositar su confianza en la juventud incentivando la ciencia y tecnología a través de la investigación.

También reconocer particularmente los esfuerzos realizados por el EGIC (Escuela de Graduados en Ingeniería y Ciencias) y la Maestría en Desarrollo Sostenible, por su gran labor académica promoviendo el crecimiento profesional de sus alumnos y por su compromiso con la sociedad a través de la educación.

RESUMEN

El presente trabajo consiste en desarrollar una metodología de evaluación técnica y económica para la mejor instalación de sistemas eólicos solares de baja escala, orientado a incentivar el uso de energías renovables en México como alternativa para la electrificación rural en zonas alejadas de la red eléctrica. La razón principal del análisis radica en el gran número de familias que carecen de este servicio por la dificultad de llevar energía eléctrica convencional a través de cableado y por otro lado el desconocimiento de cómo planear un proyecto de esta naturaleza. Si bien hoy en día existe la tecnología con cada vez mayores rendimientos y también los mecanismos económicos necesarios para el financiamiento, en muchos casos se desconoce el potencial eólico donde se pretende realizar la instalación, por lo que es necesario generar sistemas que permitan tomar mejores decisiones con respecto a la evaluación del proyecto y dimensionar un sistema acorde a las necesidades particulares de los usuarios.

La metodología se construye paralelamente al análisis realizado en la zona de la Rumorosa en el Estado de Baja California. Se utilizaron datos meteorológicos del 2010 con intervalos de 10 minutos e información técnica de tres generadores eólicos y un panel solar. El trabajo se divide en tres partes, la primera enfocada a la evaluación técnica en la cual se determina la densidad de potencia y la energía anual de salida, la segunda donde se evalúa la factibilidad económica tomando en cuenta la inversión inicial y flujos de efectivo para un horizonte de 20 años (en relación al requerimiento energético de una familia o conjunto de familias) y la tercera enfocada a la construcción de la plataforma tecnológica denominada: “Sistema de Evaluación Energética” como apoyo a la toma de decisiones.

Los resultados muestran que bajo las condiciones de viento de la zona, los precios de generadores y paneles solares y el precio vigente de electricidad para uso doméstico, la instalación de sistemas híbridos no es factible en términos económicos. A partir de esta información, se evalúan escenarios reales e hipotéticos al variar ciertos parámetros de entrada como los son: el precio actual del Kw-hr, el requerimiento energético por familia, número de familias involucradas. El análisis de sensibilidad determina bajo qué condiciones el proyecto empieza a ser factible.

La metodología y plataforma tecnológica propuesta, se orientan a solucionar el problema de carencia de energía, al identificar las zonas susceptibles para la instalación de energía renovables e incentivan el desarrollo de más y mejores bases de datos que permitan a los usuarios (gobierno, proveedores, beneficiarios) conocer más a fondo, cómo y dónde es factible la instalación de generadores eólicos de baja escala complementados con energía solar, siempre y cuando las condiciones así lo permitan.

SUMMARY

The present work consists in a methodology development for technical and economic evaluation for the best installation of small-scale solar systems, aimed at encouraging the use of renewable energy in Mexico as an alternative for rural electrification in remote areas of the grid. The main reason for analysis is the large number of households unserved by the difficulty of conventional electricity through wires and, the ignorance of how to plan a project of this nature. While there is now technology with better performance and economic mechanisms necessary for the financing, in many cases is not known the wind and solar potential to perform the installation, so we need to develop systems to make better decisions with respect to project evaluation and sizing a system according to the particular needs of users.

The methodology is built parallel to the analysis in the area of La Rumorosa in the State of Baja California. Meteorological data from 2010 were used with 10 minute intervals and technical information of three wind turbines and one solar panel. The work is divided into three parts, first one focused on the technical evaluation which determines the power density and annual energy output, the second part evaluates the economic feasibility taking into account the initial investment and cash flows for a horizon of 20 years (in relation to energy requirements of a family or group of families) and the third focused on building the technology platform called "Energy Rating System" to support the decision-making.

The results show that under the wind conditions in the area, prices of generators and solar panels and the current price of electricity for domestic use, the installation of hybrid systems is not economically feasible. From this information, assess actual and hypothetical scenarios by varying certain input parameters as are the current price of the kw-hr, the energy requirement per household, number of families involved. Sensitivity analysis determines under what conditions the project begins to be feasible.

The proposed methodology and technology platform, are aimed at solving the problem of lack of energy, to identify likely areas for the installation of renewable energy and encourage the development of more and better databases that allow users (government, suppliers, beneficiaries) learn more about how and where it is feasible to install small-scale wind generators supplemented by solar energy, if conditions allow.

CONTENIDO

Capítulo 1. Introducción.....	12
1.1 Preliminares	12
1.2 Justificación	13
1.3 Objetivos.....	15
1.4 Objetivos específicos.....	15
Capítulo 2. Antecedentes.....	16
2.1 RETScreen International (Permitiendo decisiones de energías más limpias).....	16
2.2 Danish Wind Industry Association.....	18
2.3 Metodología para la implementación de generadores eólicos de pequeña escala, Caso Andalucía España	19
2.4 Estudio de factibilidad para el uso de energía eólica con fines industriales	19
Capítulo 3. Desarrollo Sostenible	21
3.1 Concepto de sostenibilidad	21
3.2 Aspectos Históricos de la Sostenibilidad.....	23
Capítulo 4. Energía convencional y energía eólica.....	25
4.1 Antecedentes preliminares	25
4.2 Antecedentes de la energía	25
4.3 Panorama general de producción eléctrica en México	28
4.3 Energía eólica.....	29
4.3.1 Historia de la energía eólica	29
4.3.2 Historia de la energía eólica en México.....	31
4.4 El viento.....	32
4.4.1 Velocidad del viento.....	33
4.4.2 Dirección del viento.....	33
4.4.3 Distribución del viento.....	34
4.4.4 Variabilidad mensual y estacional	36
4.5 Aerogeneradores de baja escala	37
4.6 Clasificación de generadores eólicos.....	38
4.6.1 Según el eje de trabajo	38
4.6.2 Según el número de palas.....	38
4.6.2 Según la posición del rotor en la máquina	39
4.6.2 Según el anclaje de las hélices al buje	39
4.7 Método de operación del generador eólico para la transformación de energía	39
4.8 Factor de carga	42
4.9 Relaciones de altura, velocidad, área	42
4.10 Perfil del viento	43
4.11 Ley de Betz y la máxima eficiencia de conversión	44
4.12 Diseño de las palas a partir de la fórmula de Betz	47
4.13 Generador eólico no ideal	48
4.13.1 Pérdidas.....	48

4.14 Velocidades en un generador	48
4.14.1 Velocidad específica de un rotor	48
4.14.2 Velocidad de giro.....	49
4.14.3 Velocidad de arranque	50
4.14.4 Velocidad de conexión.....	50
4.14.5 Velocidad de potencia nominal	50
4.14.6 Velocidad de corte	50
4.15 Par de giro de un generador eólico	50
4.16 Almacenamiento de energía.....	51
4.17 Dimensionamiento del banco de baterías y elección de inversor	51
4.17.1 Banco de baterías.....	51
4.17.2 Elegir un inversor	52
4.18 Sistemas de generación híbrida	53
4.18.1 Paneles solares.....	54
4.18.2 Ventajas para la utilización de paneles solares.....	55
4.19 Análisis económico	55
Capítulo 5. Metodología.....	57
5.1 Obtención de datos	57
5.2 Descripción de la estación meteorológica	57
5.3 Descripción de zona de análisis	59
5.4 Caracterización de la zona	60
5.5 Análisis del viento.....	60
5.6 Rosa de los vientos	63
5.7 Variabilidad mensual del viento, promedio por hora	63
5.8 Análisis de la densidad del aire	64
5.9 Características del aerogenerador.....	65
5.10 Ajuste de potencia	68
5.11 Análisis de densidad de potencia, distribución de probabilidad de la energía	68
5.12 Simulación de datos a partir de la distribución de probabilidad obtenida	70
5.12.1 Modelo Sintético	70
5.12 Cálculo de factor de carga	71
5.13 Características de las necesidades	71
5.14 Número de generadores y el número de paneles solares	72
5.15 Análisis económico-financiero.....	73
5.16 Desarrollo de la plataforma tecnológica	75
Capítulo 6. Resultados obtenidos.....	76
6.1 Caracterización de la zona de estudio.....	76
6.2 Determinación de la densidad del aire en la zona	77
6.3 Análisis del viento en la zona de estudio.....	77
6.3.1 Resultados anuales.....	77
6.3.2 Resultado semestrales	78
6.4 Potencial eólico y solar de la zona mensual.....	80
6.5 Velocidad promedio en 24 hrs.	80
6.6 Comportamiento del viento promedio por hora durante el día a lo largo de un mes.....	81
6.7 Densidad de potencia y energía disponible.....	82

6.8 Análisis semestral.....	84
6.9 Resultados del modelo sintético.....	84
6.10 Resultados de la simulación de datos para diferentes velocidades medias.....	85
6.11 Factor de carga.....	86
6.12 Potencial solar de la zona.....	87
6.13 Resultados del análisis costo beneficio.....	87
6.14 Plataforma tecnológica.....	90
6.15 Metodología propuesta.....	91
Capítulo 7. Análisis y discusión de los resultados.....	92
7.1 Análisis estadístico de los datos.....	92
7.2 Corrección de potencia.....	93
7.3 Análisis de factibilidad técnica.....	93
7.4 Validación de modelo sintético con base a datos reales.....	94
7.5 Análisis de factor de carga.....	94
7.6 Análisis de resultados costo beneficio.....	95
Capítulo 8. Conclusiones, recomendaciones e investigaciones futuras.....	97
8.1 Conclusiones.....	97
8.2 Recomendaciones.....	98
8.3 Investigaciones futuras.....	99
Capítulo 9. Referencias bibliográficas.....	101
ANEXOS.....	105
ANEXO A. Proyectos eólicos en México.....	105
ANEXO B. Resultados mensuales.....	106
ANEXO C. Comportamiento del viento promedio al día por hora y mes.....	112
ANEXO D. Precio y consumo per cápita en Baja California.....	114
ANEXO E. Lista de precios para los generadores eólicos y panel solar.....	115
ANEXO F. Análisis de costo beneficio a diferentes precios, número de familias y velocidades del viento.....	116
ANEXO G. Plataforma Tecnológica.....	121
ANEXO H. Cálculo de densidad de potencia y energía.....	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Base de datos de diferentes emplazamientos en el mundo.....	17
Figura 2 Base de datos para diferentes tipos de generadores eólicos.....	17
Figura 3 Variables de entrada solicitadas para el cálculo de potencial eólico.....	18
Figura 4 Variables de salida para la determinación de potencial eólico.....	18
Figura 5 Dimensiones del desarrollo sostenible.....	22
Figura 6 Consumo mundial de energía eléctrica por región, 1998-2008 en TW-hr.....	26
Figura 7 Porcentajes de utilización de fuentes de energía convencionales y alternativas para el 2009.....	27
Figura 8 Emisiones de CO ₂ totales en México y porcentajes de participación dentro del sector energético.....	28
Figura 9 Generación de electricidad por tipo de tecnología.....	29
Figura 10 Modelos de generadores eólicos de eje vertical y eje horizontal desarrollados.....	30

6.8 Análisis semestral.....	84
6.9 Resultados del modelo sintético.....	84
6.10 Resultados de la simulación de datos para diferentes velocidades medias.....	85
6.11 Factor de carga.....	86
6.12 Potencial solar de la zona.....	87
6.13 Resultados del análisis costo beneficio.....	87
6.14 Plataforma tecnológica.....	90
6.15 Metodología propuesta.....	91
Capítulo 7. Análisis y discusión de los resultados.....	92
7.1 Análisis estadístico de los datos.....	92
7.2 Corrección de potencia.....	93
7.3 Análisis de factibilidad técnica.....	93
7.4 Validación de modelo sintético con base a datos reales.....	94
7.5 Análisis de factor de carga.....	94
7.6 Análisis de resultados costo beneficio.....	95
Capítulo 8. Conclusiones, recomendaciones e investigaciones futuras.....	97
8.1 Conclusiones.....	97
8.2 Recomendaciones.....	98
8.3 Investigaciones futuras.....	99
Capítulo 9. Referencias bibliográficas.....	101
ANEXOS.....	105
ANEXO A. Proyectos eólicos en México.....	105
ANEXO B. Resultados mensuales.....	106
ANEXO C. Comportamiento del viento promedio al día por hora y mes.....	112
ANEXO D. Precio y consumo per cápita en Baja California.....	114
ANEXO E. Lista de precios para los generadores eólicos y panel solar.....	115
ANEXO F. Análisis de costo beneficio a diferentes precios, número de familias y velocidades del viento.....	116
ANEXO G. Plataforma Tecnológica.....	121
ANEXO H. Cálculo de densidad de potencia y energía.....	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Base de datos de diferentes emplazamientos en el mundo.....	17
Figura 2 Base de datos para diferentes tipos de generadores eólicos.....	17
Figura 3 Variables de entrada solicitadas para el cálculo de potencial eólico.....	18
Figura 4 Variables de salida para la determinación de potencial eólico.....	18
Figura 5 Dimensiones del desarrollo sostenible.....	22
Figura 6 Consumo mundial de energía eléctrica por región, 1998-2008 en TW-hr.....	26
Figura 7 Porcentajes de utilización de fuentes de energía convencionales y alternativas para el 2009.....	27
Figura 8 Emisiones de CO ₂ totales en México y porcentajes de participación dentro del sector energético.....	28
Figura 9 Generación de electricidad por tipo de tecnología.....	29
Figura 10 Modelos de generadores eólicos de eje vertical y eje horizontal desarrollados.....	30

Figura 11 Tamaños de rotores en función de la potencia demandada.....	31
Figura 12 Rosa de los vientos en Matlab	34
Figura 13 Distribución Weibull para la velocidad del viento.....	35
Figura 14 Variaciones en la velocidad del viento en lugares de latitud media.....	36
Figura 15 Generador eólico de baja escala para uso doméstico	37
Figura 16 Partes básicas generadores eólicos de baja escala.....	40
Figura 17 Cilindro diferencial para determinar potencia eólica	41
Figura 18 Ley de Hellman para el perfil del viento	43
Figura 19 Flujo de viento a través del generador eólico	44
Figura 20 Relaciones de potencia máxima. Ley de Betz.....	46
Figura 21 Relaciones de potencia máxima bajo un diferencial de área	47
Figura 22 Sistema Híbrido de generación eléctrica	54
Figura 23 Estructura tipo Andamio (izq.) y Estructura tipo Torre Triangular (der.)	58
Figura 24 Localización de la estación La Rumorosa en México	59
Figura 25 Vista de la región de análisis. La Rumorosa, Baja California	60
Figura 26 Distribución del viento real y ajustada	62
Figura 27 Rosa de los vientos, frecuencia de dirección y viento	63
Figura 28 Curva de potencia otorgada por el fabricante	65
Figura 29 Curva característica de Potencia para el Modelo i1POWER	66
Figura 30 Curva característica de potencia para el Modelo i5POWER	67
Figura 31 Curva característica de potencia para el Modelo i10POWER	68
Figura 32 Temperatura y humedad relativa promedio por mes	76
Figura 33 Presión atmosférica promedio y precipitación acumulada por mes	76
Figura 34 Densidad del aire en La Rumorosa 2010.....	77
Figura 35 Distribución de probabilidad Weibull (izq.) y Rosa de los Vientos (der.)	77
Figura 36 Distribución de probabilidad Weibull (izq.) Rosa de los vientos (der.)	78
Figura 37 Distribución de probabilidad Weibull (izq.) Rosa de los vientos (der.)	79
Figura 38 Velocidad media del viento en 24 horas a lo largo de un año.....	81
Figura 39 Promedio de velocidades de viento por hora, a lo largo de un día, durante un mes.....	81
Figura 40 Promedio de velocidades de viento por hora, a lo largo de un día, durante un mes.....	82
Figura 41 Densidad de potencia para los tres diferentes modelos de generadores	82
Figura 42 Distribución de energía para los tres diferentes modelos de generadores	83
Figura 43 Vista área de la zona de estudio	83
Figura 44 Diagrama de flujo global de la metodología propuesta	91
Figura 45 Distribución Weibull de la Rumorosa para el 2007	92
Figura 46 Flujo de efectivo para la instalación de sistemas híbridos.....	96
Figura 47 Distribución de frecuencia, Rosa de los Vientos y procesamiento de datos mensuales	111
Figura 48 Comportamiento del viento promedio por hora, al día y por cada mes.....	113
Figura 49 Sistema de Evaluación Energética, “Evaluación climática”	121
Figura 50 Sistema de Evaluación Energética “Distribución del viento y Rosa de los vientos”	122
Figura 51 Sistema de Evaluación Energética “Selección de generadores y paneles solares”	123
Figura 52 Sistema de Evaluación Energética “Evaluación técnica, potencial eólico de la zona”	124
Figura 53 Sistema de Evaluación Energética “Evaluación Económica”.....	124

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Estadísticas de energía eléctrica en México.....	13
Tabla 2 Escala de Beaufort.....	33
Tabla 3 Exponente de corte según la rugosidad del terreno	44
Tabla 4 Lista de verificación para la elección de un inversor	53
Tabla 5 Categoría de exposición a los rayos UV	54
Tabla 6 Variables medidas cada 10 minutos.	59
Tabla 7 Características básicas de generadores eólicos	65
Tabla 8 Especificaciones del fabricante Modelo: i1POWER.....	66
Tabla 9 Especificaciones del fabricante Modelo: i5POWER.....	67
Tabla 10 Especificaciones del fabricante Modelo: i10POWER	67
Tabla 11 Especificaciones técnicas para paneles solares	72
Tabla 12 Plantilla de variables para el análisis costo beneficio.....	74
Tabla 13 Resultados estadísticos anuales	78
Tabla 14 Resultados semestrales Verano Otoño.....	79
Tabla 15 Resultados semestrales Primavera Invierno.....	79
Tabla 16 Resumen de resultados por mes	80
Tabla 17 Resultados de densidad de potencia y energía para una altura de 10m.	83
Tabla 18 Resultados anuales a diferentes alturas.....	84
Tabla 19 Resultados semestrales para primavera-invierno	84
Tabla 20 Resultados semestrales para verano-otoño	84
Tabla 21 Resultados de la simulación anual para 10, 18 y 24m de altura con respecto al suelo.....	85
Tabla 22 Resultados de la simulación para primavera-invierno	85
Tabla 23 Resultado de la simulación verano-otoño	85
Tabla 24 Energía anual de salida, para diferentes velocidades medias	86
Tabla 25 Factor de carga a diferentes velocidades y alturas para cada generador.....	86
Tabla 26 Energía promedio por m ² de la zona.....	87
Tabla 27 Número de generadores eólicos según el modelo y la cantidad de familias	88
Tabla 28 Cantidad de paneles solares necesarios para completar el déficit de energía en la instalación para en combinación con cada modelo de generador.	89
Tabla 29 Análisis costo beneficio para un precio de electricidad de 1.0998 \$/Kw-hr para diferentes velocidades medias y número de familias involucradas	90
Tabla 30 Diferencia de resultados reales y resultados del modelo sintético ANUAL	94
Tabla 31 Diferencia de resultados reales y resultados del modelo sintético SEMESTRAL Primavera-Invierno	94
Tabla 32 Diferencia de resultados reales y resultados del modelo sintético SEMESTRAL Verano-Otoño.....	94
Tabla 33 Proyectos de energía eólica comprometidos y en ejecución	105
Tabla 34 Estadísticas de venta. Precio por sector	114
Tabla 35 Consumo promedio por usuario	114
Tabla 36 Lista de precios para generador modelo i1POWER	115
Tabla 37 Lista de precios para generador modelo i5POWER	115
Tabla 38 Lista de precios para generador modelo i10POWER	115
Tabla 39 Análisis costo beneficio para un precio de electricidad de 1.09 \$/Kw-hr.....	116

Tabla 40 Análisis costo beneficio para un precio de electricidad de 2\$/Kw-hr	116
Tabla 41 Análisis costo beneficio para un precio de electricidad de 3\$/Kw-hr	118
Tabla 42 Análisis costo beneficio para un precio de electricidad de 4\$/Kw-hr	119
Tabla 43 Análisis costo beneficio para un precio de electricidad de 5\$/Kw-hr	120
Tabla 44 Cálculo de densidad de potencia y energía para el modelo i10POWER a 10 m.	125

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

AEO	Annual Energy Output
IPCC	Intergovernmental Panel of Climate Change
CA	Corriente Alterna
CD	Corriente Directa
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CMEQ	Consejo Mundial de Energía Eólica
COP's	Conference of parties
DS	Desarrollo Sostenible
EMA	Estación Meteorológica Automática
GEF	Fondo Global del Medio Ambiente
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IEA	International Energy Administration
IIE	Instituto de Investigaciones Eléctricas
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
ISO	International Organization for Standardization
IUV	Índice Ultra Violeta
m.s.n.m.	Metros Sobre el Nivel del Mar
NASA	National Aeronautics and Space Administration
LAERFTE	Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development
ONG	Organización No Gubernamental
OLADE	Organización Latinoamericana de Energía
PEAER	Programa para el Aprovechamiento de Energías Alternativas
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PIE	Productores Independientes de Energía
REDD	Reducción de Emisiones por Degradación y Deforestación
SENER	Secretaría de Energía
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
TIR	Tasa interna de Retorno
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
UV	Rayos Ultra Violeta
VPN	Valor Presente Neto
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development

Tabla 40 Análisis costo beneficio para un precio de electricidad de 2\$/Kw-hr	116
Tabla 41 Análisis costo beneficio para un precio de electricidad de 3\$/Kw-hr	118
Tabla 42 Análisis costo beneficio para un precio de electricidad de 4\$/Kw-hr	119
Tabla 43 Análisis costo beneficio para un precio de electricidad de 5\$/Kw-hr	120
Tabla 44 Cálculo de densidad de potencia y energía para el modelo i10POWER a 10 m.	125

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

AEO	Annual Energy Output
IPCC	Intergovernmental Panel of Climate Change
CA	Corriente Alterna
CD	Corriente Directa
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CMEQ	Consejo Mundial de Energía Eólica
COP's	Conference of parties
DS	Desarrollo Sostenible
EMA	Estación Meteorológica Automática
GEF	Fondo Global del Medio Ambiente
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IEA	International Energy Administration
IIE	Instituto de Investigaciones Eléctricas
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
ISO	International Organization for Standardization
IUV	Índice Ultra Violeta
m.s.n.m.	Metros Sobre el Nivel del Mar
NASA	National Aeronautics and Space Administration
LAERFTE	Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development
ONG	Organización No Gubernamental
OLADE	Organización Latinoamericana de Energía
PEAER	Programa para el Aprovechamiento de Energías Alternativas
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PIE	Productores Independientes de Energía
REDD	Reducción de Emisiones por Degradación y Deforestación
SENER	Secretaría de Energía
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
TIR	Tasa interna de Retorno
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
UV	Rayos Ultra Violeta
VPN	Valor Presente Neto
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development

Capítulo 1. Introducción

1.1 Preliminares

Ante el incremento de la población mundial, la lucha contra la pobreza y los retos del nuevo milenio en materia de desarrollo sostenible, se abre un nuevo panorama para la realización de investigaciones en materia científica, técnica y económica, que coadyuven a alcanzar los grandes objetivos planteados en materia de desarrollo, considerando no solamente el factor económico sino también al conjunto de la sociedad y el medio ambiente, como factores vitales a considerar para encaminarnos hacia el futuro con una nueva mentalidad. El siglo XXI es un período de grandes retos y constantes cambios, motivo por el cual es responsabilidad de todos plantear soluciones a los grandes temas que comprometen a la humanidad (cambio climático, pobreza, seguridad alimentaria, seguridad energética, etc.) y aquellos que conciernen a la realidad mexicana con una visión clara y de largo plazo.

Uno de los grandes retos que debe afrontar México es el tema energético, debido al incremento en los requerimientos de energía eléctrica de una población creciente, que es cubierta en su mayoría por fuentes fósiles causantes de contaminación y responsables del cambio climático. Aunque México tiene al 2010 una cobertura de 96.85% en población con acceso a electricidad, el restante representa una cifra considerable tomando en consideración la población actual. Hoy en día existe un gran número de familias que carece de este servicio, en su mayoría comunidades pobres del área rural alejadas de la red eléctrica. Ante este hecho y como respuesta a un problema social se plantea el desarrollo de proyectos que incentiven el uso de energía renovable como motor de desarrollo que impulse el crecimiento de las actividades productivas de la región y eleve la calidad de vida de las personas.

A partir de un problema global como lo es el cambio climático y la carencia de energía de miles de personas en México, aparecen en la agenda energías renovables como la eólica y solar como alternativa de solución al problema de la inaccesibilidad y la dispersión de las familias en amplios territorios que impiden su conexión a la red. Por lo tanto generadores eólicos de baja escala, paneles solares o sistemas híbridos, se constituyen en una alternativa viable para el uso doméstico y actividades tales como bombeo de agua, riego e iluminación. Por lo tanto, es necesario el desarrollo de metodologías que evalúen la factibilidad técnica y económica para la ejecución de proyectos de esta naturaleza, de manera tal que se tenga información suficiente para tomar mejores decisiones con respecto a la utilización de esta tecnología.

El presente trabajo pretende incentivar y ampliar el uso de fuentes de energía renovable a través de una metodología de análisis técnico y económico por medio de una herramienta tecnológica como aporte necesario a la transición de la matriz energética hacia una menos contaminante e inagotable, respondiendo a una problemática social.

1.2 Justificación

La carencia de energía eléctrica en los hogares de la república mexicana, afecta a miles de personas. Según datos del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), al 2005 se tenía una cantidad de 588,864 hogares que no disponían de energía eléctrica¹. Algunos de los estados más afectados son: Veracruz, Oaxaca, Chiapas, Guerrero, San Luis Potosí, Chihuahua y Estado de México. Esta situación ocurre debido al asilamiento de los hogares que imposibilita la conexión a la red eléctrica. Por otra parte la Comisión Federal de Electricidad (CFE) indica el porcentaje de población con acceso a electricidad actualizado al 2010. Tomando en cuenta que México al 2010 registraba una población de 112,322,757 habitantes, se tiene cerca de 3,538,000 personas que carecen de energía eléctrica, lo cual representa cerca de 707,000 hogares. La Tabla 1 muestra en términos de porcentaje el acceso de la población mexicana a energía eléctrica.

Tabla 1 Estadísticas de energía eléctrica en México

Indicador	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Población con acceso al servicio de energía eléctrica	95	95	96	96.5	97	97.33	97.32	96.84	96.85

Fuente: Comisión Federal de Electricidad, Estadísticas

Ante el incremento de la población y pese a los esfuerzos realizados por incrementar el acceso a servicio eléctrico, el 2009 y 2010 fueron años en los que el porcentaje se redujo, por lo que más gente carece del servicio. En este sentido, es necesario incrementar el porcentaje de acceso a energía eléctrica por medio de fuentes alternativas de energía de baja escala instaladas directamente en los lugares que así lo requieran.

Si bien hoy en día existe la tecnología y están a la venta generadores de baja escala, en muy pocos casos se da seguimiento a las mejores formas para incluirlos en las nuevas construcciones o en las ya existentes carentes de energía eléctrica, desde un punto de vista económico, social y ambiental, tomando en cuenta las externalidades y el costo beneficio de los proyectos. Debido a que no existía un marco regulatorio que fomentara el uso de energías renovables se creó un marco legal y regulatorio a través de la promulgación de la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE) publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de noviembre de 2008, que pretende regular el aprovechamiento de las energías renovables que favorece a los proyectos de autoabastecimiento eolo eléctricos.

Esta ley en sus artículos 11-VII y 24-II², especifica los mecanismos de fomento de energía renovables para todo tipo de actividades incluyendo el uso doméstico, además destina

¹ http://www.inegi.org.mx/lib/Olap/consulta/general_ver4/MDXQueryDatos.asp?proy=cpv05_viviendas

² Artículo 11.- La secretaría de Energía elaborará y coordinará la ejecución del Programa, para lo cual deberá:

VII. Definir estrategias para fomentar aquellos proyectos que a partir de fuentes renovables de energía provean energía eléctrica a comunidades rurales que no cuenten con este servicio, estén o no aislados de las redes eléctricas.

mecanismos presupuestarios destinados a promover proyectos que se orienten a la explotación de fuentes de energía renovable. Dando cumplimiento a lo establecido en los puntos transitorios de la LAERFTE y al artículo 26 de la misma ley, se publica en el 2011, la Estrategia Nacional para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía. En este documento se contextualiza la situación energética mundial y nacional y se presenta las líneas de acción necesarias que incentiven el desarrollo de proyectos en materia de energías renovables. De esta estrategia se rescata el apartado titulado: “Electrificación rural con energías renovables” en la cual se aborda las razones por las cuales es necesario introducir una política de electrificación rural con visión de largo plazo. Los beneficiarios son comunidades rurales pobres que no tengan conexión a la red eléctrica y donde no esté considerado la expansión de red. Los proyectos deben garantizar la sostenibilidad bajo los siguientes criterios:

- La electrificación debe fomentar la actividad productiva de la región incentivando acciones de reforestación, bombeo de agua, potabilización de agua, entre otras.
- Fomentar la participación de las comunidades y su integración dentro de los proyectos.
- Participación conjunta de los interesados clave como gobierno nacional, estatal y municipal, además de la industria privada, centros de investigación, universidades y sociedad civil.
- Evaluar la factibilidad en función de los requerimientos energéticos.
- Adecuar las mejores tecnologías en términos técnicos y económicos.
- Realizar capacitación comunitaria.
- Prospeccionar alternativas de financiamiento.³

Existiendo un marco regulatorio como respaldo al autoabastecimiento de energía (LAERFTE) una programa orientado al aprovechamiento de energías renovables (PEAER) y una estrategia para la electrificación rural, es necesario establecer metodologías que permitan incentivar el uso de energías renovables para la mejor toma de decisiones con respecto a la instalación de generadores eólicos de baja escala, en relación a las necesidades energéticas del consumidor, el recurso eólico disponible en la zona y los costos asociado, de manera tal que el dimensionamiento de la instalación sea el correcto mientras beneficia a la sociedad y genera desarrollo a la región.

Artículo 24.- Con el fin de ejercer con eficiencia los recursos del sector público, evitando su dispersión, la Estrategia comprenderá los mecanismos presupuestarios para asegurar la congruencia y consistencia de las acciones destinadas a promover el aprovechamiento de las tecnologías limpias y energías renovables mencionadas en el artículo anterior, así como el ahorro y uso óptimo de toda clase de energía en todos los procesos y actividades, desde su explotación hasta su consumo.

La Estrategia, en términos de las disposiciones aplicables, consolidará en el Presupuesto de Egresos de la Federación las provisiones de recursos del sector público tendientes a:

II. Promover y difundir el uso y la aplicación de tecnologías limpias en todas las actividades productivas y en el uso doméstico.

³ Estrategia Nacional para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía

1.3 Objetivos

Desarrollar una metodología para evaluar la factibilidad de la instalación de generadores eólicos de baja escala a nivel doméstico que permita dimensionar el sistema de generación a partir del análisis del recurso eólico en la zona, el diseño base del generador y las necesidades energéticas, con la finalidad de tomar mejores decisiones técnicas y económicas para su utilización.

1.4 Objetivos específicos

El objetivo general de este trabajo se apoya sobre los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar las condiciones técnicas del recurso eólico y las condiciones climáticas para el caso particular de análisis tomando en cuenta información meteorológica y datos de al menos un año del sitio en cuestión.
- Dimensionar un sistema de generación eólica acorde a las necesidades energéticas del usuario y el recurso eólico disponible, comparándolo con especificaciones dadas de generadores eólicos en el mercado.
- Realizar una plataforma tecnológica para la toma de decisiones que permita al usuario conocer los aspectos técnicos, económicos de la instalación de sistemas alternativos de energía.
- Determinar las variables clave en el modelo que incidan directamente en la factibilidad del proyecto.
- Realizar análisis de sensibilidad en las variables críticas para encontrar las condiciones bajo las cuales la instalación de energía alternativa a baja escala es factible.

Capítulo 2. Antecedentes

Los trabajos en materia de energía eólica se han caracterizado por tomar en cuenta la dimensión y escala de los aerogeneradores en función de la necesidad que satisfacen en materia de abastecimiento de energía, es por esto que se han desarrollado una amplia gama de modelos, formas y tamaños, enfocados a cumplir ciertos objetivos particulares. Hoy en día, existen generadores micro de uso doméstico, pasando por los medianos de uso industrial, hasta aquellos macro que constituyen los grandes parques eólicos. En el caso de los aerogeneradores micro, su importancia radica en que solucionan un problema inmediato de carencia de energía eléctrica en zonas donde el acceso a la red eléctrica es difícil. En el caso de los grandes parques eólicos, su propósito es de alcance nacional y toma en consideración los beneficios ambientales, ocupación de mano de obra y su factibilidad comparado con otras alternativas energéticas. Es por esto que a diferentes escalas se presentan diferentes problemas, alternativas y metodologías para su mejor implementación, de manera que se pueda hacer un mejor uso del recurso cumpliendo con las expectativas de los proyectos y de sus usuarios.

2.1 RETScreen International (Permitiendo decisiones de energías más limpias)

RETScreen es un software desarrollado por el Gobierno de Canadá en colaboración con la industria y universidades, con el objetivo de evaluar la producción de energía más limpia, tomando en cuenta la factibilidad técnica, costos de ciclo de vida, emisiones, aspectos financieros y riesgos presentes al momento de planificar la instalación de fuentes alternativas de energía.

Este software incluye bases de datos de diferentes partes del mundo, incluyendo México, con información proveniente de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) que utiliza dos tipos de recolección de datos. La primera con base a satélites y la segunda con estaciones de monitoreo en tierra. Las bases de datos contienen información meteorológica de las principales variables climáticas, a partir de las cuales se toman decisiones con respecto al tipo de energía que se quiera implementar. Las variables que se presentan para cada emplazamiento son: temperatura, humedad relativa, radiación solar diaria, presión atmosférica, velocidad del viento, temperatura del suelo. Además de las variables que indican el posicionamiento del lugar en estudio como son: latitud, longitud, altitud.

	Temperatura del aire	Humedad relativa	Radiación solar diaria - horizontal	Presión atmosférica	Velocidad del Viento	Temperatura del suelo	Días-grado de calentamiento mensual	Días-grado de enfriamiento mensual
	°C	%	kWh/m²/d	kPa	m/s	°C	°C-d	°C-d
Ene	19.5	58.0%	3.80	100.8	3.8	20.9	0	294
Feb	20.0	54.7%	4.74	100.7	3.8	21.5	0	279
Mar	21.0	51.4%	5.96	100.6	4.1	23.3	0	342
Abr	23.2	48.4%	6.79	100.5	3.7	26.4	0	396
May	25.5	46.8%	7.36	100.3	3.6	29.1	0	479
Jun	27.5	50.5%	7.30	100.3	3.4	31.3	0	526
Jul	28.6	61.3%	6.71	100.4	3.3	32.4	0	576
Ago	28.5	67.3%	6.16	100.3	3.0	31.5	0	574
Sep	28.0	69.4%	5.55	100.2	3.3	30.4	0	539
Oct	27.0	57.1%	5.02	100.4	3.1	29.8	0	528
Nov	23.9	51.7%	4.15	100.6	3.5	26.1	0	418
Dic	20.7	55.4%	3.54	100.7	3.7	22.3	0	330
Anual	24.5	56.0%	5.59	100.5	3.5	27.1	0	5,281
Fuente	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA

Figura 1 Base de datos de diferentes emplazamientos en el mundo

FUENTE: www.nrcan.gc.ca

En el caso eólico, el software trae consigo una base de datos de los generadores eólicos presentes en el mercado, además de sus curvas de potencia, la cual permite realizar los análisis correspondientes para conocer su factibilidad técnica.

Velocidad del Viento (m/s)	Potencia (kW)
0	0.0
1	0.0
2	0.0
3	0.0
4	24.0
5	64.0
6	111.0
7	197.0
8	314.0
9	454.0
10	582.0
11	686.0
12	783.0
13	891.0
14	966.0
15	1010.0
16	1037.0
17	1030.0
18	1035.0
19	1032.0
20	1009.0
21	
22	
23	
24	
25	

Figura 2 Base de datos para diferentes tipos de generadores eólicos

FUENTE: www.nrcan.gc.ca

2.2 Danish Wind Industry Association

En el 2003 la Asociación Danesa de la Industria Eólica, desarrolló un manual completo de los conceptos básicos de energía eólica. Además de la parte conceptual de un análisis eólico, presenta una serie de aplicaciones más orientadas a las particularidades. Al igual que el caso canadiense, la aplicación trae cargada la base de datos de ciertos lugares de interés y de generadores eólicos presentes en el mercado. A partir de la elección de un sitio y del generador, se evalúa el potencial eólico de la zona, para ello se presentan gráficas tanto de densidad de potencia como de distribución de energía, a lo largo de un año de estudio. La aplicación es de gran valor al momento de tomar decisiones con respecto a la aplicación o no de sistema eólicos, tomando en cuenta el recurso eólico disponible y las características del generador. De esta manera es posible dimensionar mejor una instalación eólica.

CALCULATOR

Datos del emplazamiento Selección de los datos del emplazamiento ▼

Datos de densidad del aire

15.0 °C temp a 0 m de altitud (= 101.33 kPa de presión)

1.225 kg/m³ de densidad

Datos de distribución del viento en el emplazamiento

2.0 parámetro de forma de Weibull

7.0 m/s de velocidad media del viento = 7.9 parámetro de escala de Weibull

50.0 m de altura, Longitud de rugosidad 0.055 m = clase de rugosidad 1.5 ▼

Datos del aerogenerador Selección de la turbina ▼ 600 kW

5.0 m/s de velocidad de conexión, 25.0 m/s de velocidad de corte

43.0 m de diámetro de rotor, 50.0 m de altura de buje Alturas std ▼

Figura 3 Variables de entrada solicitadas para el cálculo de potencial eólico

FUENTE: <http://guidedtour.windpower.org/es/tour/wres/index.htm>

Los resultados obtenidos, reflejan las condiciones de potencia y energía que puede otorgar el lugar de emplazamiento, tomando como referencia un año.

Resultados de la potencia de salida en el emplazamiento	Resultados de la potencia de salida de la turbina
Potencia de entrada* <input type="text"/> W/m ² de área de rotor	Potencia de salida* <input type="text"/> W/m ² de área de rotor
Max. potencia de entrada a* <input type="text"/> m/s velocidad media del viento a la altura del buje* <input type="text"/> m/s	Energía producida* <input type="text"/> kWh/m ² /año
	Energía producida* <input type="text"/> kWh/año
	Factor de carga* <input type="text"/> por ciento

Figura 4 Variables de salida para la determinación de potencial eólico

FUENTE: <http://guidedtour.windpower.org/es/tour/wres/index.htm>

2.3 Metodología para la implementación de generadores eólicos de pequeña escala, Caso Andalucía España

La Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa de la Agencia Andaluza de Energía desarrolló una metodología para evaluar el potencial eólico para conocer las características necesarias para un buen funcionamiento estimando su producción. El manual está dirigido a generación eólica de baja escala y detalla con claridad los pasos a seguir para hacer una correcta evaluación, aunque aclaran que los resultados de la evaluación no representa una garantía sobre la producción eólica.

Dentro de la metodología se identifican 5 pasos a seguir:

1. Conseguir datos de viento fiables
2. Reconocimiento de la orografía, obstáculos y rugosidad del terreno
3. Altura del montaje
4. Elección del emplazamiento
5. Dimensionamiento y estimación de la producción ⁴

El procesamiento de la información debe considerar:

- Análisis de la distribución del viento
- Rosa de los vientos
- Determinación de densidad de potencia y energía anual
- Determinación de lugar de emplazamiento (obstáculos, orientación, altura, distancia)

2.4 Estudio de factibilidad para el uso de energía eólica con fines industriales

La universidad de la República en Uruguay por medio del Instituto de Mecánica de los fluidos, desarrolló una metodología para la evaluación de potencial eólico aplicado a uso industrial. En este artículo se plantea conectar la energía eléctrica directamente para su uso y al mismo tiempo conectarla a la red. Como parte de la metodología, el estudio parte de un análisis de factibilidad de las condiciones de viento existente en el lugar, donde se establece tanto la velocidad como la dirección de los vientos. A partir de ella se proyecta una potencia la cual se compara con el requerimiento energético. Si el requerimiento energético es menor, la energía eléctrica se va a la red eléctrica (proceso de venta), si el requerimiento energético es mayor, se compensa con la energía proveniente directamente de la red.

Para un mejor análisis la metodología requiere la aplicación de un análisis de sensibilidad, el cual tome en cuenta las variaciones de la temperatura, presión y su impacto sobre la densidad, al mismo tiempo que la altura del aerogenerador con respecto al piso. Por otra parte se hace un

⁴ Energía Eólica, Guía Técnica CONSEJERÍA DE INNOVACIÓN, CIENCIA Y EMPRESA

análisis económico, el cual refleja variaciones en el factor de capacidad, con respecto al costo de generación que implica.

Los resultados obtenidos en la investigación presentan que la instalación de generadores de baja escala con la finalidad de satisfacer requerimientos de una industria es factible, aunque los beneficios de esta se ven restringidos por el recurso eólico y el costo del generador. Aunque señalan en el análisis que la factibilidad de la instalación, propiciaría en gran medida la construcción de más generadores a costos cada vez más bajos.

Capítulo 3. Desarrollo Sostenible

3.1 Concepto de sostenibilidad

El desarrollo sostenible (DS) es un tema que adquiere cada vez más protagonismo. Los medios de comunicación hacen evidente esta tendencia y muchos de nosotros somos testigos de cambios y problemas presentes en nuestra región. Temas relacionados a la energía, calentamiento global, escasez de recursos, reciclado, eco eficiencia, etc. son alguno de los temas que aborda el desarrollo sostenible. Aunque el concepto y sus alcances son ampliamente discutidos, la sostenibilidad aparece en el plano de las futuras decisiones mundiales, como respuesta a los inminentes problemas que debemos afrontar.

El término desarrollo sostenible se hace oficial en el año 1992. Año en el cual se llevó a cabo la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo, donde se redactaron 27 principios conocidos como la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y Desarrollo y se estableció la siguiente definición:

“Es el desarrollo que satisface las necesidades actuales de las personas sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones de satisfacer las suyas”.

Analizando la definición, es evidente la presencia de dos conceptos fundamentales: necesidad y satisfacción, conceptos que han acompañado la evolución del hombre y lo cual ha permitido su desarrollo. Por otro lado la definición, hace referencia a un concepto tácito: “recurso” definido como: *“Conjunto de elementos disponibles para resolver una necesidad” (Real Academia de la Lengua española)*. Es así que la única forma de satisfacer una necesidad (alimentación, energía, etc.) se consigue a través de la disposición de recursos.

Puesto que las necesidades a cubrir son humanas, y los medios para convertir recursos naturales en bienes y servicios, es una actividad económica, se hacen evidentes tres dimensiones que abarca el desarrollo sostenible: dimensión ambiental, dimensión económica y dimensión social. Es ambiental por su relación al uso racional de recursos y cuidado del medio ambiente. Es económica porque garantiza la satisfacción de necesidades a través de productos y servicios. Y es social porque los individuos son beneficiados o perjudicados por las decisiones tomadas. Como se muestra en la Figura 5, los tres elementos del desarrollo sostenible están íntimamente relacionados, el balance entre las tres determina una nueva visión de desarrollo y garantiza beneficios comunes. Si bien son los pilares del DS es importante tomar en cuenta otros pilares como: tecnología, producto, etc. en dependencia del sector, proyecto o industria en particular que se analice.



Figura 5 Dimensiones del desarrollo sostenible

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto el desarrollo sostenible deja de ser un tema solamente ambiental como erróneamente se piensa. Aunque es un tema central y razón de ser del término, involucra a cada una de las actividades económicas que se realizan día a día, ya sea del sector primario, industrias o servicios y la sociedad en su conjunto. No se trata solamente de ideas verdes, se trata de planes integrales de gestión ambiental, en el cual estén involucrados: profesionales, gobierno, empresa privada, ONGs, etc. en el afán de presentar soluciones que beneficien a la sociedad, al medio ambiente y al negocio.

Es así que existen algunos principios ampliamente reconocidos y discutidos dentro de la definición de sostenibilidad, ellos son: equidad, precaución, responsabilidad diferenciada, quien contamina paga [Domenech, 2009]. Todos ellos clarifican los aspectos que la definición por sí mismas no la hace evidente. Como equidad se entiende que cada individuo tiene el derecho de hacer uso de una determinada cantidad de espacios ambientales (tierra, energía, bosques, ríos, etc.). El principio de precaución se basa en la anticipación a eventos no deseables para el medio ambiente, ya que se conoce de su alto impacto, probabilidad e intensidad. La responsabilidad diferenciada se refiere al grado de desarrollo y participación de un determinado país en actividades que contribuyen a incrementar el problema del cambio climático o contaminación, lo que nos lleva al principio de quien contamina paga lo que implica asumir responsabilidades y responder económicamente ante daños ambientales capitalizados.

Al parecer el paradigma de desarrollo en términos solamente económicos pierde vigencia. No toda acumulación de riqueza representa desarrollo y no es posible mantener un ritmo de crecimiento continuo e infinito. Ante esta realidad, el desarrollo sostenible aparece como una alternativa, que aunque pretenciosa en su definición, no deja de ser el horizonte que guiará a la humanidad en el manejo de sus recursos y en la toma de decisiones buscando un beneficio común. Como países Latino Americanos, dueños de inmensas riquezas naturales, debemos marcar la senda de una nueva forma de pensar y afrontar los cambios presentes con inteligencia.

Hoy en día Latino América se enfrenta a innumerables problemas y grandes retos, comenzando por el tema de la pobreza y desigualdad. Problemas más particulares como el crecimiento poblacional, seguridad alimentaria, acceso a agua, contaminación, reducción de tierras productivas, generación de energía, entre otras. La pregunta está en el aire: ¿estamos preparados para afrontar estos problemas?, ¿es posible hablar de sostenibilidad bajo este contexto, cuando no hemos solucionado algunos de nuestros problemas fundamentales? A primera vista parecería contradictorio hablar de sostenibilidad en un contexto por demás adverso, sin embargo no deja de ser una gran oportunidad para replantear el tipo de desarrollo que se quiere para el futuro.

3.2 Aspectos Históricos de la Sostenibilidad

El término de Desarrollo Sostenible aparece en las dos últimas décadas del siglo XX más precisamente en el año 1987 cuando por primera vez, la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas presenta el conocido informe *Brundtland* con el título: “Nuestro futuro común”, en el cual se reconoce la problemática de los recursos naturales y su influencia en las generaciones futuras. Un año después en 1988 se crea el Panel Intergubernamental de expertos en el Cambio Climático (IPCC) los cuales analizan con evidencia científica, técnica y socioeconómica las consecuencias del cambio climático provocado por los seres humanos. Es en el año 1992 que se lleva a cabo la Cumbre de la tierra en Río de Janeiro. Es en este año que se redacta la denominada AGENDA 21 en la cual se plantean las acciones necesarias para llevar a cabo el desarrollo sostenible y fomentar la participación de todos los países tanto desarrollados como en desarrollo. Es en esta en la que se detallan los principios bajo los cuales se deben encarar los principales problemas de la humanidad tales como: pobreza, recursos hídricos, bosques, contaminación, etc. A partir de la cumbre de Río se formaron diferentes comités, consejos y organizaciones comprometidas con el medio ambiente. A consecuencia de esto fue preciso establecer una normativa común, por lo que se solicitó a la Organización Internacional para la Estandarización (ISO por sus siglas en inglés) la creación de normas ambientales comunes y de uso voluntario para una mejor gestión ambiental en las empresas.

En el año 1995 que se crea el *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD), organización que agrupa a las principales empresas encaminadas en el tema de desarrollo sostenible. Es en este mismo año que se lleva a cabo en Berlín la I Conferencia de las Partes o COP1 (*Conference of parties*) donde se reúnen los miembros del UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*) quienes discuten las acciones para luchar contra el cambio climático. Es en esta ocasión que se evalúa la introducción de un Protocolo o acuerdo legal, para reducir la cantidad de gases de efecto invernadero, tomando en cuenta las condiciones de cada país y su participación en la actividad industrial. A partir de este año se realizan COP´s en diferentes sedes y con propósitos cada vez más ambiciosos.

Es en 1996 que surge la Norma ISO 14000 en su primera versión, enfocado al Sistema de Gestión Ambiental dentro de la actividad empresarial. En el año 1997 se lleva a cabo Cumbre de la Tierra + 5, organizada por la Asamblea General de la ONU en New York, en la cual se avalúan los

avances y adelantos al cabo de 5 años de los principios establecidos en Río de cara a la III Cumbre de las partes, llevada a cabo en Kyoto y del cual se deriva el conocido Protocolo de Kyoto y los compromisos de reducción de gases de efecto invernadero y los mecanismos de participación de los países tanto desarrollados como en desarrollo. Sin embargo es hasta el 2005 que el Protocolo de Kyoto entra en vigor con fechas de cumplimiento de compromisos para el 2012.

Las XV conferencia de sobre el cambio climático se llevó a cabo del 7 al 18 de diciembre de 2009 en Copenhague Dinamarca, reunión en la cual se pretendió llegar a nuevos acuerdos que permitieran generar un marco legal aplicado a nivel mundial a partir de 2012. Copenhague fue catalogado por los expertos como un fracaso debido a que los acuerdos no fueron de carácter vinculante ya que no existió un consenso claro entre todos los asistentes, porque no se definieron penalidades a la falta de cumplimiento de metas y porque no se abordó con claridad las condiciones en las que el Protocolo de Kyoto sigue en vigencia. Las negociaciones entre países, la falta de liderazgo y los intereses particulares, no permitieron traducir en acciones concretas el discurso conocido anteriormente.

La XVI conferencia de cambio climático, se llevó a cabo en Cancún México. En esta ocasión el acuerdo alcanzado se derivó de un consenso generalizado de 194 países a excepción de Bolivia. En esta cumbre se retomaron las negociaciones con respecto a compromisos en las emisiones de gases efecto invernadero y mecanismos de financiamiento.

Algunos resultados de la cumbre fueron los siguientes:

- Creación de un fondo verde para el desembolso de \$100,000 millones de dólares al 2020.
- Apertura de negociaciones para la ampliación del protocolo de Kyoto.
- Adopción de mecanismo REDD (Reducción de emisiones por degradación y deforestación)
- No aumentar en más de 2 °C la temperatura del planeta.
- Países industrializados deben reducir sus emisiones en un rango entre 15% y 40% para 2020 tomando como base 1990.

Capítulo 4. Energía convencional y energía eólica

4.1 Antecedentes preliminares

La energía, en sus múltiples manifestaciones, ha sido y es para la humanidad, de vital importancia para su desarrollo y evolución. El uso de la energía ha permitido la aparición de nuevos sistemas productivos cada vez más eficientes acompañados de alto nivel tecnológico e innovación. Sin ella, sería impensable satisfacer las necesidades básicas de una población en constante crecimiento que hoy en día necesita el acceso a servicios básicos entre ellos la energía eléctrica y sus múltiples aplicaciones en el hogar, empresas de servicio, industrias, etc. que utilizan a la energía como un gasto económico necesario para la continuidad de las actividades y procesos. Es por esto que la energía eléctrica es pieza fundamental de la economía de un país y su estándar de vida [Halkema, 2006].

Ante un nivel creciente de población, es importante considerar a la energía como punto estratégico, dada las tendencias mundiales en materia de sostenibilidad, tomando en cuenta la crisis energética del petróleo, debido a la reducción de reservas y el gran deterioro ambiental que provoca. Aunque el petróleo sigue siendo la principal fuente de energía mundial, es preciso invertir tiempo y dinero en la explotación de fuentes de energía renovables e incluirlas en la agenda de países desarrollados y en vías de desarrollo sentando las bases para la transición energética.

4.2 Antecedentes de la energía

La humanidad ha satisfecho sus necesidades de energía con formas muy básicas. Indudablemente la radiación solar siempre fue una de ellas, acompañadas del agua y el viento para generar energía mecánica [Ginsburg, 2009]. Por otro lado la madera era el material ideal para generar calor, en un inicio para calentar, cocinar y en otras aplicaciones técnicas.

Ante la necesidad de la humanidad en su continuo conocimiento y procesos creativos, se empezaron a crear máquinas cada vez más complejas. Es así que en Europa, a principios del siglo XX ya existían innumerables molinos de agua y viento, utilizados con diversos fines: extracción de agua, riego, actividades artesanales. El crecimiento de la población y la aparición de máquinas más complejas necesitaron cada vez de más energía. Tal el caso de la máquina de vapor, que fue el detonante para la Primera Revolución Industrial a finales del siglo XVIII, en la cual se utilizaba carbón o madera como fuente de energía. Este hecho marcó un hito en el desarrollo económico de la época, en materia de transporte, comercio y procesos industriales, que ampliaron el concepto y dieron paso a nuevas máquinas cada vez más sofisticadas. Es así que a partir de la máquina de vapor se empiezan a construir los primeros automóviles con este concepto.

El petróleo ya era conocido en la antigüedad y usado para engrasar, pintar o curar. Su primer uso como energético se presenta en los alumbrados con el uso de Kerossene como principal destilado

a mediados del siglo XIX. Es en 1885 que aparecen los primeros motores de combustión interna a base de gasolina dada la evolución en los diseños de motores y el desarrollo de mejores técnicas de destilación de petróleo, dando lugar a las primeras compañías de automóviles como Panhard et Levassor (1889) y Peugeot (1891) y posteriormente a la conocida compañía Ford (1906). El petróleo y sus derivados se convertirían en la primera fuente de energía, dando paso a la Segunda Revolución Industrial caracterizada por el uso intensivo de los hidrocarburos.

Debido al incremento en las necesidades energéticas de la población, la contaminación que provoca la industria y los cambios que provocan en el medio ambiente, se cuestiona el uso de combustibles fósiles como matriz energética. En la Figura 6 se muestra el requerimiento de energía eléctrica.

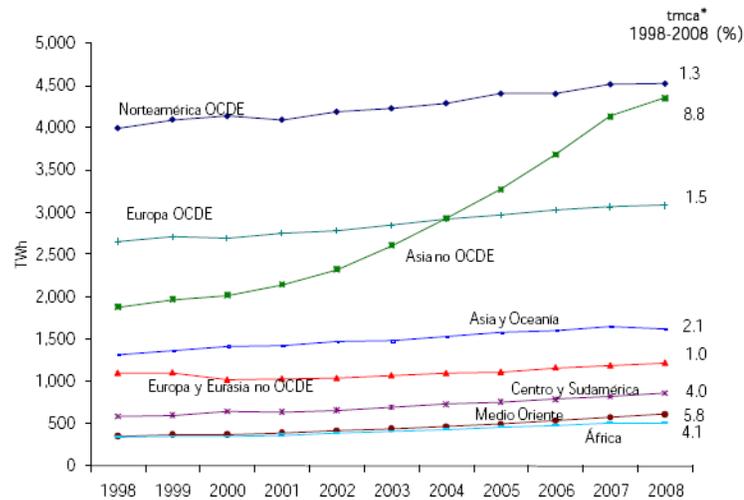


Figura 6 Consumo mundial de energía eléctrica por región, 1998-2008 en TW-hr

Fuente: Electricity Information 2010, Energy Balances of OECD Countries 2010, Energy Balances of Non-OECD Countries 2010; International Energy Agency

*tmca (tasa media de crecimiento anual)

Es por ello que aparece en la agenda, el desarrollo de energías limpias utilizando fuentes de energía renovable e inagotable. A largo plazo, a la humanidad no le quedará más alternativa que la utilización inteligente de la única fuente de energía que puede ser considerada como inagotable: la energía solar [Franquesa, 2009]. Por lo tanto es conveniente dedicar los esfuerzos a la investigación de las nuevas energías a partir del sol y planificar paulatinamente la transición energética que indudablemente marcará un nuevo hito en la era industrial.

Las principales energías renovables conocidas son:

- **Energía eólica:** Energía cinética contenida en las masas de aire en la atmósfera.

- **Energía solar:** Energía que proviene de la radiación solar, utilizada para generación de electricidad o para procesos térmicos.
- **Energía geotérmica:** Energía almacenada en forma de calor debajo de la superficie sólida de la tierra.
- **Energía hidroeléctrica:** Energía eléctrica que se genera en el proceso de transformación de la energía contenida en un curso de agua.
- **Biomasa:** Fracción biodegradable de los productos, desechos, y residuos de origen biológicos.⁵

La distribución de la producción de energía eléctrica en el mundo para el 2009 considera el uso de fuentes fósiles en un 66.7%, de los cuales predomina el uso de gas y carbón y en un tercer lugar al petróleo. El restante 33.3% de la electricidad generada es producida por fuentes renovables, de las cuales la energía hidroeléctrica, nuclear y eólica representan el 94.3%, el restante se complementa con producción solar, geotermal y biomasa.

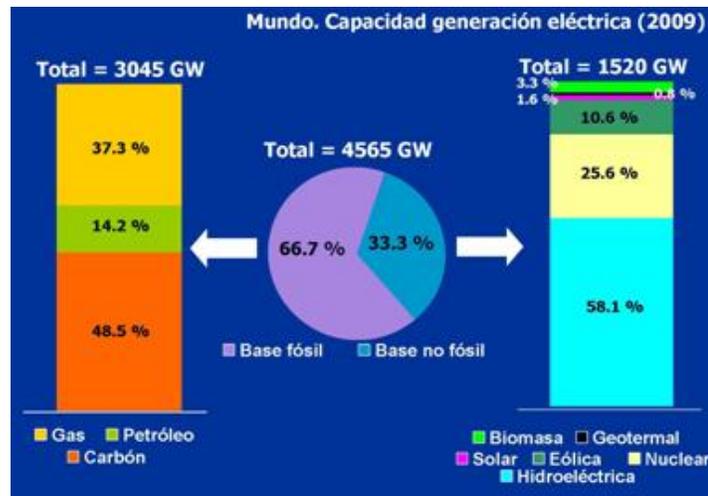


Figura 7 Porcentajes de utilización de fuentes de energía convencionales y alternativas para el 2009

Fuente: British Petroleum y la EIA (Energy Information Administration)⁶

⁵ Con base al Plan de Energías Renovables 2011-2020. Evaluación Ambiental Estratégica, Gobierno de España

⁶ Elaboración propia del autor con base a la información de BP y la EIA

4.3 Panorama general de producción eléctrica en México

La política energética de México, se basa en la explotación del petróleo y se apoya en las operaciones de PEMEX (Petróleos Mexicanos) en materia de explotación, producción, refinación y exportación de crudo y sus derivados. Si bien en la última década las energías renovables han tomado un protagonismo mayor, la base troncal está puesta en los recursos fósiles. Incluso el replanteamiento de la política energética de México, sigue pasando por una reforma institucional en PEMEX. Sin embargo, los planes y programas en materia de energía incluyen un mayor aprovechamiento de las energías renovables.

La política energética de México se basa en 5 pilares fundamentales:

1. Seguridad energética
2. Calidad de suministro de energía
3. Diversificación de tecnologías y de fuentes primarias de energía
4. Eficiencia energética
5. Desarrollo Sustentable en los sistemas de energía ⁷

La producción de energía es uno de los principales sectores para el crecimiento de la economía de México, a demás es el motor que mueve las actividades en los diferentes sectores productivos (agrícola, doméstico, industrial). Es por ello que el sector energía es responsable de gran cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), incluso mucho más que la suma de todos los sectores involucrados como se muestra en la Figura 8.

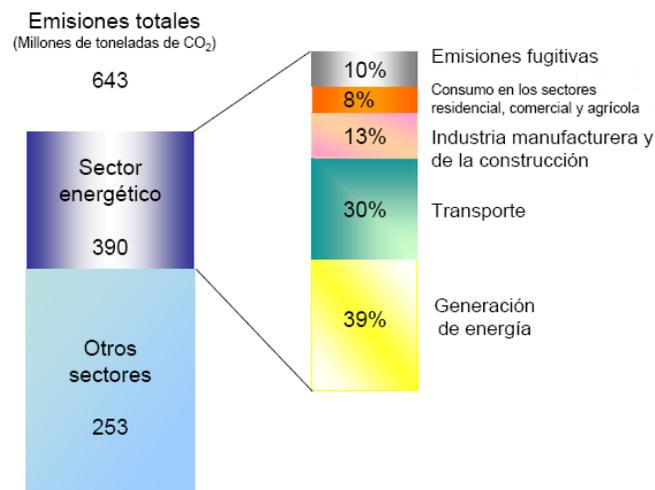


Figura 8 Emisiones de CO₂ totales en México y porcentajes de participación dentro del sector energético

Fuente: Secretaría de energía

⁷ Secretaría de Energía SENER, Energía Eólica y la Política Energética Mexicana

La energía eléctrica en México para el 2005, tiene como principales tecnologías al ciclo combinado (PIE) y al ciclo combinado (CFE) que abarcan el 34% de la generación eléctrica. Las energías renovables (energía geotérmica y eólica) ocupan un 3% sin contar la energía hidroeléctrica que ocupa un 13%.

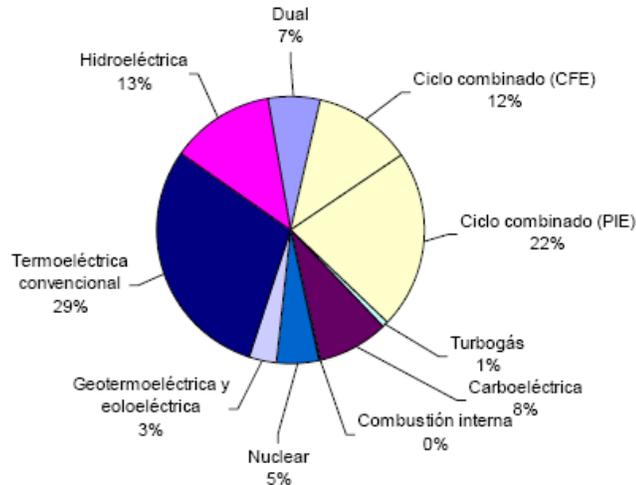


Figura 9 Generación de electricidad por tipo de tecnología

Fuente: Secretaría de Energía

4.3 Energía eólica

Las energías alternativas provienen indirecta o directamente del sol. La radiación que llega a la tierra es la fuente principal de energía para la generación de los fenómenos naturales en la atmósfera, en los océanos y en general para la vida en la tierra [Reyes, 2001]. Es así que de toda la energía recibida por el sol solamente entre el 1 y 2% se convierte en energía eólica a través de las masas de aire en movimiento (energía cinética).

La energía eólica es aquella que tiene mayor proyección a nivel mundial y es hoy en día una fuente de energía eléctrica a gran escala. La energía eólica está presente en más de 70 países [Zamora, 2010] y es una de las principales alternativas para la reducción de GEI. Según el Consejo Mundial de Energía Eólica (GWEC, por sus siglas en inglés) para el 2020 la energía eólica podría reducir las emisiones de CO₂ en más de 15 billones de toneladas.

4.3.1 Historia de la energía eólica

El aprovechamiento del viento se remonta a 5000 años atrás en el antiguo Egipto, donde se utilizaba como medio para navegar el río Nilo y Tigris por medio de embarcación a vela. Entre

otras aplicaciones, el primer molino de viento del que se tiene noticia histórica aparece en Persia, y se utilizó varios siglos antes de Cristo para pulverizar granos [Escudero, 2008].

Los molinos de viento se extendieron por todo el mundo a principios del siglo XI en provincias de Francia, extendiéndose por toda Europa para el siglo XIII, con propósitos de riego y molienda de granos.

Entre las aplicaciones poco usuales de la Energía Eólica figura un ventilador que construyó el biólogo Stephen Hale, en 1752, para la prisión londinense de Newgate. De igual manera el viento se utilizó como medio de transporte terrestre para mover carretas y hasta vagones probados en China durante el siglo XIX.

Históricamente la energía eólica se utilizó para el transporte, y la agricultura. Pero es hasta el siglo XX que se habla de su conversión a energía eléctrica, mismos que se denominarían generadores eólicos o aerogeneradores. Estos de diferentes tamaños y formas, de eje vertical y horizontal, con 2, 3 o hasta múltiples aspas. La era moderna de los molinos viene de la mano del desarrollo de la teoría de la aerodinámica, elaborada en las primeras décadas del siglo XX [Escudero, 2008].

Algunos de los modelos desarrollados se detallan en la Figura 10.

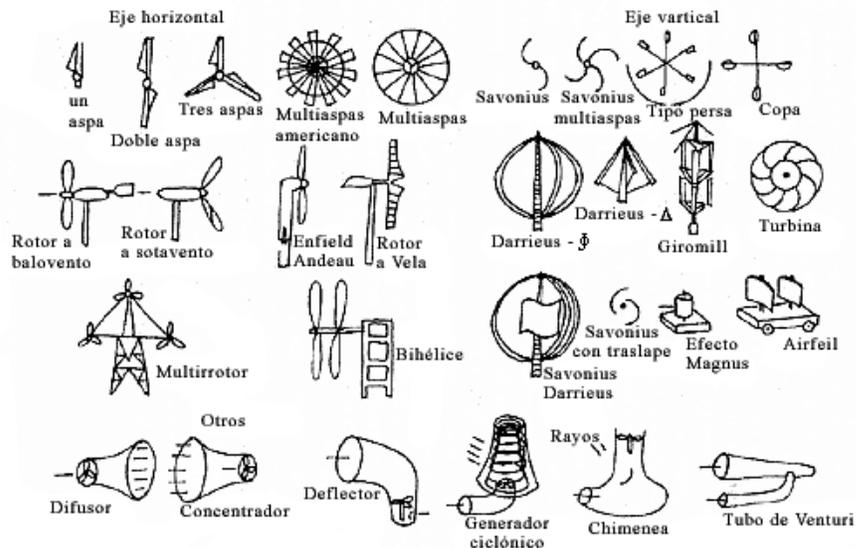


Figura 10 Modelos de generadores eólicos de eje vertical y eje horizontal desarrollados

Fuente: El oro solar y otras fuentes de energía

En 1973 el embargo del petróleo fue un detonante para continuar la investigación y el perfeccionamiento de la energía eólica, aunado a la conciencia ambiental y el cambio climático causado por las emisiones de GEI.

Actualmente y dado los avances de la tecnología, el viento es usado en la mayoría de los casos para la generación de energía eléctrica, al existir mejores diseños e investigación en el tema. Los modelos más conocidos son los generadores de 3 aspas y su tamaño ha ido evolucionando de acuerdo a la potencia demandada como se muestra en la Figura 11.

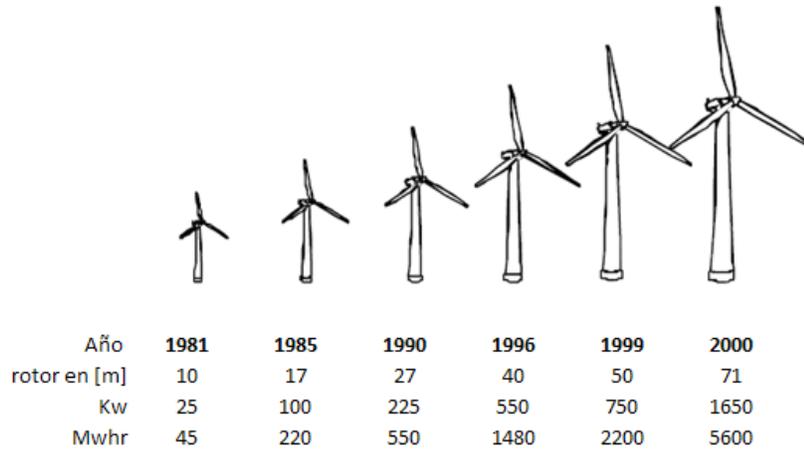


Figura 11 Tamaños de rotores en función de la potencia demandada

Fuente: American Wind Energy Association, 2002

4.3.2 Historia de la energía eólica en México

La energía eólica en México comienza a mediados de los años 80. Su evolución en el tiempo es producto de la aparición de instituciones públicas y privadas, acompañadas de marcos regulatorios que propiciaran la ejecución de investigaciones, proyectos y desarrollo tecnológico.

A continuación una breve cronología de lo acontecido en materia de energía eólica en México, con base al Anexo 9 del “Estudio de los Potenciales Bioenergético, Eólico, Minihidráulico y Solar en México”, publicado en marzo de 2005 por el IIE (Instituto de Investigaciones Eléctricas).

4.3.2.1 Cronología

- 1983 Se publica el Atlas Eólico Preliminar de América Latina y el Caribe, en el cual se presenta el mapa de potencial eólico en W/m^2 para la República Mexicana. Información proveniente de 62 estaciones.
- 1987 Se elabora un informe de potencial eólico con base a información de velocidad y dirección del viento provenientes del Servicio Meteorológico Nacional.

- 1994 Se construye la primera central eólica en el estado de Oaxaca. Se lanza el primer proyecto piloto a cargo de la (CFE), para instalar 1,5MW en las regiones con mayor viento del mundo, un lugar conocido como “La Ventosa” en el estado de Oaxaca
- 1995 Se publica el documento “*Mexico Wind Resource Assessment Project*”. Este estudio incluye comparaciones en la estimación de la densidad de potencia del viento con el Atlas de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) publicado en 1983 [Saldaña, 2005].
- 1997 El IIE adquiere la central experimental Eolo Eléctrica del Gavillero en Hidalgo concedida por la Gerencia General de Operación de la CFE.
- 1998 Se publica un mapa con las regiones con posibilidades en México para la construcción de centrales eolo eléctricas, donde destaca el estado de Oaxaca, Baja California.
- 2004 Empieza la ejecución del plan de acción para eliminar barreras para el desarrollo de la energía eolo eléctrica apoyados por el Fondo Mundial para el Medio Ambiente.
- 2005 Se crea la Asociación Mexicana de Energía Eólica.
- 2006 Empieza la construcción del segundo parque eólico en Oaxaca y el primero a gran escala, se instalaron 85 MW en el parque de la Ventosa II, también a cargo de CFE.
- 2007 Comienza la fase de implementación del Proyecto de energías renovables a Gran Escala que fomenta la participación de proyectos enfocados a la solución del problema de la energía, entre ellos fomento a la energía eólica.
- 2007 Se presenta el Programa Especial para el Aprovechamiento de las energías renovables, en la cual se hace énfasis en la energía eólica.
- 2008 Se promulga la ley “Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento para la Transición Energética” publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de noviembre de 2008.
- 2009 Se refuerza la infraestructura existente en la zona del Istmo de Tehuantepec y se permite la conexión de los primeros parques eólicos privados del país: 67,5 MW de Eléctrica del Valle de México, 79.9MW de Parques Ecológicos de México y 250MW de Eurus.
- 2010 México cuenta con una capacidad instalada de 520 MW y se tienen poco más de 2,000 MW de proyectos que están por iniciar su construcción o en proceso de licitación, con lo que se espera llegar a 2563.2 MW para posicionarse como líder en América latina (véase Anexo A).

4.4 El viento

El viento es define como “*una corriente de aire que se produce en la atmósfera por diversas causas naturales*”. El concepto fue desarrollado en Noruega por los meteorólogos Bergeron y Bjerkness en los años 20 como parte de su teoría de Frente Polar [Escudero, 2008]. Su movimiento es tridimensional, aunque para efectos prácticos se toma la velocidad y dirección en su componente horizontal.

El viento se origina por las diferencias de temperatura existentes al producirse un desigual calentamiento de las diversas zonas de la tierra y de la atmósfera [Escudero, 2009]. Esta diferencia de calentamiento genera dos tipos de masas de aire, la primera más caliente que tiende a ascender y la segunda aire circundante más frío.

Para que exista viento debe existir una diferencia de presión entre dos puntos de la superficie terrestre. Dado que el aire frío pesa más que el aire caliente, generan un diferencial de presión atmosférica a un mismo nivel. Los vientos se mueven de las áreas con alta presión hacia las áreas de baja presión.

4.4.1 Velocidad del viento

La velocidad del viento se mide por medio de anemómetros, los cuales registran velocidades promedio durante 10 min. Para los análisis hechos con propósitos energéticos es común utilizar la unidad m/s. La velocidad del viento se clasifica de acuerdo a la escala de Beaufort, el cual establece una escala de 12 grados de intensidad, los cuales se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2 Escala de Beaufort

Número de Beaufort	Velocidad del Viento [km/hr]	Descripción Internacional
0	<1	Calmo
1	1-5	Ventolina
2	6-11	Brisa muy débil
3	12-19	Brisa débil
4	20-28	Brisa moderada
5	29-38	Brisa fresca
6	39-49	Brisa fuerte
7	50-61	Viento fuerte
8	62-74	Viento duro
9	75-88	Viento muy duro
10	89-102	Temporal
11	103-117	Borrasca
12-19	>117	Huracán

4.4.2 Dirección del viento

La dirección del viento viene definido por el punto del horizonte del observador desde el cual sopla [Escudero, 2008]. Para tener un mejor entendimiento del comportamiento del viento en

cuanto a su dirección se utiliza una gráfica denominada Rosa de los Vientos. Esta gráfica indica el porcentaje de tiempo en el que el viento sopla de diferentes direcciones [Ramírez, 1998]. Gráficamente la dirección del viento se representa en sus cuatro direcciones principales y secundarias, tomando en cuenta los cuatro ejes cardinales (norte, sur, este y oeste)

La gráfica consiste en utilizar barras o extensiones que van desde el centro de un círculo hacia un punto determinado que ilustra la dirección del viento, la longitud de cada extensión indicará el porcentaje de tiempo en el que el viento se dirigió a esa dirección [Ahrens, 1998]. El color está en relación a la velocidad del viento, por lo que en la gráfica se detalla tanto frecuencia como intensidad, como se muestra en la Figura 12.

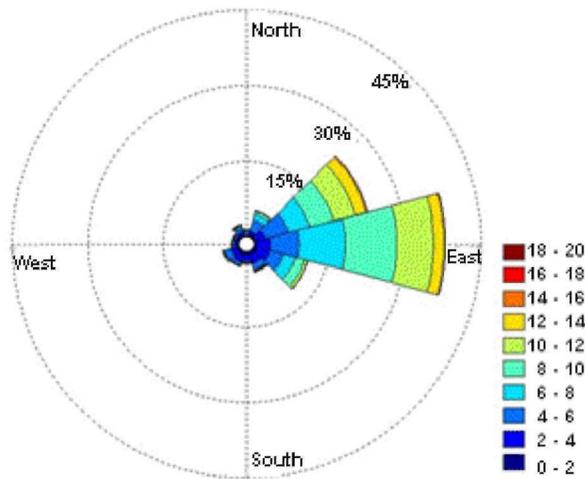


Figura 12 Rosa de los vientos en Matlab

Fuente: MATLAB para la evaluación del recurso eólico

4.4.3 Distribución del viento

El viento presenta un tipo de distribución conocida como distribución de Weibull (Figura 13). La distribución Weibull tiene la siguiente función de densidad de probabilidad:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} \quad (1)$$

Donde:

k = factor de distribución de forma [---]⁸

c = parámetro de escala [m/s]

v = velocidad observada [m/s]

⁸ Cuando el factor $k = 2$ la distribución se conoce con el nombre de Rayleigh

A través de esta curva se puede conocer la probabilidad de observar una determinada velocidad del viento dentro de la cantidad de muestras obtenidas. Es preciso añadir que el parámetro c es considerado la media de la distribución.

Para el caso de la distribución Weibull, la media y varianza se expresan de la siguiente manera:

$$E(x) = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)^9 \quad (2)$$

$$\text{var}(x) = c^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right] \quad (3)$$

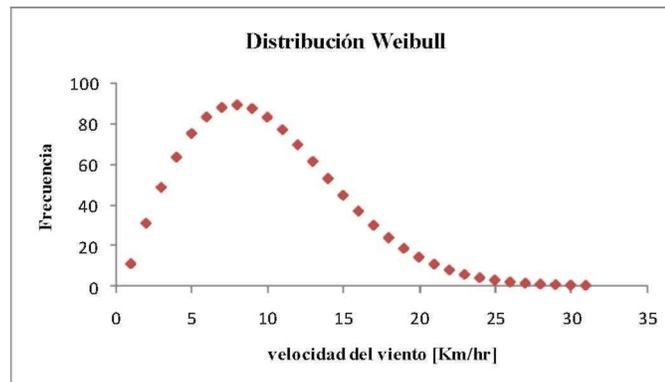


Figura 13 Distribución Weibull para la velocidad del viento

Fuente: Elaboración propia

Cuando el valor de $k=2$ la distribución se conoce como Distribución Rayleigh.

$$p(v) = \frac{2}{c} \left(\frac{v}{c}\right) e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (4)$$

$$p(v) = \frac{2v}{c^2} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (5)$$

Para el caso de la distribución Rayleigh la media y varianza se expresan de la siguiente manera:

⁹ Γ =Función Gamma, donde $\Gamma(n+1)=n\Gamma(n)=n(n-1)! = n!$. Valor conocido $\Gamma(1/2)=\sqrt{\pi}$

$$E(x) = \sigma \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (6)$$

$$\text{var}(x) = \frac{4 - \pi}{2} \cdot \sigma^2 \quad (7)$$

Donde:

$$\sigma = \frac{c}{\sqrt{2}} \quad (8)$$

4.4.4 Variabilidad mensual y estacional

La variabilidad del viento, representa una de las mayores dificultades para un análisis preciso de su comportamiento a lo largo del tiempo. Existe variabilidad en períodos cortos de tiempo así como en estaciones del año. Las variaciones de la velocidad del viento dependen de la posición geográfica y las condiciones topográficas específicas del lugar de estudio. En general, lugares con latitudes continentales medias experimentarán vientos fuertes en invierno y primavera, principalmente por la actividad de escalas largas de tormentas [Frost, 1998]. Un ejemplo para sitios con latitudes medias, se presenta en la Figura 14, en la cual se presentan las fluctuaciones del viento a lo largo de un mes, y donde se hace evidente tres períodos claros de ráfagas, que abarcan cerca de 10 días con velocidades cercanas a 20 m/s.

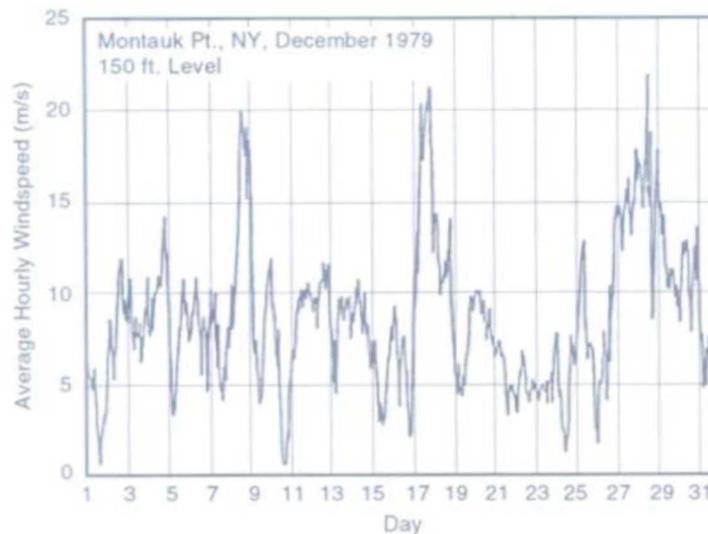


Figura 14 Variaciones en la velocidad del viento en lugares de latitud media

Fuente: Wind Turbine Technology, Fundamental concepts of wind technology engineering

La caracterización anual del viento y la energía anual disponible anual, son medidas comunes para representar el potencial eólico de una zona, ya que las mediciones de viento en tiempos cortos son muy variables. Sin embargo, la realización de análisis mensuales, permite conocer las condiciones de viento y radiación presentes, en relación a las condiciones climáticas de cada estación del año. De esta manera se encuentra con precisión los meses en los que el recurso eólico o solar es predominante, para sacar mejor provecho de cada una de ellos. Los análisis diarios permiten conocer el comportamiento del viento durante el día y durante la noche, además de conocer los días en los cuales se presentan ráfagas de viento fuerte y los meses en los que se presentan comportamientos especiales.

4.5 Aerogeneradores de baja escala

La generación de energía eléctrica en base a generadores eólicos de baja escala es la mejor alternativa para aquellas regiones donde se carece de este servicio pero donde el recurso eólico es abundante. La dispersión de las viviendas y la falta de infraestructura caminera, dificultan la extensión de líneas eléctricas, por lo que cientos de familias carecen del servicio eléctrico. Por esta razón los generadores se convierten en una de las pocas alternativas y en algunos casos la única que puede solucionar problemas de abastecimiento energético en zonas aisladas [Antezana, 2004].



Figura 15 Generador eólico de baja escala para uso doméstico

Fuente: www.zeuselectrica.cl

Es importante tomar en cuenta que las ventajas de generadores eólicos pequeños son una solución inmediata al problema de la carencia de electricidad, no requiere transportar la energía y representa costos más bajos a medida que la tecnología e incentivos van incrementándose. Aunque la variabilidad del viento representa un obstáculo, es posible ser energéticamente

autosuficientes con sistemas eólicos planificados, acorde a las necesidades energéticas del usuario para uso doméstico. También existe la posibilidad de instalar generadores eólicos de baja escala en infraestructuras turísticas (establecimientos de turismo rural, granjas, camping, refugios, usuarios domésticos aislados en las montañas, el mar o una isla) donde no existe red eléctrica, combinándose con paneles solares y generadores diesel.¹⁰

Las dimensiones del generador lo hacen portable, de fácil instalación y mantenimiento a lo largo de su vida útil. De igual forma pueden combinarse por medio de sistemas híbridos eólico solar, que permitan obtener las ventajas del recurso en dependencia de la zona en particular donde se instalen. En muchos casos al ser generadores de mediana tecnología son de fácil ensamble y fabricación y no requieren de maquinaria especializada ni materias primas costosas y funcionan en condiciones de viento moderadas, por lo que su utilización se hace más versátil. Aunado a esto la energía eólica es gratis, limpia y renovable [Escudero, 2008].

El nivel de ruido de los modernos generadores eólicos residenciales se encuentra entre 52 y 55 dB¹¹ que dentro de la escala de ruido se cataloga como un ruido suave, equivalente al sonido de un refrigerador o un aparato de aire acondicionado [Niebel, 2004].

4.6 Clasificación de generadores eólicos

De manera general los generadores eólicos se clasifican de acuerdo a cuatro criterios:

4.6.1 Según el eje de trabajo

4.6.1.1 Generadores de eje vertical: No son de uso común. Su diseño no le permite alcanzar altas velocidades [Escudero, 2008]. Su rendimiento es bajo comparado con generadores de eje horizontal. Los modelos hasta ahora más conocidos de eje vertical son: Savonius y Darrieus. Las principales ventajas que poseen es que no necesitan orientación.

4.6.1.2 Generadores de eje horizontal: Son los más usados por tener mayor rendimiento. Necesitan de orientación.

4.6.2 Según el número de palas

¹⁰ Proyecto RES & RUE Dissemination, ENERGÍA EÓLICA, pág. 9

¹¹ INNOVA Wind Power Turbinas eólicas comprometidas con el Medio Ambiente

4.6.2.1 Generadores multi aspa: Los generadores multi aspa son lentos sin embargo tienen un par mucho mayor debido a la resistencia que oponen al paso del viento por lo tanto arrancan con velocidades de viento bajas.

4.6.2.2 Generadores Mono pala: Necesitan contrapeso

4.6.2.3 Generadores bi aspa: Presenta inestabilidad en posiciones verticales. Las fuerzas no están compensadas en todo su radio de giro. Por otra parte la inercia que producen cambia de acuerdo a su posición.

4.6.2.4 Generadores tri aspa: Tienen mayor estabilidad. Las fuerzas se compensan y distribuyen mejor que con dos palas.

4.6.3 Según la posición del rotor en la máquina

4.6.3.1 Generadores de barlovento: Son aquellos en los que el viento impacta delante del generador. Comúnmente los generadores reciben el viento en su parte anterior.

4.6.3.2 Generadores de sotavento: Son aquellos en los que el viento impacta por detrás del generador.

4.6.4 Según el anclaje de las hélices al buje

4.6.4.1 Paso variable: Las hélices tienen movimiento de rotación que permite la regulación de velocidad.

4.6.4.2 Paso fijo: Las hélices están fijas al eje de rotación.

4.7 Método de operación del generador eólico para la transformación de energía

Los generadores eólicos de pequeña escala, constan de 4 partes principales: rotor, generador, torre y cola, tal como se muestra en la Figura 16. El rotor consta de palas diseñadas aerodinámicamente para obtener la mayor energía proveniente del viento. El alternador consta de un sistema de embobinados e imanes (un o fijo y otro en movimiento rotatorio), los cuales interactúan para la generación de electricidad por medio de la Ley de Faraday. La corriente obtenida es almacenada en baterías, para lo cual se necesita de convertidores, ya que la energía obtenida está en CA (corriente alterna) y la energía en la batería se almacena en CD (corriente

directa). El sistema de direccionamiento o cohetaje permite dar seguimiento a la dirección del viento en un rango de giro establecido por el generador.

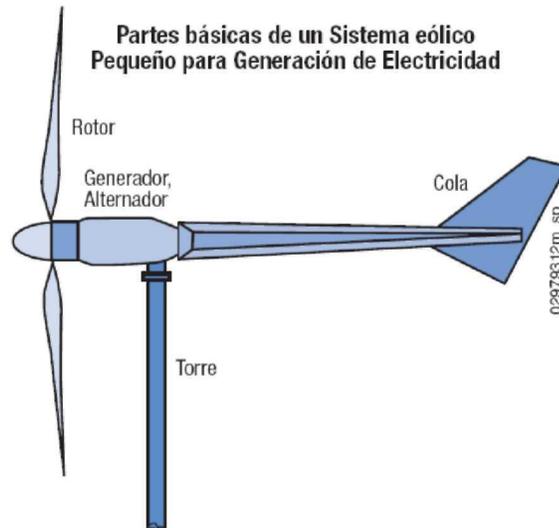


Figura 16 Partes básicas generadores eólicos de baja escala

Fuente: Departamento de Energía de EE.UU.

La transformación de la energía eólica mediante un aerogenerador a energía eléctrica se lleva a cabo mediante los siguientes procesos [Halkema, 2006].

1. Transformación de la energía solar térmica a energía cinética mediante el movimiento de masas de aire a través del ambiente, mediante procesos de termodinámicos. Se tiene sólo un aprovechamiento del 2% en base a la radiación total sobre la Tierra.
2. El proceso en el aerogenerador inicia con la energía cinética del viento como fuente de energía, que posee la característica de ser variable entre un valor nulo hasta uno máximo, siendo su comportamiento impredecible debido a factores climatológicos.

La energía del viento puede medirse a partir de la energía cinética mediante la fórmula:

$$E_c = \frac{mv^2}{2} \quad (9)$$

Donde:

E_c = energía cinética [J]

m = masa del aire [Kg]

v = velocidad [m/s]

Considerando ahora un cilindro dv por el cual atraviesa aire, con una velocidad v .

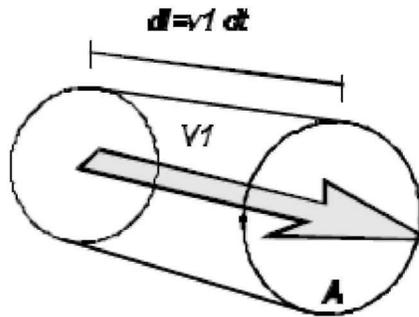


Figura 17 Cilindro diferencial para determinar potencia eólica

La energía que atraviesa la superficie A en la unidad de tiempo es la potencia P .

$$P = \frac{dE_C}{dt} = \frac{\rho \cdot A \cdot v_1^3}{2} \quad (10)$$

3. La energía eólica es transformada a energía mecánica, por medio de las aspas del rotor del generador con cierta eficiencia. La máxima potencia extraíble del viento está definida por la siguiente fórmula:

$$P = C_{pw} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \right) \quad (11)$$

Donde C_{pw} es el coeficiente de potencia que determina el rendimiento aerodinámico del rotor, generalmente está entre 0.3 y 0.5.

Es importante tomar en cuenta el dimensionamiento del rotor para obtener un buen rendimiento. Para ello es indispensable conocer la potencia que debe generar el rotor, y su velocidad de giro.

4. La corriente generada es transformada por un circuito semiconductor en una corriente de 50 a 60 Hertz.
5. Se le da a la corriente el voltaje adecuado para conectarse a la red eléctrica mediante un transformador.

4.8 Factor de carga

El factor de carga es un parámetro que mide la productividad de un generador de viento o cualquier otro modo de producción. Ese valor compara la producción actual de un generador sobre un periodo definido con la cantidad de energía del mismo generador si ésta trabajara a su máxima capacidad durante el mismo intervalo de tiempo.

$$F_c = \frac{E}{E_{\max}} \quad (12)$$

Donde:

F_c = factor de carga [---]

E = cantidad actual de energía producida [Kw-hr]

E_{\max} = energía producida si el generador operara al máximo de su capacidad [Kw-hr]

El factor de carga está relacionado directamente al potencial eólico de una zona y al desempeño que tiene un generador eólico con respecto a la misma. Es decir que en zonas donde el recurso eólico es abundante, el factor de carga será mayor y el desempeño del generador estará más cerca a ser el óptimo.

4.9 Relaciones de altura, velocidad, área

Debido a que existe una relación de proporcionalidad entre la potencia y sus diferentes variables, es posible obtener las ecuaciones que permiten establecer el incremento o decremento de la potencia con respecto a la variación de:

- Velocidad del viento
- Área del generador, dimensión de las aspas
- Altura de instalación con respecto al piso

Para el caso de variaciones en el viento, la relación es cúbica, lo que significa que si se incrementa al doble la velocidad, la potencia se incrementa 8 veces.

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^3 \quad (13)$$

Para el caso de variaciones en el área del generador, la relación es cuadrática, lo que significa que si se incrementa al doble el radio de las aspas, la potencia se incrementa 4 veces.

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 \quad (14)$$

4.10 Perfil del viento

El perfil de viento es la representación gráfica de la variación de la velocidad con la altura o la distancia. Para expresar su comportamiento se han establecido diferentes metodologías, aunque la más conocida y aceptada es la *ley exponencial de Hellman* que indica que la velocidad del viento en un emplazamiento crece exponencialmente con respecto a la altura, como se muestra en la Figura 18. Debido a que por lo general se tiene mediciones de velocidad de viento a 10 m. es posible extrapolar los valores de velocidad media a diferentes alturas.

Para terrenos abiertos se toma como valor frecuente 1/7. Es necesario considerar que este parámetro puede variar para un mismo sitio desde un valor de 1/7 durante el día hasta 1/2 durante la noche [Camblong, 2003].

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^\alpha \quad (15)$$

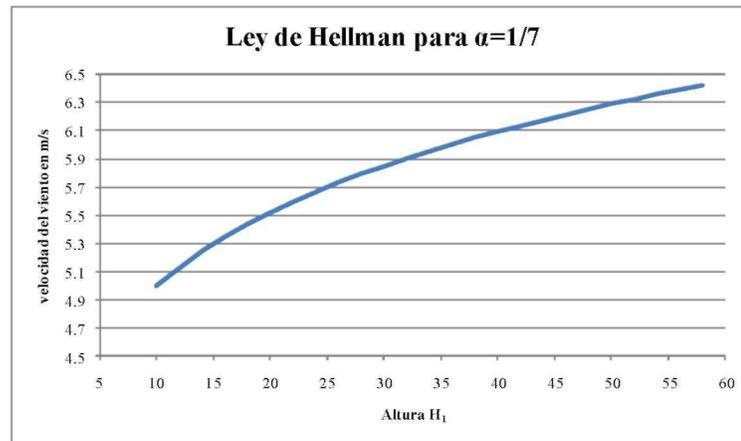


Figura 18 Ley de Hellman para el perfil del viento

Fuente: Elaboración propia

Reemplazando la ecuación (15) en (13) se obtiene la relación existente entre altura y potencia, como se muestra en la ecuación (16):

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^{3\alpha} \quad (16)$$

Cuando el valor de $\alpha = 1/7$, la ecuación (16) se la conoce como *ley de potencia de un séptimo*.

Tabla 3 Exponente de corte según la rugosidad del terreno ¹²

Terreno	Longitud de Rugosidad [m]	Exponente de Hellman (α)
Hielo	0.00001	0.07
Nieve en tierra plana	0.0001	0.09
Mar calmado	0.0001	0.09
Costa con viento en tierra	0.001	0.11
Cultivos cubiertos de nieve	0.002	0.12
Césped cortado	0.007	0.14
Pradera con césped corto	0.02	0.16
Pradera con césped alto	0.05	0.19
Cercas	0.085	0.21
Arboles dispersos y cercas	0.15	0.24
Arboles, cercas y pequeñas construcciones	0.3	0.29
Suburbios	0.4	0.31
Bosques	1	0.43

Fuente: Wind Turbine Technology, Fundamental concepts of wind technology engineering

4.11 Ley de Betz y la máxima eficiencia de conversión

La ley de Betz fue formulada en 1919 por el físico alemán Albert Betz en su libro “Wind Energie”. La ley de Betz define la máxima potencia que puede ser captada por un generador u obstáculo para el viento.

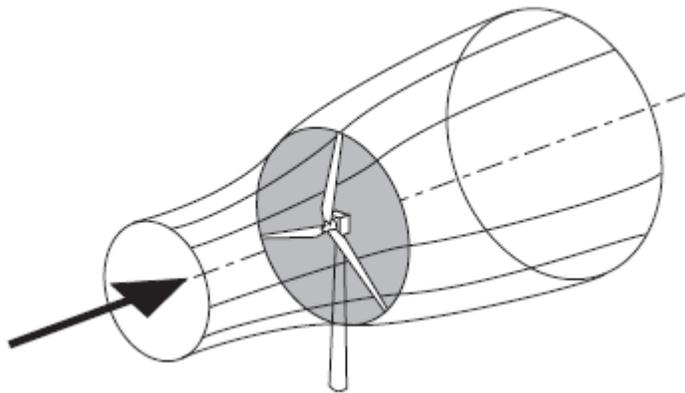


Figura 19 Flujo de viento a través del generador eólico

Fuente: Wind Energy Handbook

Para comprender el concepto es necesario establecer la potencia captada en relación a la potencia del viento.

¹² Datos experimentales a una altura de 10 m. de altura con respecto al piso.

$$P_{captada} = \frac{E_1 - E_2}{\Delta t} = \frac{\frac{1}{2} \Delta m_{aire} v_1^2 - \frac{1}{2} \Delta m_{aire} v_2^2}{\Delta t} \quad (17)$$

$$P_{captada} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta m_{aire}}{\Delta t} \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (18)$$

Se debe calcular la variación de la masa de aire que pasa por el generador en el tiempo, lo cual se obtiene por medio de la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta m_{aire}}{\Delta t} = \rho \cdot A \cdot \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) \quad (19)$$

Reemplazando (18) en (19) se tiene:

$$P_{captada} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (20)$$

Dado que la potencia del viento está definida por la ecuación (3) se encuentra la siguiente relación:

$$\frac{P_{captada}}{P_{viento}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) \cdot (v_1^2 - v_2^2)}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3} \quad (21)$$

$$\frac{P_{captada}}{P_{viento}} = \frac{(v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2)}{2v_1^3} \quad (22)$$

$$\frac{P_{captada}}{P_{viento}} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right) \quad (23)$$

A partir de la ecuación (23) es posible graficar la curva que expresa la relación entre velocidades y potencia, como se muestra en la Figura 20.

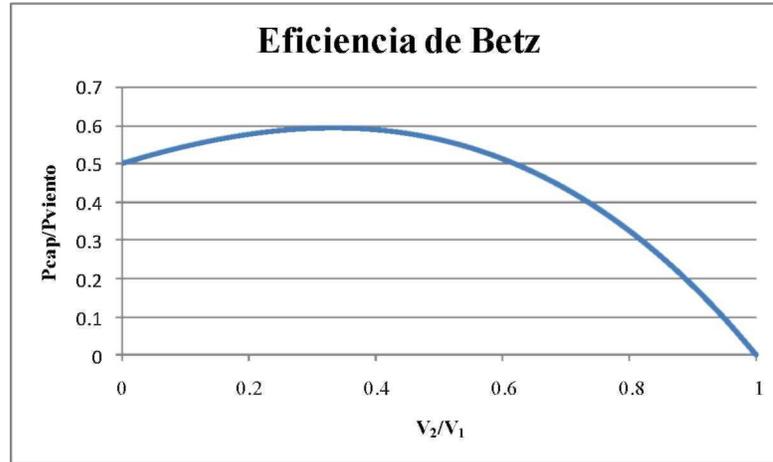


Figura 20 Relaciones de potencia máxima. Ley de Betz

Fuente: Elaboración propia

Ajustando la curva se obtiene la siguiente ecuación:

$$y = -1.25x^2 + 0.7928x + 0.4786 \quad (24)$$

Derivando la ecuación (24) se obtiene el valor que maximiza la ecuación:

$$\frac{v_2}{v_1} = 0.31712 \quad (25)$$

A partir del resultado obtenido en (25) y reemplazando en la ecuación (24) se obtiene el coeficiente de potencia máximo:

$$C_{pw\max} = \frac{P_{\text{captado}}}{P_{\text{viento}}} = 0.5923 \quad (26)$$

Asumiendo una densidad del aire de: 1.25 kg/m^3 , y reemplazando en la ecuación (11) la potencia máxima de un generador se define por la siguiente ecuación:

$$P_{w\max} = 0.37 \cdot A \cdot v^3 = C_{pw\max} \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (27)$$

4.12 Diseño de las palas a partir de la fórmula de Betz

La fórmula de Betz nos permite encontrar la relación que existe en el diseño de las palas con respecto a su tamaño. Para comprobar la influencia del diseño con respecto a sus dimensiones tomaremos un diferencial de área, donde:

$$\Delta A = \pi \cdot R^2 \quad (28)$$

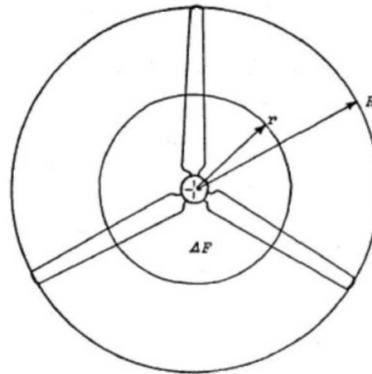


Figura 21 Relaciones de potencia máxima bajo un diferencial de área

Fuente: Introducción a la teoría de las turbinas eólicas

Por lo tanto la potencia desarrollada en esta área es:

$$\Delta P = 0.37 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot v^3 \quad (29)$$

Puesto que la potencia está definida por:

$$P = 0.37 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \quad (30)$$

La relación entre ellas es:

$$\frac{\Delta P}{P} = \left(\frac{r}{R} \right)^2 \quad (31)$$

De esta manera se comprueba que para una $r = 0.5R$ la relación de potencia es igual a 0.25. Lo que significa que la mitad interior de las palas solo contribuye con el 25% de la potencia, por lo cual hay que tener cuidado en que el diseño de la parte exterior tenga un mejor acabado en su aerodinámica.

4.13 Generador eólico no ideal

4.13.1 Pérdidas

Los generadores eólicos siempre presentan pérdidas. Estas se clasifican en las siguientes:

4.13.1.1 Pérdidas mecánicas: Son causadas por la fricción.

4.13.1.2 Pérdidas eléctricas: Son causados por el diseño del alternador, los cables, baterías, etc.

4.13.1.3 Pérdidas aerodinámicas: Son causados porque existe resistencia aerodinámica (mal diseño de las palas) y por las turbulencias detrás de las palas que reducen la potencia del rotor.

Es así que el rendimiento del rotor eólico se define por:

$$\eta_w = \frac{P_w}{P_{w\max}} \quad (32)$$

Reemplazando las ecuaciones (27) y (11) en (32) se obtiene:

$$\eta_w = \frac{C_{pw}}{C_{pw\max}} \quad (33)$$

Por lo tanto:

$$C_{pw} = 0.5923 \cdot \eta_w \quad (34)$$

Finalmente se obtiene:

$$P_w = 0.37 \cdot \eta \cdot A \cdot v^3 \quad (35)$$

Donde el rendimiento total se calcula multiplicando los rendimientos individuales de los componentes principales del generador.

$$\eta = \eta_w \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \dots \eta_n \quad (36)$$

4.14 Velocidades en un generador

4.14.1 Velocidad específica de un rotor

La velocidad específica de un rotor es la relación que existe entre la velocidad en las puntas de las palas con respecto a la velocidad frontal del viento al golpear las palas.

$$\lambda_0 = \frac{u_0}{v} \quad (37)$$

Las palas de un rotor sólo trabajan óptimamente cuando giran a una determinada velocidad específica λ_0 a la que fueron diseñadas [Franquesa, 2009]. Es por esto que el rendimiento η_w ya no es constante, sino que depende de la velocidad específica momentánea. Por lo que la ecuación (35), se expresa de la siguiente manera:

$$P_w(\lambda_0) = 0.37 \cdot \eta_w(\lambda_0) \cdot A \cdot v^3 \quad (38)$$

La velocidad específica nominal (λ_d) es aquella que determina si el rotor es “lento” o “rápido”.

$$\lambda_d = \lambda_0 \cdot \eta_{\max} \quad (39)$$

$\lambda_d \leq 3$ Son catalogados como lentos.

$\lambda_d > 4$ Son catalogados como rápidos.

En la práctica existen rotores con $0.9 < \lambda_d < 15$, inclusive algunos de 20 [Franquesa, 2009].

4.14.2 Velocidad de giro

La velocidad de giro (ω), expresada en revoluciones por minuto (r.p.m.) está definido de la siguiente manera:

$$u_0 = \frac{\omega \cdot 2 \cdot \pi \cdot R}{60} \quad (40)$$

De la ecuación (38) se tiene:

$$\lambda_0 \cdot v = \frac{\omega \cdot 2 \cdot \pi \cdot R}{60} \quad (41)$$

Despejando ω :

$$\omega = \frac{60 \cdot \lambda_0 \cdot v}{2 \cdot \pi \cdot R} \quad (42)$$

A partir de la ecuación (40) se calcula ω_{\max} en función de λ_d , que genera una potencia máxima:

$$\omega = \frac{60 \cdot \lambda_d \cdot v}{2 \cdot \pi \cdot R} \quad (43)$$

4.14.3 Velocidad de arranque: Velocidad mínima del viento para que la máquina empiece a girar. La producción de energía no es la suficiente para compensar las pérdidas del sistema.

4.14.4 Velocidad de conexión: Es la velocidad mínima del viento, para que el generador empiece a generar potencia compensando las pérdidas del sistema.

4.14.5 Velocidad de potencia nominal: Es el intervalo de velocidades en las cuales se consigue la potencia nominal del generador manteniendo un valor constante.

4.14.6 Velocidad de corte: Es la máxima velocidad que puede alcanzar un generador. Más allá de esta velocidad, el generador deja de producir energía al accionar un sistema de frenado automático, para evitar daños en el generador.

4.15 Par de giro de un generador eólico

El momento o par de giro se obtiene partiendo de la siguiente relación:

$$M_w = \frac{60 \cdot P_w}{2 \cdot \pi \cdot \omega} \quad (44)$$

Reemplazando la ecuación (45) en la ecuación (46) se obtiene:

$$M_w = \frac{D \cdot P_w}{2 \cdot \lambda_0 \cdot v} \quad (45)$$

Reemplazando la ecuación (4) en (47)

$$M_w = \frac{D \cdot C_{pw\max} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2}{4 \cdot \lambda_0} \quad (46)$$

Finalmente se obtiene la ecuación para el momento, definida por la siguiente ecuación:

$$M_w = \frac{C_{pw\max}}{\lambda_0} \left(\frac{\pi \cdot \rho \cdot R^3 \cdot v^2}{2} \right) \quad (47)$$

A partir de la ecuación (47) se obtiene el coeficiente de par de rotor eólico, definido por la siguiente ecuación:

$$C_m = \frac{C_{pw\max}}{\lambda_0} \quad (48)$$

Cuando el rotor eólico no está en movimiento, no es posible calcular el momento debido a que tanto $C_{pw\max}$ y λ_0 tienen valores de cero. Es por ello que se utiliza la relación propuesta por Lysen, que indica que el coeficiente de par de arranque del rotor se define de la siguiente manera:

$$C_{m_0} = \frac{0.5}{\lambda_d^2} \quad (49)$$

4.16 Almacenamiento de energía

La variabilidad del viento y su relación directa con la potencia suministrada condicionan el uso directo de la energía, ya que en muchos casos no sería la suficiente para alimentar sistemas de iluminación, electrodomésticos, ventilación, etc. Es por esta razón que es imprescindible el uso de baterías que garanticen el abastecimiento de energía por periodos más largos.

Las baterías se conocen como acumuladores y almacenan la electricidad producida por el aerogenerador. La energía se utiliza independientemente de las condiciones del viento.

Una batería está constituida de varias células o unidades de 2V. De esta manera un conjunto de 6 células generan un voltaje de 12V. En dependencia de las necesidades se establece el voltaje de las baterías (12, 24 ó 48V).

4. 17 Dimensionamiento del banco de baterías y elección de inversor

4.17.1 Banco de baterías

El dimensionamiento del banco de baterías está relacionado directamente con la potencia entregada por el aerogenerador.

Potencia < 4.5Kw	banco de 12 V
4.5 Kw < Potencia < 8Kw	banco de 24 V
Potencia > 8Kw	banco de 48 V

El amperaje de las baterías dependerá de la autonomía que se requiera, a un voltaje constante. La “autonomía” indica el tiempo que la batería otorga energía antes de descargarse. Los días de autonomía son los días en que el sistema puede continuar sus funciones (consumo de energía), sin que exista generación de la fuente primaria [Sarmiento, 2009].

En el caso del dimensionamiento de las baterías es importante calcular la capacidad de las mismas. Estas se calculan tomando en cuentas la siguiente expresión:

$$C_b = \frac{A_u \cdot E_c}{V_b \cdot f_u \cdot F_i \cdot \eta_{inv}} \quad (50)$$

Donde:

A_u = autonomía del sistema [días]

E_c = energía consumida [Kw-hr]

V_b = voltaje de la batería [voltios]

f_u = fracción de autonomía del sistema [---]

f_i = factor de incremento de capacidad de la batería [---]

η_{inv} = rendimiento del inversor [---]

Se denomina días de autonomía a los días en el que el sistema puede continuar sus funciones (consumo de energía), sin que exista generación de la fuente primaria.

4.17.2 Elegir un inversor

El inversor depende de las siguientes variables:

- Potencia de la instalación
- Calidad de onda sinusoidal que se precise
- Frecuencia
- Potencia simultánea máxima
- Voltaje ¹³

¹³ Manual de energía eólica. Investigación, diseño, promoción, construcción y explotación de distintos tipos de instalaciones. Pág. 143.

Las características dependerán de los requerimientos, de la necesidad y de la accesibilidad.

Tabla 4 Lista de verificación para la elección de un inversor

Características	Valores
Voltaje de entrada [volts]	
Voltaje de salida [volts]	
Frecuencia [Hz]	
Máxima potencia simultánea [W]	
Cargador (sí/no)	
Trifásico (sí/no)	
Sinusoidal (sí/no)	

4. 18 Sistemas de generación híbrida

Los sistemas híbridos son de gran utilidad, debido al comportamiento de las condiciones climáticas. Por ejemplo, en el caso del viento, el recurso eólico es más abundante en invierno. En el caso de radiación solar, esta es más abundante en verano. Es también importante conocer el comportamiento promedio de las velocidades del viento a lo largo de un día, que suele incrementarse durante la mañana y tarde acompañado de radiación solar. Este comportamiento permite almacenar energía durante el día y utilizarla durante la noche. Es aquí donde radica la importancia de sistemas de generación híbrida.

Por otro lado, los sistemas híbridos son complementarios en términos de requerimientos energéticos, ya que la compra de más de un generador eólico podría representar un gasto innecesario, mientras que la compra de un panel solar que incremente la disponibilidad de energía, podría resultar más económico y óptimo en términos de costos. La Figura 22 esquematiza el funcionamiento de un sistema híbrido.

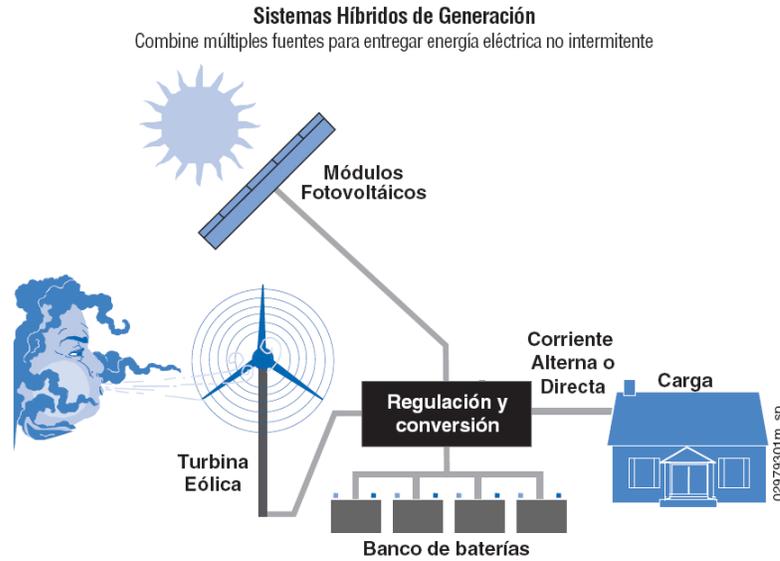


Figura 22 Sistema Híbrido de generación eléctrica

Fuente: Departamento de Energía de EE.UU.

4.18.1 Paneles solares

El uso de paneles solares depende de la radiación solar de la zona. La radiación solar ultravioleta se mide en W/m^2 . La radiación solar ultravioleta es la fracción que contiene más energía del espectro solar que alcanza la superficie de la tierra [Escudero, 2008]. La intensidad de la radiación ultravioleta se mide a través de un índice, conocido como Índice Ultra Violeta (IUV) y se mide de la siguiente manera:

Tabla 5 Categoría de exposición a los rayos UV

Categoría de Exposición	Intervalo de valores del IUV
Baja	< 2
Moderada	3 a 5
Alta	6 a 7
Muy Alta	8 a 10
Extremadamente alta	> 11

Fuente: Organización Mundial de la Salud

La radiación solar máxima se presenta cerca del medio día. La radiación que llega a nivel de suelo depende de la contaminación presente, nubes, partículas suspendidas, ozono. Se debe tomar en consideración la inclinación de los paneles tanto en invierno como en verano, ya que

maximizan la producción de energía eléctrica a lo largo de un año. La inclinación depende de la zona geográfica de estudio (latitud y longitud).

4.18.2 Ventajas para la utilización de paneles solares

La utilización de paneles solares, es una opción atractiva para la producción de energía eléctrica, en zonas donde el recurso solar es abundante. Aunque su precio sigue siendo superior con respecto a sistemas eólicos en términos de Kw-hr producido, no resulta ser el factor determinante para su utilización. A continuación se presentan sus principales ventajas:

- Tienen un funcionamiento simple
- Bajo impacto visual
- Bajo impacto ambiental
- Fácil instalación
- Larga vida útil
- Poco mantenimiento
- Captan radiación difusa (captan radiación en días nublados)
- Precio cada vez más bajos

4.19 Análisis económico

El análisis económico de un sistema híbrido involucra el análisis de los costos involucrados, desde la evaluación técnica del recurso (eólico y solar), instalación, hasta los costos de operación y mantenimiento. El tiempo de análisis toma en cuenta el tiempo de vida útil del generador (20 años). Los flujos de efectivo, están dados por los ahorros de electricidad.

La evaluación económica debe incluir los siguientes pasos:

1. Reducción de los costos anuales de la electricidad proveniente de cableado eléctrico.
2. Programas de apoyo de gobierno tales como subvenciones, incentivos, créditos.
3. Costos asociados a la no emisión de GEI.¹⁴

La inversión inicial contempla la compra del generador y paneles solares (en caso necesario para cubrir déficit de energía), y sus componentes clave: baterías, convertidores, reguladores, torre, controlador de voltaje. A partir de ello es posible realizar un estimado de la inversión para el sistema y determinar el costo de producir 1 Kw-hr.

¹⁴ Variables incluidas en el Manual práctico de evaluación de una instalación de energía eólica a pequeña escala

En el año 2008, el precio medio de los sistemas pequeños de energía eólica (de hasta 10 Kw) es de aproximadamente de 5 Eu /Kw [Hulshorst, 2009]. Generadores eólicos más grandes alcanzan una relación cada vez menor, teniendo una relación inversamente proporcional.

Algunos costos asociados a la instalación de un sistema híbrido son los siguientes:

- Costos para la obtención de datos
- Transporte del sistema
- Instalación
- Mantenimiento

Capítulo 5. Metodología

En esta tesis se presenta un estudio que permite construir una metodología para la toma de decisiones para la instalación de generadores eólicos de baja escala, en términos técnicos, económicos, ambientales y sociales. Para el estudio se utiliza datos meteorológicos provenientes de la estación La Rumorosa en Baja California, administrada por el Sistema Meteorológico Nacional. La investigación será de carácter descriptivo, en la cual se pretende caracterizar el lugar de estudio y describir sus principales variables climáticas, a partir de la cual se establece un perfil que permite establecer las bases para el desarrollo de la metodología.

5.1 Obtención de datos

Para la obtención de datos se procedió a establecer zonas susceptibles de análisis, acudiendo a la página del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), en donde es posible acceder a 136 Estaciones Meteorológicas Automáticas y 44 Estaciones Sinópticas Meteorológicas Automáticas, todas ellas administradas por el SMN. Los datos que se proveen directamente en la página reportan los datos de las últimas 24 horas del día, en formato de texto o formato de Excel.

Se analizó las estaciones con velocidades promedio mayores a 3 m/s y con máximos de 25 m/s. A partir de un análisis preliminar y la disponibilidad de datos se eligió las siguientes estaciones para análisis:

1. Sactorum - Tlaxcala
2. Arcos del Sitio – Estado de México
3. Nevado de Toluca – Estado de México
4. La Rumorosa – Baja California

Posteriormente se acudió directamente a las oficinas del SMN, en donde se solicitó los datos correspondientes a 1 año. Teniendo los datos, se realizó un escaneo preliminar en donde se evaluó la estación que tuviera mayor cantidad de datos completos y menor cantidad de mediciones susceptibles de error, en este caso valores de 0 (periodos de calma o mediciones erróneas). Finalmente se decidió utilizar los datos de La Rumorosa en el Estado de Baja California.

5.2 Descripción de la estación meteorológica

Las estaciones utilizadas para la medición son las denominadas EMAS (Estación Meteorológica Automática). Estas poseen diferentes tipos de sensores, que registran datos en tiempo real de las principales variables meteorológicas. El envío de información vía satelital se hace en intervalos de 1 ó 3 horas por estación.

El área representativa de las estaciones es de 5 Km de radio aproximadamente, en terreno plano, excepto en terreno montañoso.¹⁵ Las EMAS están montadas en dos tipos de estructuras, tipo Andamio y tipo Torre Triangular como se muestra en la Figura 23.

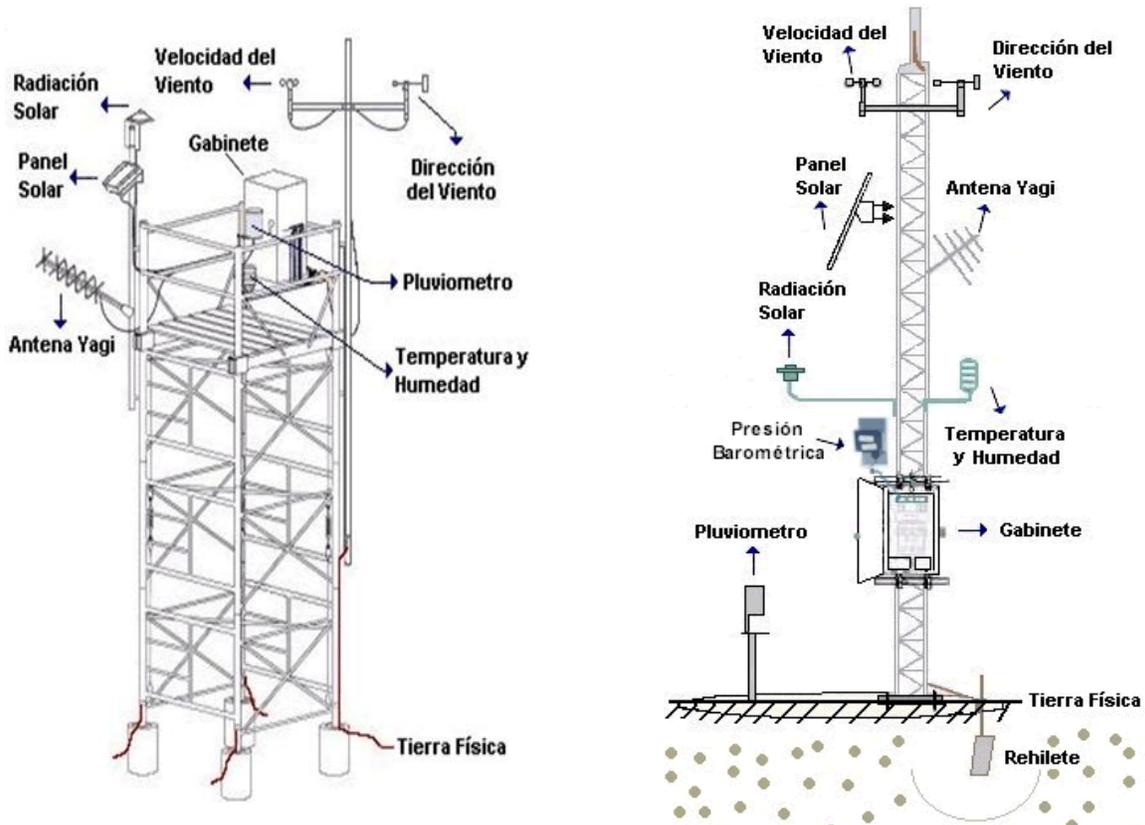


Figura 23 Estructura tipo Andamio (izq.) y Estructura tipo Torre Triangular (der.)

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional México

Los datos proporcionados por la estación ofrecen las siguientes variables:

1. Dirección del viento
2. Dirección de ráfaga
3. Velocidad del viento
4. Velocidad de ráfaga
5. Temperatura
6. Presión barométrica
7. Precipitación
8. Radiación Solar

¹⁵ Descripción de una Estación Meteorológica Automática, <http://smn.conagua.gob.mx/emas/pemas/>

Tabla 6 Variables medidas cada 10 minutos.

Fecha	Dir. V. [grados]	Dir. R. [grados]	Vel. V. [Km/hr]	Vel. R. [Km/hr]	Temp [°C]	HumR [%]	PresAtm [mbar]	Prec [mm]	RadSolar [W/m ²]
01/01/2010 0:00	40	58	2.22	4.14	5.7	13	883.1	0	0
01/01/2010 0:10	286	356	1.14	2.36	5.5	13	883.2	0	0
01/01/2010 0:20	61	51	2.36	5.72	5.3	13	883	0	0
01/01/2010 0:30	19	46	2.72	4.28	5.5	13	882.9	0	0
01/01/2010 0:40	270	331	1.61	2.83	5.4	13	882.9	0	0
01/01/2010 0:50	227	261	1.25	2.53	5	14	882.8	0	0
01/01/2010 1:00	97	69	1.50	3.00	5.1	13	882.7	0	0
01/01/2010 1:10	72	59	2.72	5.89	5.2	13	882.7	0	0
01/01/2010 1:20	79	45	3.14	5.72	5.6	12	882.7	0	0
01/01/2010 1:30	125	111	2.86	4.14	5.2	14	882.6	0	0
01/01/2010 1:40	106	100	3.03	4.14	4.4	15	882.5	0	0
01/01/2010 1:50	106	108	2.50	3.47	4.3	15	882.4	0	0

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional México

5.3 Descripción de zona de análisis

La zona de análisis se localiza en el Estado de Baja California, en la zona de la Rumorosa. La ubicación exacta se presenta en la Figura 24.

Estación: RUMOROSA **Estado:** Baja California
Operada por: SMN EMAS
Longitud: 116°12'20" **Latitud:** 32°16'20" **Altitud:** 1262 m.s.n.m.

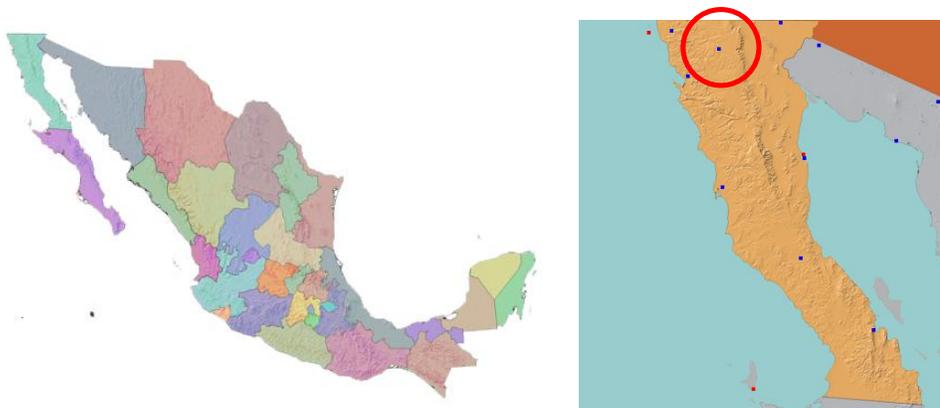


Figura 24 Localización de la estación La Rumorosa en México

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional México

La zona resulta ser una planicie, rodeada por montañas. En la zona se presenta escasa vegetación, accesos camineros de tierra, algunas edificaciones y una pequeña laguna. En la Figura 25 se muestra una vista aérea de la zona en cuestión.



Figura 25 Vista de la región de análisis. La Rumorosa, Baja California

Fuente: Google Earth 2011

5.4 Caracterización de la zona

La caracterización de la zona consistió en el análisis estadístico de las variables climáticas obtenidas en la base de datos correspondientes a 1 año y en intervalos de 10 min. Para una mejor comprensión de la zona, se realizó un análisis mensual y anual para identificar valores promedio, estacionalidades, valores máximos y mínimos. A partir de ellos se puede identificar las características de la zona y las variaciones climáticas que inciden directamente en la densidad del aire, que depende de la temperatura, presión atmosférica y precipitación y que merece un análisis cuidadoso, ya que está directamente involucrada en el cálculo de la potencia y energía.

5.5 Análisis del viento

Para comprender el comportamiento del viento se hizo un análisis estadístico de los datos obtenidos. Para el análisis se tomó en cuenta la información de las EMAS, de la cual se obtuvo la información de la estación “La Rumorosa” localizada en el Estado de Baja California.

Para analizar los datos se procedió a realizar un histograma de frecuencia con \sqrt{N} clases, para obtener la frecuencia acumulada y la frecuencia relativa de los datos. A partir de ella se conocen los puntos experimentales de las mediciones realizadas en campo.

A partir del histograma de frecuencia, se debe caracterizar los parámetros de la función de probabilidad Weibull, obteniendo sus correspondientes parámetros: c y k .

$$p(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (51)$$

Para linealizar la función, primeramente se debe encontrar la función acumulada $F(v)$ definida en la ecuación (53) y obtenida a partir de la integral simple evaluada desde 0 hasta un valor v .

$$\begin{aligned} F(v) &= \int_0^v p(v) dv \\ F(v) &= \int_0^v \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv \\ F(v) &= 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \end{aligned} \quad (52)$$

A continuación se procede a linealizar aplicando logaritmos (2 veces) a ambos lados de la ecuación (53), obteniendo:

$$\begin{aligned} 1 - F(v) &= e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \\ -\ln(1 - F(v)) &= \left(\frac{v}{c}\right)^k \\ \ln(-\ln(1 - F(v))) &= \ln\left(\frac{v}{c}\right)^k \\ \ln(-\ln(1 - F(v))) &= k \ln v - k \ln c \end{aligned} \quad (53)$$

Sabiendo que la ecuación general de la recta es $y = ax + b$ se tiene la siguiente analogía:

$$y = \ln(-\ln(1 - F(v))) \quad (54)$$

$$x = \ln(v) \quad (55)$$

Donde $F(v)$ es el acumulado de la frecuencia relativa para cada intervalo y el valor de v la marca de clase para cada intervalo. A partir de la regresión lineal se obtienen los parámetros: β_0 y β_1 donde:

$$\beta_0 = -k \ln c \quad (56)$$

$$\beta_1 = k \quad (57)$$

Finalmente se calcula el parámetro c a partir de la ecuación (57):

$$\begin{aligned} -\frac{\beta_0}{k} &= \ln c \\ e^{\left(\frac{\beta_0}{k}\right)} &= c \end{aligned} \quad (58)$$

Conociendo los parámetros k y c y tomando en cuenta que la frecuencia absoluta está definida por:

$$E_i = N \int_{\liminf}^{\limsup} f(v) dv \quad (59)$$

Integrando (59) se obtiene:

$$E_i = N \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}\right) \Bigg|_{\liminf}^{\limsup} \quad (60)$$

A partir de las frecuencias reales y experimentales (E_i) se obtienen las siguientes curvas de distribución de frecuencia, como se muestra en la Figura 26.

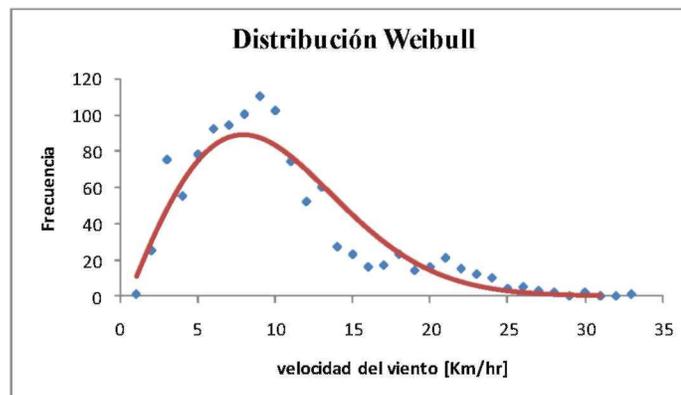


Figura 26 Distribución del viento real y ajustada¹⁶

Fuente: Elaboración propia

¹⁶ Curva ajusta $k=1.9566$, $c=12.8198$ [m/s]

5.6 Rosa de los vientos

En el caso de la Rosa de los Vientos, se tomó como variables de entrada las direcciones de viento. Sin embargo para este caso, se tomó en cuenta los datos con valores de 0 y aquellos datos faltantes, ya que el software utilizado hace un filtro preliminar en el cual identifica valores en calma y valores inexistentes. Para el análisis se utilizó el software WRPlot View de Lakes Environmental el cual se detalla la dirección predominante Figura 27.

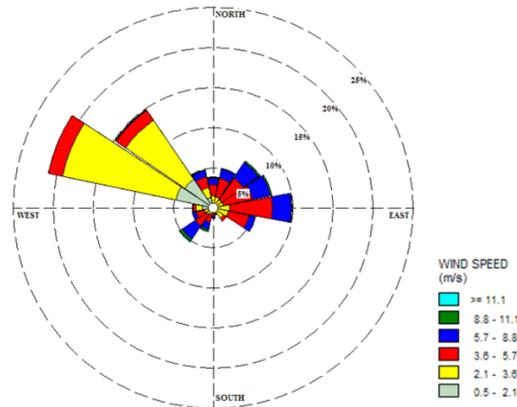


Figura 27 Rosa de los vientos, frecuencia de dirección y viento

Fuente: Elaboración propia

WRPlot View trabaja en ambiente WINDOWS y entre sus funcionalidades permite importar datos de Excel, revisar errores, guardar clases de los vientos y obtención de vectores resultantes [Ramírez, 1998].

5.7 Variabilidad mensual del viento, promedio por hora

A partir de los datos obtenidos, se obtuvo el promedio por hora ¹⁷ a lo largo de 24 horas por día. Cada uno de estos 24 valores se graficó para cada día correspondientes a los doce meses del año. A partir de los resultados se verificó las fluctuaciones de viento y la frecuencia de ráfagas presentes en un mes determinado, identificando los valores máximos de velocidad en los puntos críticos. De esta manera se conoce la actividad de vientos fuertes que en dado caso influyen en el desempeño de los generadores, cuando sobrepasen la velocidad de corte y no permitan un funcionamiento continuo.

¹⁷ Promedio de seis valores correspondientes a 1 hora en intervalos de 10 min.

5.8 Análisis de la densidad del aire

La densidad del aire es una variable importante en el análisis de la potencia generada por el aerogenerador. Para su cálculo se comparó dos modelos propuestos. En el primer caso se utilizó la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} \quad (61)$$

Donde:

P = presión atmosférica [N/m²]

R= constante universal de los gases ideales 287 [N m / Kg K]

T= temperatura [K]

El valor de la densidad del aire se comparó con la fórmula utilizada por el Instituto Alemán de Energía Eólica y por el CREE (Centro Regional de Energía Eólica de la Patagonia Austral) [Oliva, 2011], que permite corregir la densidad real, en base a mediciones realizadas.

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{P_m \cdot T_0}{P_0 \cdot T_m} \right) \quad (62)$$

Donde:

$\rho_0 = 1.225$ [kg/m³]

$T_0 = 288$ [K]

$P_0 = 101.3$ [KPa]

T_m = temperatura medida [K]

P_m = presión medida [KPa]

Las mediciones realizadas por las estaciones meteorológicas en cuestión de presión tienen como salida la presión atmosférica dada en mili bares. Aunque se tiene los registros de mediciones de presión cada 10 minutos, es posible calcular la presión atmosférica en función de la altitud de la zona. Para esto utilizamos la fórmula de Laplace¹⁸ expresada en la siguiente ecuación:

$$P_s(Z) = 101.3 \cdot (1 - (22.5569 \times 10^{-6} \cdot Z))^{5.25611} \quad (63)$$

¹⁸ Fórmula simplificada para la tropósfera y utilizada a una altitud menor de 11000 m.s.n.m.

Donde:

P_B = presión barométrica [KPa]

P_{atm} = presión atmosférica [KPa]

Z = altitud local [m]

5.9 Características del aerogenerador

Para tener un análisis correcto para la instalación de un generador eólico de baja escala, es necesario tomar en cuenta las especificaciones de generadores presentes en el mercado. Lo más importante es conocer su curva de potencia, en la cual se detalla los Watts generados en dependencia de la velocidad a la cual gira el generador, como se muestra en la Figura 28.



Figura 28 Curva de potencia otorgada por el fabricante

FUENTE: Wind Power, Modelo i12 POWER para instalaciones industriales

Para realizar una mejor caracterización es necesario conocer las características del generador, obtenidas directamente del fabricante, tomando en cuenta sus características básicas, detalladas en la Tabla 7.

Tabla 7 Características básicas de generadores eólicos

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Modelo	
Fabricante	
Diámetro rotor	
Dimensiones de la torre	
Potencia Nominal	
Voltaje	
Tipo de conexión	
Velocidad de conexión	
Velocidad de potencia nominal	
Velocidad de corte	

Es posible que la curva característica de potencia establecida por el fabricante y obtenido por sucesivas pruebas esté en forma gráfica o en forma de tabla o en el peor de los casos ninguna de las dos. Para el último caso es necesario extrapolar valores para construir una gráfica a partir de los valores de velocidad de conexión, velocidad de potencia nominal y velocidad de corte. Para la extrapolación de valores, se asumió una curva potencial de la forma:

$$y = ax^b \quad (64)$$

A partir de una regresión lineal, es posible conocer los valores de las constantes a y b, y construir la gráfica velocidad vs potencia. Para el análisis se tomó en cuenta 3 tipos de generadores, contruidos por el fabricante INNOVA Wind Power. Todos ellos micro generadores utilizados con fines domésticos. Se tomó en cuenta un modelo pequeño, mediano y grande, para evaluar su comportamiento desde un punto de vista técnico y económico, tomando en cuenta que al incrementar el tamaño incrementa el costo, pero la energía disponible es mayor. En la Tabla 8, 9 y 10 se detallan las características técnicas de los generadores, acompañadas de sus curvas características de potencia detalladas en las Figuras 29, 30 y 31.

Tabla 8 Especificaciones del fabricante Modelo: i1POWER

Modelo	i1POWER	
Fabricante	INNOVA Wind Power	
Díámetro rotor	3.12	m
Dimensiones de la torre	18	m
Potencia Nominal	1.4	Kw
Voltaje	12,24,48	v
Tipo de conexión	Carga de baterías	
Velocidad de conexión	3	m/s
Velocidad de potencia nominal	16	m/s
Velocidad de corte	25	m/s

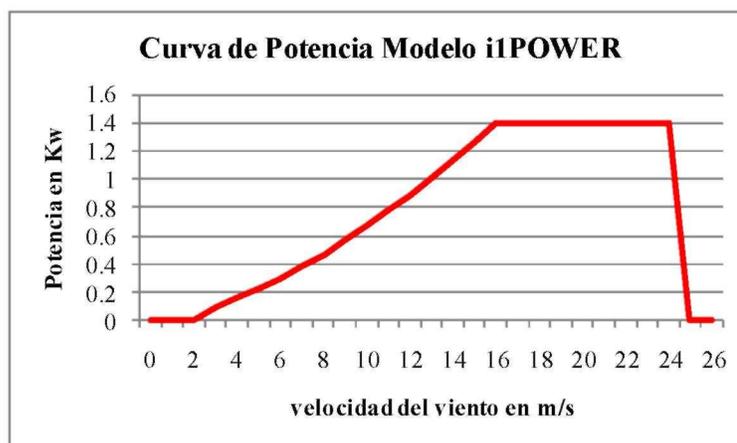


Figura 29 Curva característica de Potencia para el Modelo i1POWER

Tabla 9 Especificaciones del fabricante Modelo: i5POWER

Modelo	i5POWER	
Fabricante	INNOVA Wind Power	
Diámetro rotor	5	m
Dimensiones de la torre	18	m
Potencia Nominal	5	Kw
Voltaje	12,24,48	v
Tipo de conexión	Carga de baterías	
Velocidad de conexión	2.5	m/s
Velocidad de potencia nominal	17	m/s
Velocidad de corte	25	m/s

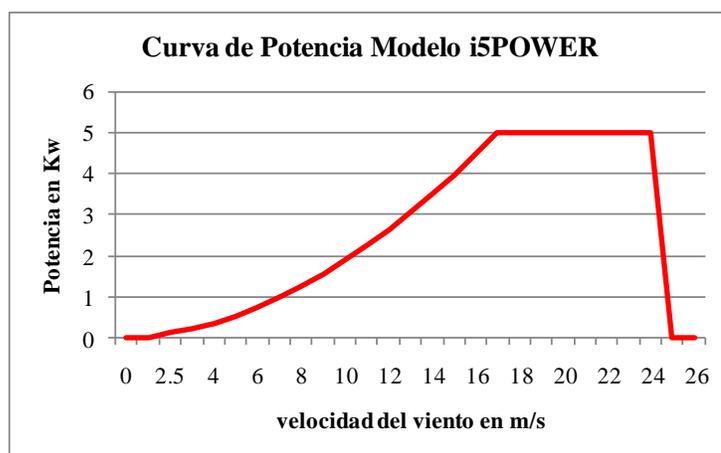


Figura 30 Curva característica de potencia para el Modelo i5POWER

Tabla 10 Especificaciones del fabricante Modelo: i10POWER

Modelo	i10POWER	
Fabricante	INNOVA Wind Power	
Diámetro rotor	7	m
Dimensiones de la torre	24	m
Potencia Nominal	10	Kw
Voltaje	12,24,48	v
Tipo de conexión	Carga de baterías	
Velocidad de conexión	3	m/s
Velocidad de potencia nominal	13	m/s
Velocidad de corte	25	m/s

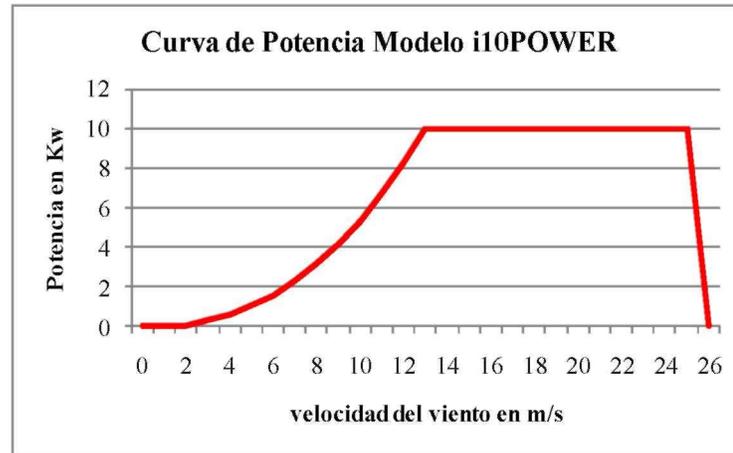


Figura 31 Curva característica de potencia para el Modelo i10POWER

5.10 Ajuste de potencia

Se debe realizar el ajuste a la densidad del aire, en dependencia de las condiciones bajo las cuales se elaboró las diferentes curvas características de potencia. Para este caso el valor presentado en las especificaciones es de 1.225 kg/m^3 . Puesto que el análisis se realiza a otra altitud y bajo diferentes condiciones climáticas, se debe ajustar la potencia obtenida, para ello se utiliza la siguiente fórmula [Oliva, 2011]:

$$P_{corr} = P_m \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho_m} \right) \quad (65)$$

Donde:

P_m = potencia medida [Kw]

P_{corr} = potencia corregida [Kw]

ρ_m = densidad medida [Kg/m^3]

$\rho_0 = 1.225$ [Kg/m^3]

5.11 Análisis de densidad de potencia, distribución de probabilidad de la energía

Conociendo la curva de potencia características de los generadores, se encontró las curvas de densidad de potencia y la distribución de energía, tomando en cuenta la distribución probabilística del viento obtenida en el análisis previo con respecto a las condiciones de viento presentes en el lugar de la instalación.

Se calculó la probabilidad para cada intervalo de clase. La probabilidad de obtener una velocidad v , está definida por la siguiente ecuación:

$$p(v) = \int_{\liminf}^{\limsup} f(v)dv \quad (66)$$

Integrando la ecuación (66) tomando en cuenta la expresión de $f(v)$ de la ecuación (1), se obtiene:

$$p(v) = \left| \int_{\liminf}^{\limsup} \right| \quad (67)$$

El límite superior e inferior son los correspondientes a cada intervalo de clase en el histograma de frecuencia.

Para calcular la curva de densidad de potencia, se utilizó la curva característica de potencia para cada generador y se dividió el valor de potencia correspondiente a cada velocidad entre el área del generador. El resultado debe ser multiplicado por la probabilidad correspondiente a cada velocidad.

$$\text{Densidad de potencia útil} = \sum_i^n \frac{P_i}{A} \cdot p_i(v) \quad (68)$$

A partir de las probabilidades de cada velocidad dado por cada intervalo de clase y un total de 8760 horas en el año, se calculó el número de horas que el generador estaría en funcionamiento a diferentes velocidades, incluyendo aquellas en las que el generador está frenado (condiciones de viento muy bajas o superiores a la velocidad de corte).

$$p_i(v) \cdot 8760 = h_i \quad (69)$$

Conociendo la curva característica de potencia, se calcula la potencia otorgada correspondiente a cada velocidad (marca de clase¹⁹). Conociendo el valor de h_i , se calcula la energía haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$EAO = \sum_i^n P_i \cdot h_i \quad (70)$$

Donde:

EAO = energía anual de salida [Kw-Hr]

P_i = potencia para cada marca de clase [Watts]

h_i = tiempo de operación para cada marca de clase [hr]

¹⁹ Promedio del límite inferior y superior de cada intervalo de clase

La suma total de energías determina la AEO (*Annual Energy Output*). Los análisis se extienden para el período de un año y para 2 períodos semestrales, el primero que abarca los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo, abril; el segundo que abarca los meses de mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre. La división corresponde a períodos de mayor y menor intensidad de viento.

El análisis se realizó para los datos obtenidos a una altura de 10 m. A partir de los resultados es posible conocer el comportamiento de la potencia y energía a una altura diferente haciendo una extrapolación vertical, ajustando el valor a una altura de 18 y 24 m.

5.12 Simulación de datos a partir de la distribución de probabilidad obtenida

Se replicó el modelo obtenido en los pasos anteriores por medio de una simulación de velocidades del viento. A este modelo se denominó “modelo sintético”. Para tener mejor certeza de los resultados se realizaron dos simulaciones. La primera para un periodo anual y la segunda para dos períodos semestrales. Los resultados se compararon con los obtenidos en el análisis previo con datos medidos, para verificar la diferencia existente entre ambos métodos. A partir de él se determinó la validez del modelo.

Una vez validado el modelo, se procedió a realizar simulaciones de distribuciones del viento, manteniendo fijo el parámetro k obtenido en las mediciones reales y variando el parámetro c , tomando en cuenta velocidades medias de 6, 8 y 10 m/s. A partir de la distribución de frecuencia de cada curva, se procedió a encontrar la densidad de potencia y distribución de la energía, tomando en cuenta los pasos detallados en el punto 5.9.

5.12.1 Modelo Sintético

Para replicar los resultados, a partir de los datos medidos es necesario realizar una simulación. A este tipo de simulaciones se las conoce como “simulación Montecarlo”. Esta técnica implica la utilización de una gran masa de datos generados estadísticamente con distribuciones de probabilidad adecuados a las variables que se quieran representar [Escudero, 2008]. Para esto se necesitan conocer los parámetros k y c y utilizar un generador de números aleatorio (R_i) que permita obtener curvas de distribución Weibull, a partir de las cuales se proyecta la potencia y energía. Para obtener velocidades del viento aleatorias, se utiliza el siguiente modelo de simulación que parte de la función acumulada $F(v)$ igualada a la raíz de números aleatorios:

$$1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} = R_i$$

$$\left(\frac{v}{c}\right)^k = -\ln(1 - R_i)$$

$$\ln(x) = \frac{\ln(-\ln(1-R_i))}{k} + \ln(c)$$

$$v = c \cdot e^{\frac{\ln(-\ln(1-R_i))}{k}} \quad (71)$$

Donde:

R_i = raíz de números aleatorios²⁰

v = velocidad del viento aleatoria [m/s]

La ecuación (71) es el generador de números aleatorios para los parámetros k y c , establecidos anteriormente. Los resultados se compararon con los resultados obtenidos por medio de los análisis de los datos reales, tanto de manera anual como semestral.

5.12 Cálculo de factor de carga

Para calcular el factor de carga se utilizó los resultados de energía obtenidos en el modelo sintético, para diferentes velocidades, diferentes alturas y para un período de 1 año. Se partió del valor de potencia nominal para cada generador multiplicado por 8760 horas de operación, obteniendo un valor de energía máximo. Los valores de energía anual obtenidos en el análisis previo se dividen para los valores de energía que otorgaría cada generador a su potencia máxima.

5.13 Características de las necesidades

Puesto que las necesidades están enfocadas particularmente para uso doméstico (aunque el estudio no es restrictivo para otras actividades) se debe conocer las necesidades promedio de una casa en Baja California, además de los costos de energía eléctrica convencional. Según información proveniente de la CFE y datos estadísticos de los últimos 5 años (ver Anexo D). Se tiene un costo de electricidad para uso doméstico de 1.0998 \$/Kw-hr y un consumo per cápita de 265 Kw-hr por usuario al año. Tomando en cuenta que en promedio existe 5 personas por familia (según información del INEGI para el año 2000), una casa promedio en el estado de Baja California consumiría 1325 Kw-hr al año. En base a estos datos se proyectó las necesidades energéticas de una familia. A partir de las necesidades energéticas y la disponibilidad de energía otorgada por el generador, se realizó el estudio económico tomando en cuenta las inversiones,

²⁰ Valores aleatorios con distribución uniforme de 0 a 1

ahorros y costos asociados a implementar un sistema de energía eólica acompañado de paneles solares.

Para el análisis se tomó en cuenta las necesidades de una familia promedio en el Estado de Baja California. Sin embargo, el análisis consideró información para diferentes sectores, entre ellos: doméstico, comercial, servicios, agrícola, mediana industria y gran industria, y sus precios correspondientes por consumo eléctrico, los cuales se detallan en el Anexo D.

5.14 Número de generadores y el número de paneles solares

Para determinar el número de paneles solares, primero se determinó el número de generadores necesarios para cubrir los requerimientos energéticos de cierto número de familias involucradas en el proyecto. Inicialmente se tomó en cuenta las alturas correspondientes para cada modelo, la energía anual de salida y la velocidad promedio del lugar. Dado que la energía de salida varía en dependencia de la velocidad promedio y la altura de los generadores, se utilizó la información proveniente de la simulación para obtener la energía anual bajo diferentes condiciones de viento. A partir del número de familias y su requerimiento energético, y la utilización de cierto modelo de generador a cierta altura y a cierta velocidad, se realizó el cálculo del número de generadores necesarios para cubrir la energía requerida. Dado que la compra de un generador adicional podría sobrepasar las necesidades, se determinó el déficit de energía para ser complementado con paneles solares, tomando en cuenta el análisis del potencial solar de la zona realizado previamente. De igual manera que los generadores eólicos, se estableció un modelo de panel solar con sus características técnicas y físicas, detallados en la Tabla 11.

Tabla 11 Especificaciones técnicas para paneles solares

Especificaciones Técnicas		
Modelo	PFV8012	
Máxima Potencia	80	Watts
Voltaje Nominal	12	Vcd
Voltaje Máximo	14.4	Vcd
Corriente máximo	6.6	Amp
Voltaje de Cto. Abierto	21	Vcd
Corriente de corto circuito	33.4	Amp
Eficiencia	10.20	%
Dimensiones	102.5 x 97 x 5	Cm
Peso	10.5	Kg

A partir de las especificaciones técnicas, y conociendo la necesidad energética deficitaria, se procedió a calcular el número de paneles solares a partir de la siguiente fórmula.

$$M = \frac{E_c \cdot F_s}{I_m \cdot V_m \cdot H_p \cdot \eta_{bat} \cdot \eta_{inv}} \quad (72)$$

Donde:

M = número de paneles solares

E_c = energía requerida [Kw-hr]

F_s = fracción de sobredimensionamiento [---]

I_m = corriente eléctrica [amp]

V_m = voltaje [v]

H_p = horas de máxima insolación [hr]

η_{bat} = rendimiento de la batería [---]

η_{inv} = rendimiento del inversor [---]

5.15 Análisis económico-financiero

Para realizar el análisis económico, se partió del análisis técnico realizado en los pasos anteriores y de las necesidades energéticas de una familia promedio en el Estado de Baja California (4 integrantes por familia ²¹). Se consideró en la inversión inicial del sistema la adquisición del generador, paneles solares y los componentes (baterías, torre, reguladores y convertidores). Esta información se obtuvo directamente con el proveedor (véase Anexo E).

La inversión inicial consideró:

- Costo de instalación cerca de 10% adicional a la inversión adicional. ²²
- Costo del sistema eólico
- Costo de los paneles solares (USD 500 por unidad)

También se consideró la absorción de un porcentaje de la inversión, cercana a 50%, por parte del Gobierno, reduciendo aún más los costos para las personas involucradas en el proyecto (familia o conjunto de familias).

En los flujos de efectivo se consideró un horizonte de planeación de 20 años (tiempo de vida útil). Se tomó en cuenta:

- Ahorros por el no consumo de energía eléctrica proveniente de la red. El precio se tomó de información estadística proveniente de la CFE al 2009.
- Mantenimiento del equipo, equivalente a 1.5% de la inversión inicial. Este costo es anual. ²³

²¹ <http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx> Promedio por familia = 3.9 integrantes

²² Manual práctico de evaluación de una instalación de energía eólica a pequeña escala

²³ Asociación Danesa de la Industria Eólica

- Venta de energía eléctrica por excedente. Se tomó como patrón el precio establecido por Kw-hr utilizado.
- Venta de bonos de carbono, tomando en cuenta un valor de 5 USD/ton CO₂.²⁴

Se utilizó una tasa de interés de 10% y una inflación de 5% cada año. Los tipos de cambio son los vigentes a la fecha de análisis.²⁵ Los indicadores utilizados para la factibilidad del proyecto fueron el VPN (Valor Presente Neto) y la TIR (Tasa Interna de Retorno).

Como entradas del sistema se tomó en consideración variables fijas y variables. El precio a 2009 está determinado por el sector, en este caso el sector doméstico. El número de familias es una variable de entrada móvil, a partir del cual se estima el requerimiento energético. La energía entregada debe cubrir la necesidad combinando el sistema eólico y el sistema solar. La Tabla 12 muestra la interacción entre estas variables.

Tabla 12 Plantilla de variables para el análisis costo beneficio

Sector	Doméstico	
Precio al 2009	1.0998	\$/Kwhr
Consumo por persona	265	Kw-hr/persona-año
Número de familias	9	familia
Número de integrantes	4	persona
Consumo por familia	1060	kw-hr/familia-año
ENERGÍA REQUERIDA	9540	kw-hr/familia-año
Número de generadores	1	generadores
Paneles solares	0	paneles
Energía Entregada por generador	44672.11	kw-hr /año
Energía entregada sistema eólico	44672.11	kw-hr /año
Energía entregada sistema solar	0	kw-hr /año

A partir de los datos reales tanto de precio como de velocidad del viento, se realizó un análisis de sensibilidad que permitiera conocer los puntos críticos para los cuales el proyecto es factible. Se tomó en cuenta una variación en la velocidad media del viento de 6, 8 y 10 m/s ²⁶ y una variación en el precio de venta de electricidad de 2, 3, 4 y 5 \$/ Kw-hr.

²⁴ Precio fijado por el Banco Mundial en el 2005. Este precio es sujeto a cambios y en muchos casos se considera una variable arbitraria, entre parámetros establecidos.

²⁵ 1 Euro = \$ 16.86 1Euro = 1.4105 USD

²⁶ La energía de salida utilizada para el análisis de costo beneficio, es ajustada a diferentes alturas según el modelo, tomando como base velocidades a 10 m. de altura.

5.16 Desarrollo de la plataforma tecnológica

La plataforma tecnológica se realizó a partir de los cálculos realizados en la zona de La Rumorosa y siguiendo todos los pasos establecidos en la metodología. La plataforma permite introducir datos tales como: ubicación, alturas, velocidades medias, generadores, paneles solares, tasas de interés, inflación, precios de electricidad, número de familias, sector al que pertenece, etc. Todas ellas se consideran variables independientes y que pueden ser actualizadas constantemente por el usuario. La entrada de datos se introduce en los espacios con fondo rojo. Las salidas del sistema, producto del cálculo interno se presenta en fondo azul. La plataforma se dividió en 5 apartados para su fácil comprensión:

1. Evaluación climática
2. Distribución del viento y Rosa de los vientos
3. Selección de generadores y paneles solares
4. Potencial eólico de la zona
5. Evaluación económica

La plataforma cuenta con tres bases de datos:

- Datos de de estaciones meteorológicas medidas cada 10 min. que incluyen las variables climáticas detalladas en la Tabla 5, haciendo énfasis en velocidad del viento, dirección del viento y radiación solar.
- Generadores eólicos y sus curvas de potencia, además del costo asociado a su instalación.
- Paneles solares, especificaciones técnicas y su costo.

Esta base de datos se actualiza cada vez que se tengan datos recientes de mediciones realizadas en más emplazamientos y que contengan una cantidad de datos suficiente para incluirlos en el análisis. Estos datos deben pasar por un análisis estadístico preliminar en los cuales se descarte datos erróneos, mediciones nulas o valores de cero inusuales. De igual manera para los generadores y paneles solares, la base de datos se amplía o reduce, tomando en cuenta la presencia o ausencia de cierto modelo en el mercado nacional.

Capítulo 6. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos se presentan en forma de tablas y gráficos, en los cuales se detalla el comportamiento de las variables dependientes (variables climáticas) e independientes (densidad de potencia, energía anual), a lo largo de periodos largos (anual y mensual) y periodos cortos (hora y día). Los resultados obtenidos revelan el potencial eólico de la zona, y las consideraciones necesarias para tomar decisiones con respecto a la instalación de generadores eólicos o sistemas híbridos, en función a su factibilidad técnica y económica, en la cual se proyectan los resultados para un período de 20 años, tomando en cuenta inversiones iniciales y costos de instalación y mantenimiento a lo largo del período estudiado.

6.1 Caracterización de la zona de estudio

Para comprender mejor el lugar de análisis es necesario realizar un análisis de las principales variables atmosféricas disponibles, teniendo un cuidado especial en la densidad del aire, que incide directamente en el cálculo de potencia y energía. Los resultados de las principales variables se muestran en la Figura 32 y 33.

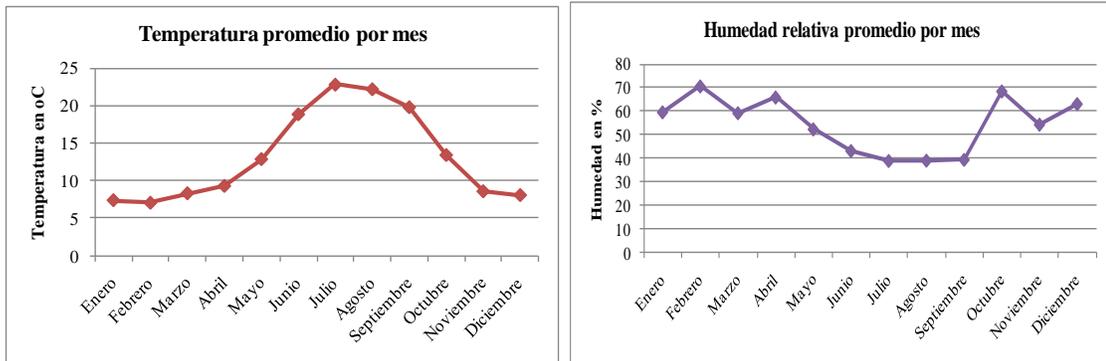


Figura 32 Temperatura y humedad relativa promedio por mes

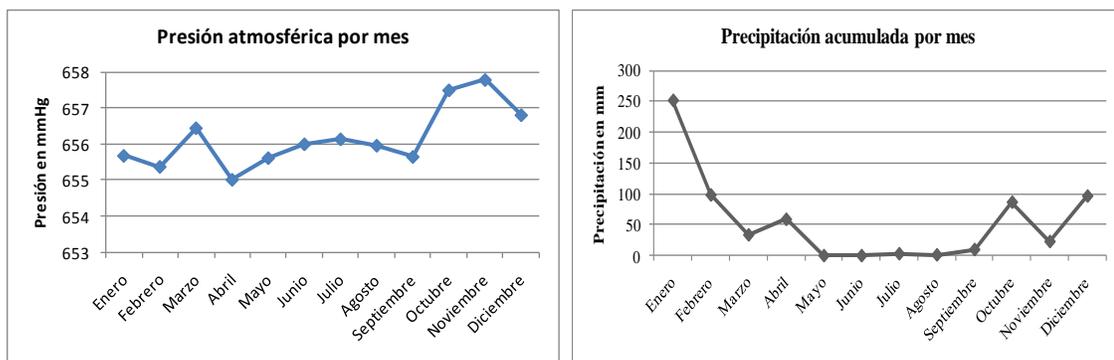


Figura 33 Presión atmosférica promedio y precipitación acumulada por mes

6.2 Determinación de la densidad del aire en la zona

Para la determinación de la densidad del aire, se debe convertir mba en mmHg, tomando en consideración el factor de conversión correspondiente²⁷. También es factible utilizar la ecuación (64) teniendo como entrada la altura del lugar (1262 m.s.n.m). Los resultados de la densidad promedio por mes, se presentan en la Figura 34.



Figura 34 Densidad del aire en La Rumorosa 2010

6.3 Análisis del viento en la zona de estudio

Los datos obtenidos directamente del SMN fueron analizados estadísticamente, para obtener la distribución Weibull y la Rosa de los Vientos tanto anual como mensualmente. El comportamiento de los datos se muestra en la Figura 35 y el resumen de resultados en la Tabla 13.

6.3.1 Resultados anuales

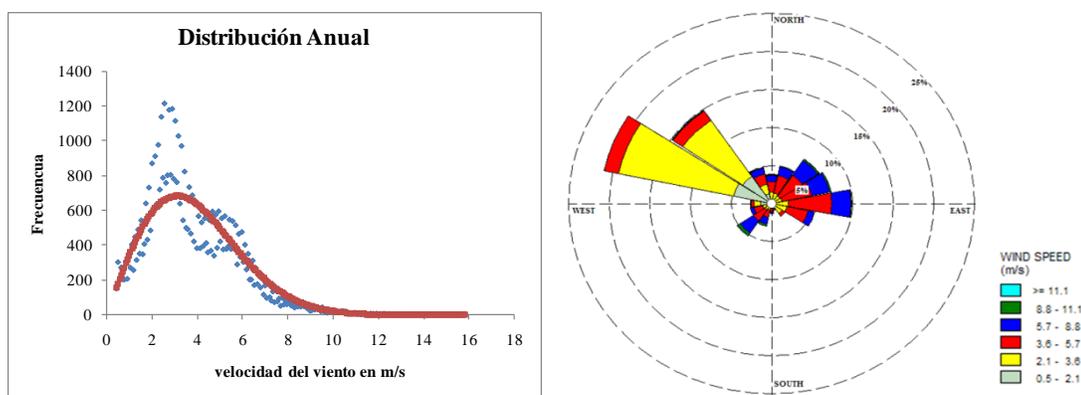


Figura 35 Distribución de probabilidad Weibull (izq.) y Rosa de los Vientos (der.) para el período Enero-Diciembre 2010

²⁷ 1[mb]=0.75[mmHg] 760[mmHg]=1 atm 1[atm]=101.3[Kpa]

Tabla 13 Resultados estadísticos anuales

Distribución de Probabilidad		Rosa de los vientos	
Datos	51243	Datos Totales	52560
Valor máximo [m/s]	15.86	Promedio de velocidad [m/s]	3.65
Valor mínimo [m/s]	0.39	En calma ($v < 1$)	1222
Constante c [m/s]	4.398	Frecuencia de vientos en calma	2.34%
Constante k	1.99	Disponibilidad de datos	99.53%
Desviación	3.10	Datos incompletos	245
R^2 (ajuste lineal)	0.9920	Datos totales usados	52315

Los resultados muestran que el comportamiento del viento tiene un valor esperado de 4.398 m/s y dos direcciones predominantes, la primera en dirección NO con velocidades que van de 2.1 a 5.7 m/s y el segundo en dirección E y NE con velocidades superiores a 5.7 m/s, sin embargo su frecuencia es menor.

6.3.2 Resultado semestrales

Los resultados semestrales indican el comportamiento del viento en dos períodos representativos de las condiciones de viento presente en la zona. La distribución de probabilidad y rosa de los vientos, se realizó en dos etapas: verano-otoño y primavera-invierno. En la Figura 36 y 37 se muestran la distribución de probabilidad y rosa de los vientos. El detalle de los resultados se presenta en las Tablas 14 y 15.

6.3.2.1 Resultados para el semestre verano-otoño

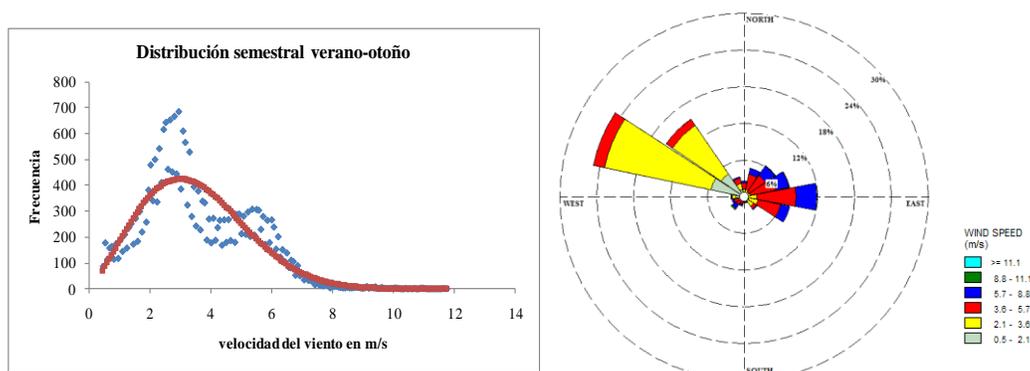


Figura 36 Distribución de probabilidad Weibull (izq.) Rosa de los vientos (der.) para el semestre verano-otoño

Tabla 14 Resultados semestrales Verano Otoño

Distribución de probabilidad		Rosa de los Vientos	
Datos	25840	Datos Totales	26496
Valor máximo [m/s]	11.77	Promedio de velocidad [m/s]	3.4
Valor mínimo [m/s]	0.39	En calma ($v < 1$)	729
Constante C [m/s]	3.95	Frecuencia de vientos en calma	2.75%
Constante k	2.19	Disponibilidad de datos	99.94%
Desviación	2.79	Datos incompletos	15
R^2 (ajuste lineal)	0.9956	Datos totales usados	26481

6.3.2.2 Resultados para el semestre primavera-invierno

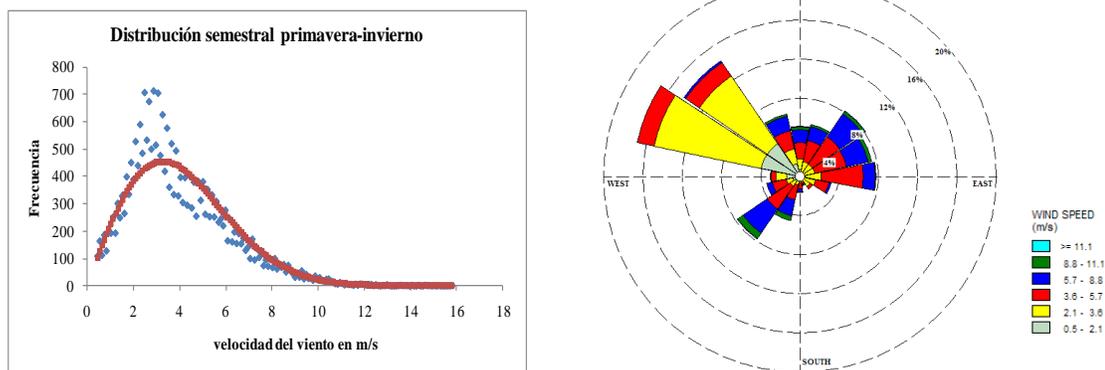


Figura 37 Distribución de probabilidad Weibull (izq.) Rosa de los vientos (der.) para el semestre primavera invierno

Tabla 15 Resultados semestrales Primavera Invierno

Distribución de probabilidad		Rosa de los Vientos	
Datos	25403	Datos Totales	26064
Valor máximo [m/s]	15.86	Promedio de velocidad [m/s]	7.58
Valor mínimo [m/s]	0.39	En calma	493
Constante C [m/s]	4.63	Frecuencia de vientos en calma	1.91%
Constante k	1.98	Disponibilidad de datos	99.11%
Desviación	3.28	Datos incompletos	231
R^2 (ajuste lineal)	0.9943	Datos totales usados	25833

6.4 Potencial eólico y solar de la zona mensual

El potencial eólico de la zona está definido por la velocidad obtenida a través del proceso estadístico. Los resultados del análisis mensual se presentan en la Tabla 15. Se incluye el análisis de radiación solar para contrastar la presencia de ambos recursos a lo largo de un año.

En la Tabla 16 se aprecia que existe dos momentos determinantes en el análisis mensual. El primero dado por los meses de enero, febrero, marzo abril, mayo, noviembre y diciembre con velocidades por encima de los 4 m/s y el segundo dado por los meses de junio, julio, agosto y septiembre donde los vientos son más escasos con valores menores a 4 m/s.

Tabla 16 Resumen de resultados por mes

	Máx [m/s]	Mín [m/s]	C [m/s]	k [---]	σ	Dirección Predominante	Radiación Solar [W/m ²]
Enero	15.9	0.34	4.36	1.67	3.1	NO - NE	314.88
Febrero	10.71	0.34	4.18	2.14	2.96	NO - NE	385.52
Marzo	15.29	0.34	4.74	1.96	3.35	NO - NE	485.34
Abril	12.93	0.34	4.6	2.01	3.25	NO - NE	521.20
Mayo	11.13	0.34	4.26	2.14	3.01	NO - NE	606.45
Junio	8.96	0.34	3.89	2.48	2.75	NO - NE	609.89
Julio	8.1	0.34	3.73	2.51	2.64	NO - NE	566.38
Agosto	9.74	0.34	3.59	2.24	2.54	NO - NE	537.10
Septiembre	9.38	0.34	3.62	2.31	2.56	NO - NE	533.54
Octubre	11.82	0.34	3.7	1.87	2.62	NO - NE	401.27
Noviembre	11.74	0.34	4.69	2.18	3.32	NO - NE	382.77
Diciembre	12.21	0.34	4.31	2.03	3.05	NO - NE	280.45

6.5 Velocidad promedio en 24 hrs.

La velocidad promedio por hora del día indica que el recurso eólico es abundante durante el día, y no así durante la noche como se muestra en la Figura 38. Es importante tener en cuenta que durante la noche se alcanzan velocidades que generarían poca energía debido a que las velocidades de arranque de generadores comerciales se encuentran por encima de 2.5 m/s.

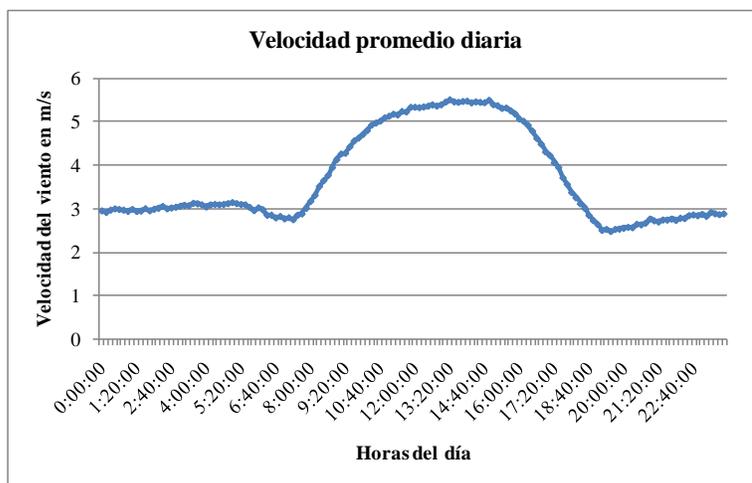


Figura 38 Velocidad media del viento en 24 horas a lo largo de un año

6.6 Comportamiento del viento promedio por hora durante el día a lo largo de un mes

El comportamiento de velocidades promedio por hora, permiten obtener los días en los cuales existen ráfagas de viento fuerte que puedan alterar el desempeño del generador. Los resultados presentan dos tipos de comportamiento. El primero mostrado en la Figura 39 donde se presentan 3 picos claramente definidos y el segundo en la Figura 40 donde se presentan picos constantes a lo largo del mes. Los resultados por mes se presentan en el Anexo B.

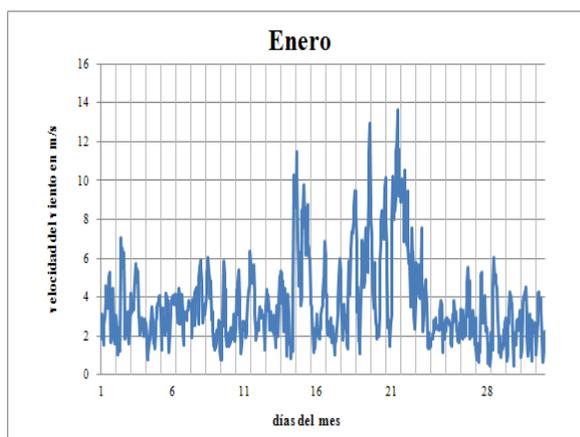


Figura 39 Promedio de velocidades de viento por hora, a lo largo de un día, durante un mes

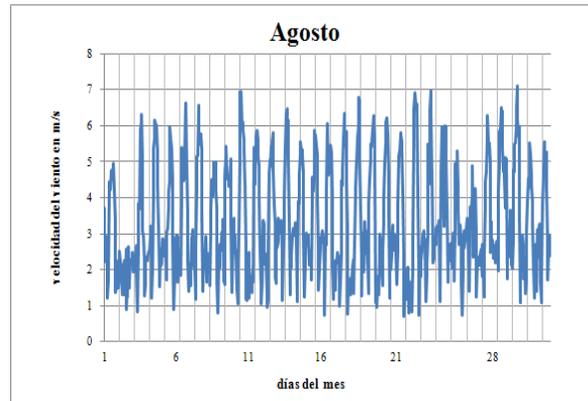


Figura 40 Promedio de velocidades de viento por hora, a lo largo de un día, durante un mes

6.7 Densidad de potencia y energía disponible

Los cálculos realizados inicialmente se realizan a 10 m de altura ya que son los datos de mediciones reales. A partir del análisis estadístico del viento y la probabilidad para cada velocidad se conoce la densidad de potencia y la distribución de la energía para los tres tipos de generadores como se muestra en la Figura 41 y 42 respectivamente.

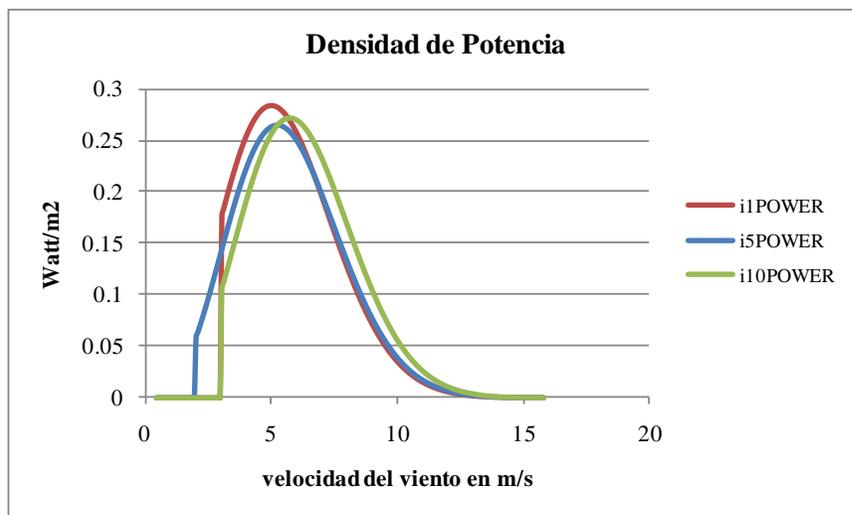


Figura 41 Densidad de potencia para los tres diferentes modelos de generadores

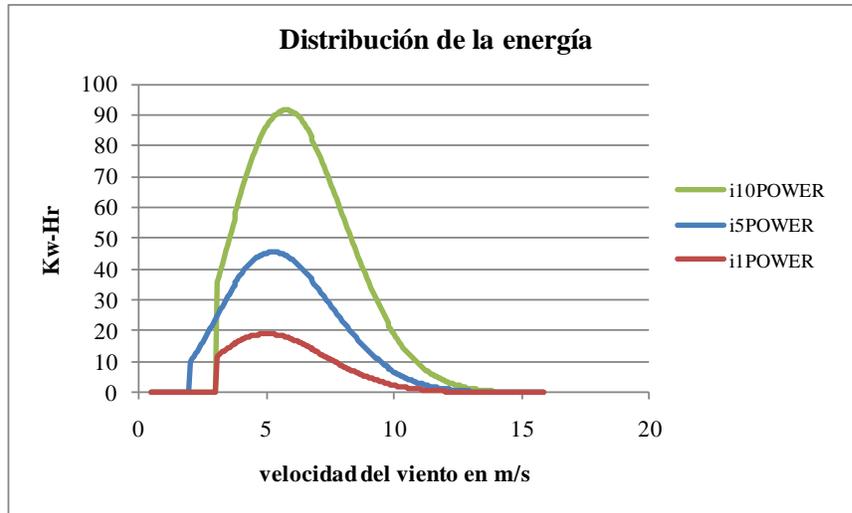


Figura 42 Distribución de energía para los tres diferentes modelos de generadores

El área bajo la curva de cada figura y para cada modelo, representa el valor acumulado, con lo cual se concluye el potencial eólico de la zona, resumido en la Tabla 17.

Tabla 17 Resultados de densidad de potencia y energía para una altura de 10m.

	i1POWER	i5POWER	i10POWER	Unidad
Densidad de Potencia	19.67	20.31	20.20	W/m ²
Energía Anual	1317.23	3492.70	6810.98	Kw-Hr (año)

Puesto que las especificaciones de los aerogeneradores sugieren alturas distintas a 10 m, es posible calcular la densidad de potencia ajustada, aplicando la Ley de Hellman. Haciendo un análisis preliminar de la zona se concluye que la zona forma parte de una “pradera con césped corto” como se muestra en la Figura 43, por lo cual el valor de ajuste necesario es $\alpha = 0.16$ (ver Tabla 3). Los resultados se presentan en la Tabla 18.



Figura 43 Vista área de la zona de estudio

Fuente: Google Earth 2011

Tabla 18 Resultados anuales a diferentes alturas

	Densidad de potencia [W/m^2]			Energía Anual [Kw-hr] anual		
i1POWER	19.67	26.08	29.94	1317.23	1746.59	2005.22
i5POWER	20.31	26.93	30.91	3492.70	4631.18	5316.95
i10POWER	20.20	26.79	30.76	6810.99	9031.11	10368.40
Altura [m]	10	18	24	10	18	24

Los resultados indican que un incremento de altura de 8 m, incrementa la energía anual en 32.59 % y un incremento de altura de 14 m. incrementa la energía anual en 52.23 %.

6.8 Análisis semestral

Puesto que se identifica en el análisis anual, una marcada diferencia entre las velocidades promedio para un año, se realiza el análisis de densidad de potencia y distribución de la energía para períodos semestrales. Los resultados se presentan en la Tabla 19 y Tabla 20.

Tabla 19 Resultados semestrales para primavera-invierno

	Densidad de potencia [W/m^2]			Energía Semestral [Kw-hr]		
i1POWER	21.73	28.81	33.08	721.61	956.83	1098.51
i5POWER	22.41	29.72	34.12	1911.60	2534.71	2910.04
i10POWER	23.20	30.76	35.31	3877.75	5141.74	5903.11
Altura [m]	10	18	24	10	18	24

Tabla 20 Resultados semestrales para verano-otoño

	Densidad de potencia [W/m^2]			Energía Semestral [Kw-hr]		
i1POWER	15.33	20.32	23.33	517.43	686.09	787.68
i5POWER	15.99	21.20	24.34	1386.50	1838.45	2110.67
i10POWER	14.17	18.79	21.58	2408.82	3194.00	3666.96
Altura [m]	10	18	24	10	18	24

6.9 Resultados del modelo sintético

En la Tabla 21 se muestran los resultados de la simulación tomando un horizonte de un año, aplicando el modelo sintético desarrollado. La Tabla 22 y 23, representa los resultados de simulaciones para períodos semestrales. Los resultados reflejan el promedio de 100 iteraciones

realizadas para los tres generadores a una altura de 10 m. A partir de ellos se proyectan los resultados para 18 y 24 m.

Tabla 21 Resultados de la simulación anual para 10, 18 y 24m de altura con respecto al suelo

	Densidad de potencia [W/m^2]			Energía Anual [Kw-hr] anual		
i1POWER	19.65	26.06	29.91	1316.04	1745.01	2003.41
i5POWER	20.28	26.88	30.86	3487.34	4624.08	5308.80
i10POWER	20.19	26.77	30.74	6806.49	9025.14	10361.55
Altura [m]	10	18	24	10	18	24

Tabla 22 Resultados de la simulación para primavera-invierno

	Densidad de potencia [W/m^2]			Energía Semestral [Kw-hr]		
i1POWER	21.87	29.00	33.30	726.46	963.25	1105.89
i5POWER	22.42	29.72	34.12	1911.93	2535.15	2910.54
i10POWER	23.28	30.87	35.44	3891.60	5160.10	5924.19
Altura [m]	10	18	24	10	18	24

Tabla 23 Resultado de la simulación verano-otoño

	Densidad de potencia [W/m^2]			Energía Semestral [Kw-hr]		
i1POWER	15.05	19.96	22.91	508.18	673.82	773.60
i5POWER	16.05	21.28	24.43	1391.26	1844.75	2117.92
i10POWER	14.28	18.94	21.74	2427.54	3218.83	3695.46
Altura [m]	10	18	24	10	18	24

6.10 Resultados de la simulación de datos para diferentes velocidades medias

A partir del modelo sintético se realiza simulaciones que tomen en cuenta valores medios de velocidad por encima del valor medio (variable c) calculado con datos reales. Cada color en la tabla representa el análisis para cada modelo de generador. Los resultados se presentan en la Tabla 24.

Tabla 24 Energía anual de salida, para diferentes velocidades medias

	Velocidad [m/s]	Altura [m]		
		10	18	24
i1POWER Energía anual [Kw-hr]	4.398	1317.23	1746.60	2005.22
	6	2319.56	3075.64	3531.07
	8	3710.94	4920.57	5649.18
	10	5095.19	6756.02	7756.42
i5POWER Energía anual [Kw-hr]	4.398	3492.70	4631.18	5316.95
	6	6252.58	8290.68	9518.32
	8	10539.68	13975.20	16044.59
	10	15181.93	20130.65	23111.52
i10POWER Energía anual [Kw-hr]	4.398	6810.99	9031.11	10368.40
	6	14698.40	19489.51	22375.44
	8	27003.65	35805.80	41107.77
	10	38783.83	51425.85	59040.78

6.11 Factor de carga

Los resultados del cálculo de factor de carga para los 3 modelos de generador a diferentes velocidades y alturas, se detallan en la Tabla 25.

Tabla 25 Factor de carga a diferentes velocidades y alturas para cada generador

	Velocidad [m/s]	Altura [m]		
		10	18	24
i1POWER	4.398	10.74%	14.24%	16.35%
	6	18.91%	25.08%	28.79%
	8	30.26%	40.12%	46.06%
	10	41.55%	55.09%	63.25%
i5POWER	4.398	7.97%	10.57%	12.14%
	6	14.28%	18.93%	21.73%
	8	24.06%	31.91%	36.63%
	10	34.66%	45.96%	52.77%
i10POWER	4.398	7.78%	10.31%	11.84%
	6	16.78%	22.25%	25.54%
	8	30.83%	40.87%	46.93%
	10	44.27%	58.71%	67.40%

6.12 Potencial solar de la zona

El potencial solar de la zona se obtiene a partir de los datos de radiación solar cada 10 min. En la Tabla 26, se resume el potencial solar en términos de energía. Sin embargo su utilización está supeditada a la eficiencia y rendimiento de paneles solares, en instalaciones híbridas, cuando este sea el caso y el recurso sea abundante.

Tabla 26 Energía promedio por m² de la zona

	Radiación Solar [W/m ²]	Horas	Energía [Kw-hr/m ²]
Enero	314.87	320.33	100.86
Febrero	385.51	301.83	116.36
Marzo	485.33	373.67	181.35
Abril	521.19	389	202.74
Mayo	606.44	428.83	260.065
Junio	609.89	427.17	260.52
Julio	566.38	436	246.94
Agosto	537.09	414.33	222.53
Septiembre	533.53	372.17	198.56
Octubre	401.26	355.67	142.71
Noviembre	382.76	318	121.71
Diciembre	280.45	317	88.90
Total general	481.2086514	4454	2143.30

6.13 Resultados del análisis costo beneficio

Para obtener los resultados de costo beneficio primero es necesario contrastar los requerimientos energéticos, con la cantidad de energía otorgada por el sistema. De esta manera se especifica la cantidad de generadores eólicos necesarios para la instalación. Tomando en cuenta el potencial solar de la zona y en función al tipo de paneles solares tomados en consideración para el análisis, se calcula el número de módulos en función al déficit de energía existente. Dado que el cálculo ofrece números reales positivos, se toma en cuenta un redondeo al valor menor, ya que implica una reducción en términos de costo.

A partir de conocer el requerimiento energético se calcula el número de generadores y paneles solares necesarios para cubrir el requerimiento. Los resultados se muestran en la Tabla 27 y 28.

Tabla 27 Número de generadores eólicos según el modelo y la cantidad de familias

Familia ²⁸	Consumo [Kw-hr]	i1POWER (18m)	i5POWER (18m)	i10POWER (24m)
1	1060	1	1	1
2	2120	1	1	1
3	3180	2	1	1
4	4240	2	1	1
5	5300	3	1	1
6	6360	4	1	1
7	7420	5	1	1
8	8480	5	2	1
9	9540	6	2	1
10	10600	7	2	1
11	11660	8	3	1
12	12720	8	3	1
13	13780	9	3	1
14	14840	10	3	1
15	15900	10	4	2
16	16960	11	4	2
17	18020	12	4	2
18	19080	13	4	2
19	20140	13	5	2
20	21200	14	5	2

²⁸ Cantidad de familias involucradas en el proyecto

Tabla 28 Cantidad de paneles solares necesarios para completar el déficit de energía en la instalación para en combinación con cada modelo de generador.

Familia	i1POWER		i5POWER		i10POWER	
	Déficit [Kw-hr]	Paneles Solares	Déficit [Kw-hr]	Paneles Solares	Déficit [Kw-hr]	Paneles Solares
1	387.12	0	2777.12	0	6775.09	0
2	-672.88	3	1717.12	0	5715.09	0
3	-285.76	1	657.12	0	4655.09	0
4	-1345.76	5	-402.88	2	3595.09	0
5	-958.63	3	-1462.88	5	2535.09	0
6	-571.51	2	-2522.88	8	1475.09	0
7	-184.39	1	-3582.88	12	415.09	0
8	-1244.39	4	-805.77	3	-644.91	3
9	-857.27	3	-1865.77	6	-1704.91	6
10	-470.14	2	-2925.77	10	-2764.91	9
11	-83.02	1	-148.65	1	-3824.91	12
12	-1143.02	4	-1208.65	4	-4884.91	16
13	-755.90	3	-2268.65	8	-5944.91	19
14	-368.78	2	-3328.65	11	-7004.91	22
15	-1428.78	5	-551.54	2	-229.82	1
16	-1041.66	4	-1611.54	6	-1289.82	5
17	-654.53	3	-2671.54	9	-2349.82	8
18	-267.41	1	-3731.54	12	-3409.82	11
19	-1327.41	5	-954.42	3	-4469.82	14
20	-940.29	3	-2014.42	7	-5529.82	18

Los resultados del costo beneficio para las condiciones actuales de viento (media de 4.398 m/s), y para un precio fijo 1.099 \$/Kw-hr (para uso doméstico) reflejan que para ningún caso es factible la instalación de sistemas híbridos en la zona. Los resultados muestran la TIR para un número variable de familias y velocidades medias del viento como se observa en la Tabla 29.

Tabla 29 Análisis costo beneficio para un precio de electricidad de 1.0998 \$/Kw-hr para diferentes velocidades medias y número de familias involucradas

MODELO i1POWER					MODELO i5POWER					MODELO i10POWER				
Fam	Velocidad Media [m/s]				Fam	Velocidad Media [m/s]				Fam	Velocidad Media [m/s]			
	4.398	6	8	10		4.398	6	8	10		4.398	6	8	10
1	--	-3.99%	3.65%	8.61%	1	--	-0.63%	7.51%	13.65%	1	--	0.23%	9.77%	16.21%
2	--	-3.82%	3.74%	8.68%	2	--	-0.58%	7.55%	13.67%	2	--	0.25%	9.78%	16.22%
3	4.12%	-3.06%	3.84%	8.75%	3	--	-0.52%	7.58%	13.70%	3	--	0.27%	9.79%	16.23%
4	--	0.72%	3.93%	8.81%	4	--	-0.46%	7.61%	13.73%	4	--	0.29%	9.80%	16.24%
5	--	3.11%	4.75%	8.88%	5	--	-0.40%	7.64%	13.75%	5	--	0.31%	9.82%	16.25%
6	--	-3.06%	6.41%	8.95%	6	--	-0.35%	7.68%	13.78%	6	--	0.33%	9.83%	16.26%
7	--	-0.90%	7.65%	9.57%	7	-3.08%	-0.29%	7.71%	13.81%	7	--	0.35%	9.84%	16.27%
8	--	0.58%	8.32%	10.45%	8	-1.31%	0.12%	7.74%	13.83%	8	--	0.37%	9.85%	16.28%
9	--	-3.06%	9.13%	11.15%	9	--	1.52%	7.78%	13.86%	9	--	0.39%	9.86%	16.29%
10	--	-1.65%	4.75%	11.72%	10	--	2.53%	7.81%	13.88%	10	--	0.42%	9.87%	16.29%
11	--	-0.41%	5.64%	11.87%	11	--	3.50%	7.84%	13.91%	11	--	0.44%	9.89%	16.30%
12	--	-3.13%	6.41%	12.29%	12	--	4.34%	7.87%	13.94%	12	--	0.46%	9.90%	16.31%
13	--	-1.97%	6.90%	9.27%	13	-4.24%	4.93%	7.91%	13.96%	13	--	0.48%	9.91%	16.32%
14	--	-0.98%	4.06%	9.57%	14	--	5.58%	8.47%	13.99%	14	--	0.50%	9.92%	16.33%
15	--	-3.12%	4.75%	10.04%	15	--	6.15%	8.80%	14.01%	15	--	0.52%	9.93%	16.34%
16	--	-2.17%	5.36%	10.45%	16	--	0.05%	9.26%	14.04%	16	-4.98%	0.54%	9.94%	16.35%
17	--	-1.40%	5.79%	10.82%	17	--	0.79%	9.68%	14.06%	17	-4.04%	0.56%	9.96%	16.36%
18	--	-3.11%	6.29%	10.96%	18	--	1.45%	10.05%	14.09%	18	-3.26%	0.58%	9.97%	16.37%
19	--	-2.36%	4.24%	11.27%	19	--	1.98%	10.23%	14.12%	19	-2.52%	0.60%	9.98%	16.38%
20	--	-1.65%	4.75%	9.38%	20	--	2.53%	10.54%	14.27%	20	--	0.62%	9.99%	16.39%

6.14 Plataforma tecnológica

Los resultados anteriormente obtenidos, están condensados de manera puntual en la plataforma tecnológica propuesta en este trabajo y realiza toda la metodología propuesta, sin mostrar los cálculos asociados y permitiendo al usuario definir la factibilidad técnica y económica de la instalación pensada. El ambiente interactivo se presenta con mayor detalle en el Anexo G.

6.15 Metodología propuesta

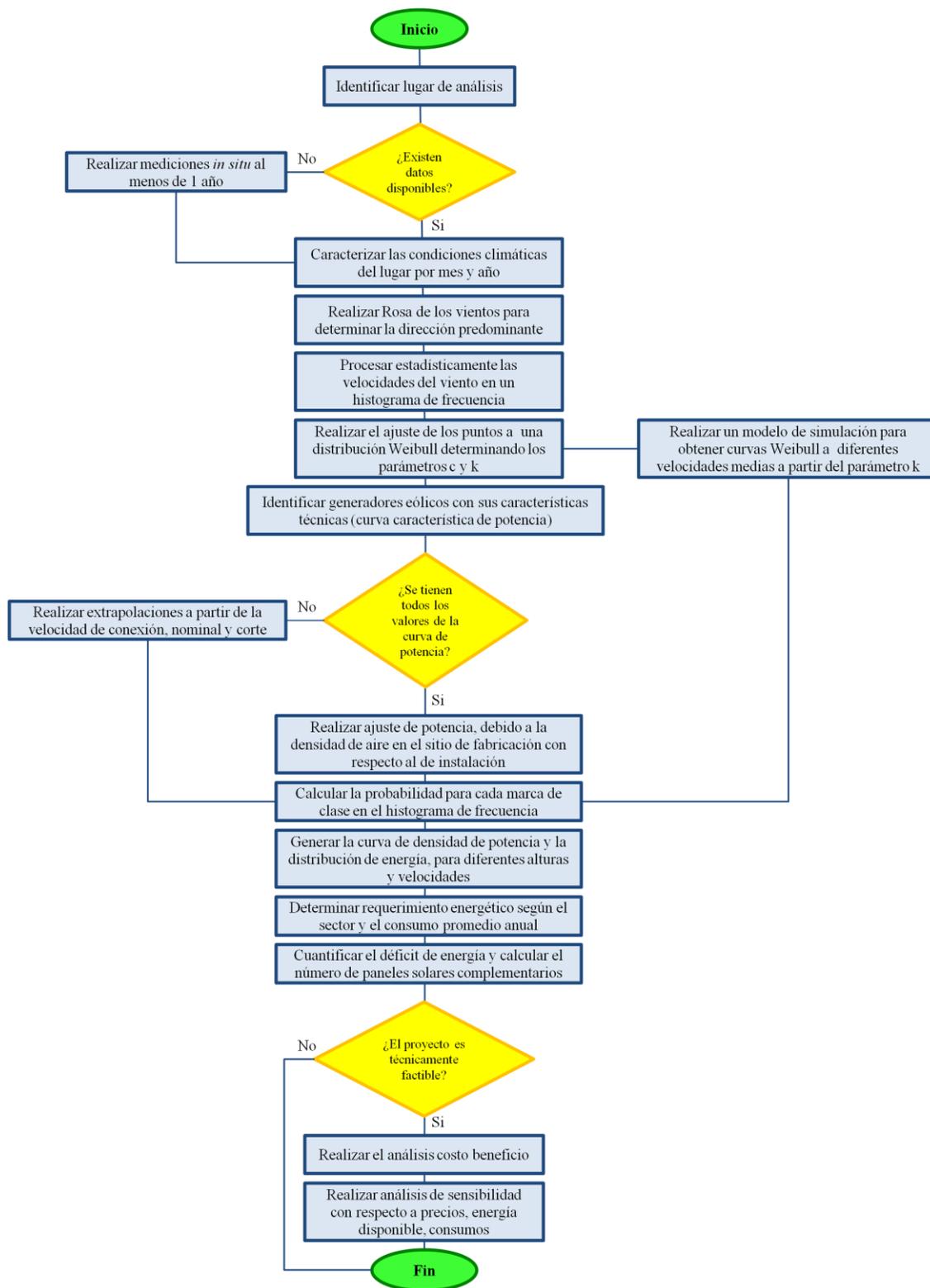


Figura 44 Diagrama de flujo global de la metodología propuesta

Capítulo 7. Análisis y discusión de los resultados

7.1 Análisis estadístico de los datos

El análisis estadístico se realizó con datos de al menos un año, haciendo el tratamiento de los mismos para datos faltantes y erróneos. A partir de ello se realiza el análisis de la distribución y dirección del viento como se realiza en la metodología desarrollada por Govindarajan en el 2009 para el análisis del flujo laminar para la instalación de generadores eólicos a escala doméstica.

Los resultados obtenidos en el procesamiento estadístico se compararon con estudios realizados en la zona en otros años. Para este caso se tomó como referencia los estudios realizados por el Departamento de Energía de la Universidad Autónoma Metropolitana, la cual realizó estudios de potencial eólico con datos provenientes de la misma estación en el 2007. Los resultados se presentan en la Figura 45.

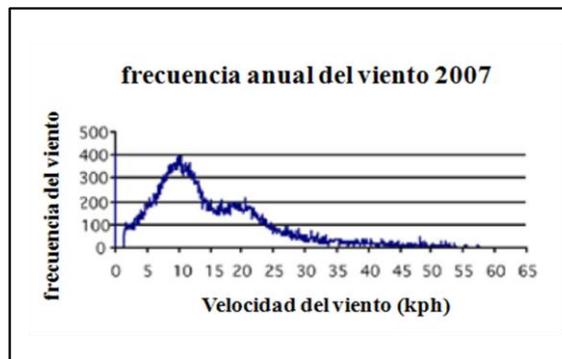


Figura 45 Distribución Weibull de la Rumorosa para el 2007

Fuente: Universidad Autónoma Metropolitana, Suplemento Ambiental 2007

Los resultados presentan un comportamiento bimodal al igual que los resultados obtenidos en el análisis estadístico. Por otro lado, la media de velocidad es a 4.16 m/s (15 Km/hr), teniendo un valor cercano al obtenido que es de 4.39 m/s. Por otra parte se observa que los valores máximos de velocidad está alrededor de 15.27 m/s (55 km/hr) cercano a los valores máximos obtenidos de 15.86 m/s. La obtención de resultados similares en la comparación del 2007 y 2010 confirman el comportamiento del viento en la zona y el potencial eólico.

Sin embargo, el análisis estadístico debe de tomar en cuenta el número de clases que se toman al momento de construir el histograma de frecuencia, ya que el modelo es sensible a variaciones en el número de clases. Para este análisis se tomó el criterio de \sqrt{N} clases. Otros análisis contemplan un número menor de clases, generalmente de 25. La diferencia de los resultados implica una diferencia del cerca de 11%, lo que implica una reducción en la velocidad media del viento, que es compensada por la corrección de potencia, detallada en el siguiente punto.

7.2 Corrección de potencia

La corrección de potencia implica un ajuste en el factor debido a las condiciones en las que se llevan a cabo las mediciones de la curva característica de potencia. Este factor incrementa o decrementa la potencia obtenida, en dependencia de las condiciones climáticas donde se realiza el análisis. Para este caso particular, la información proveniente del fabricante indica que los resultados de la curva característica de potencia se realizaron tomando en cuenta una densidad de aire de 1.225 Kg/m^3 . Puesto que la densidad promedio del lugar es de 1.065 Kg/m^3 y utilizando la ecuación (65) se obtiene un factor de 1.15, lo que implica un incremento en la potencia de cerca el 15%.

7.3 Análisis de factibilidad técnica

Los resultados de factibilidad técnica permiten obtener tanto la densidad de potencia como la distribución de la energía. Es necesario realizar todos los cálculos para la base de 10m. Dentro de los análisis correspondientes se debe tener especial consideración en dos aspectos fundamentales que impactan en el resultado final, el primero el cálculo de la densidad del aire y segundo el ajuste de potencia. Para el primer caso, se realizó el análisis bajo dos sistemas propuestos, el primero bajo el sistema convencional y el segundo el modelo propuesto por el Instituto Alemán de Energía Eólica. No existe diferencia significativa en los resultados obtenidos por lo cual ambos modelos son válidos para fines de cálculo. El ajuste de potencia, es un factor que incide en los cálculos de potencia al realizar la corrección correspondiente por factores de altura. Para tal efecto se tiene un coeficiente de 1.15 lo cual incrementa la potencia, ya que las mediciones de la curva de potencia realizadas por el fabricante se llevan a cabo a nivel del mar y los estudios reales se realizan a una altitud de 1262 m.s.n.m.

Sin embargo dado que las mediciones están tomadas a una altura de 10m, hay que realizar una extrapolación a las diferentes alturas propuestas por cada uno de los tres generadores analizados, en este caso a 18m para el modelo i1POWER y i5POWER y 24 m. para el modelo i10POWER. Para el caso del análisis del perfil del viento, se tomó en cuenta la expresión de Hellman para extrapolar los resultados a diferentes alturas, según las investigaciones esta ley es válida de 10 hasta 100-150 m de altura con respecto al piso y donde no haya obstáculos de picos agudos en el terreno [Bañuelos, 2009]. Aunque un análisis más exhaustivo implica realizar mediciones a las alturas correspondientes y tomar en consideración que el exponente α no solamente varía con la altura, sino también con la hora del día, época del año, naturaleza del terreno, temperatura [Rehman, 2007].

Por otro lado es importante hacer uso del modelo sintético, para conocer la densidad de potencia y distribución de energía, pero para diferentes velocidades medias, manteniendo constante el valor de k obtenido en el análisis de datos reales.

7.4 Validación de modelo sintético con base a datos reales

Para validar los resultados de las simulaciones, es necesario establecer un valor de máxima diferencia, en términos de porcentajes. La máxima diferencia significativa registrada en los cálculos es de 1.81%, con respecto al valor real, lo que significa que hay que considerar un factor de 2% en caso de querer utilizar el modelo sintético propuesto y que los resultados no se vean alterados significativamente. Las diferencias en el cálculo de densidad y energía, anuales y semestrales, se detallan en la Tabla 30, 31 y 32, respectivamente.

Tabla 30 Diferencia de resultados reales y resultados del modelo sintético ANUAL

	Densidad de potencia			Energía Anual		
i1POWER	0.10%	0.08%	0.10%	0.09%	0.09%	0.09%
i5POWER	0.15%	0.19%	0.16%	0.15%	0.15%	0.15%
i10POWER	0.05%	0.07%	0.07%	0.07%	0.07%	0.07%

Tabla 31 Diferencia de resultados reales y resultados del modelo sintético SEMESTRAL Primavera-Invierno

	Densidad de potencia			Energía Anual		
i1POWER	0.64%	0.66%	0.67%	0.67%	0.67%	0.67%
i5POWER	0.04%	0.00%	0.00%	0.02%	0.02%	0.02%
i10POWER	0.34%	0.36%	0.37%	0.36%	0.36%	0.36%

Tabla 32 Diferencia de resultados reales y resultados del modelo sintético SEMESTRAL Verano-Otoño

	Densidad de potencia			Energía Anual		
i1POWER	1.81%	1.78%	1.79%	1.79%	1.79%	1.79%
i5POWER	0.35%	0.36%	0.35%	0.34%	0.34%	0.34%
i10POWER	0.80%	0.80%	0.76%	0.78%	0.78%	0.78%

7.5 Análisis de factor de carga

Los resultados muestran que el factor de carga se incrementa cuando se aumenta la altura del generador, debido a un incremento en la velocidad del viento, sin embargo el factor de carga se reduce a medida que incrementa el tamaño del generador, debido a que mientras más grande sea el generador, se necesita mayor cantidad de recurso eólico para que el rendimiento sea óptimo. Para el emplazamiento, el mayor factor de carga se consigue cuando se evalúa el modelo i10POWER a una altura de 24m, consiguiendo un factor de carga igual a 16.35%. El máximo valor registrado en la simulación, otorga un valor máximo de 67.50 % para el modelo i10POWER a una altura de 24m, para 10 m/s, lo cual sugiere condiciones de viento favorables para el funcionamiento del generador. De acuerdo a la Asociación Danesa de la Industria Eólica “los factores de carga pueden variar en teoría del 0 al 100, aunque en la práctica el rango de

variación va del 20 al 70 por ciento, y sobretodo alrededor del 20 al 30 por ciento". Para el estudio del emplazamiento y para datos reales, los factores de carga se encuentran por debajo de 20, lo cual sugiere condiciones de viento desfavorables. Incrementado la velocidad media, los valores se encuentran en el rango establecido.

7.6 Análisis de resultados costo beneficio

Los resultados muestran que no es factible la instalación de sistemas híbridos en la zona de estudio, dado por dos factores determinantes, el primero directamente relacionado con el precio de la energía eléctrica y segundo por la cantidad alta en inversión inicial que se necesita. A partir del conocimiento de la no factibilidad del proyecto, es importante conocer las condiciones en las que el proyecto podría resultar factible, por lo que se realizó un análisis de sensibilidad que tomara en cuenta una variación en el precio de la electricidad y la variación de la velocidad media.

Manteniendo el precio de energía eléctrica en 1.0998\$/kw-hr, se encuentra que el proyecto es factible a partir de los 10m/s de velocidad media para un rango de familias del 1 al 20 tanto para el modelo 15POWER como para el i10POWER. EL modelo i1POWER presenta factibilidad económica para 10m/s siempre y cuando se supere el número de 7 familias.

A partir de este análisis se tomó en cuenta 5 precios de electricidad, desde el inicial hasta alcanzar el valor de 5 \$/Kw-hr, (incremento unitario). Los resultados revelan que a medida que incrementa el precio de venta de electricidad, la factibilidad del proyecto se incrementa para las diferentes combinaciones de familias y de velocidades media. Cabe resaltar que para que el proyecto empiece a ser factible a velocidades medias de 4.398m/s, el precio de la electricidad debería alcanzar un valor de 3 \$/Kw-hr siendo factible para los modelos i5POWER y i10POWER. El modelo i1POWER empieza a ser factible siempre y cuando el precio alcance los 4 \$/Kw-hr. Todas las combinaciones son factibles cuando el precio alcanza los 5 \$/Kw-hr. Los resultados del análisis se presentan con mayor detalle en el Anexo E.

Por otra parte, en aquellos proyectos en los que la factibilidad del resultado es favorable, la inversión por familia es muy accesible. Por ejemplo en el caso de una velocidad de 10m/s para el modelo 1iPOWER a 18m de altura y un consumo de 9 familias a un precio de 1.0998 \$/Kw-hr, se tiene el siguiente flujo de efectivo mostrado en la Figura 46.

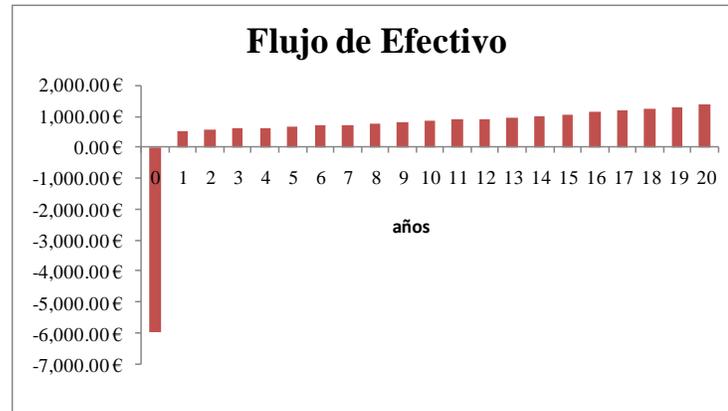


Figura 46 Flujo de efectivo para la instalación de sistemas híbridos

Si el proyecto se llevará a cabo, cada familia tendría que invertir cerca de 664 euros, recuperando su inversión en casi 9 años, tomando en cuenta una TIR de 11.15%. Cabe resaltar que para este caso, debido al excedente de energía, los flujos de efectivo positivos se dan por la venta de energía eléctrica lo que merece un mayor acercamiento a la ley y las condiciones para que se efectúe dicha transacción.

El análisis de los resultados efectuados, hace evidente que la factibilidad del proyecto está condicionada principalmente por 3 variables: recurso eólico, precio del sistema, y costo de la energía eléctrica. Estos resultados coinciden con las investigaciones realizadas en la Universidad de la República Uruguay para la instalación de generadores eólicos para fines industriales; estudio en el cual se concluye que la factibilidad del uso de la energía eléctrica de origen eólico depende, principalmente, de la disponibilidad de recurso y del precio de los equipos [Cataldo, 2009].

Capítulo 8. Conclusiones, recomendaciones e investigaciones futuras

8.1 Conclusiones

El análisis técnico y económico y su relación directa con la dimensión social y ambiental, representan ser las principales limitaciones para la implementación de sistemas eólicos o sistemas híbridos de baja escala. El factor técnico es determinante ya que de este depende la energía anual disponible y su relación de eficiencia en costo e inversión. El correcto análisis del recurso eólico y solar de la zona permite de manera general tomar decisiones con respecto a su utilización, comparando con requerimientos energéticos promedio de la zona. Sin embargo no es suficiente satisfacer los requerimientos o en dado momento sobrepasarlos, ya que hay que tomar en cuenta la inversión que representa realizar una instalación, lo cual lo convertiría en un proyecto no factible. Si bien el presente trabajo se orienta hacia el problema de carencia de energía para uso doméstico, no es restrictiva para otros sectores (industrial, agrícola) siempre y cuando se conozcan las particularidades de cada emplazamiento en términos del recurso eólico y solar y los requerimientos energéticos.

Para este caso particular de estudio, aunque las condiciones de viento no son de las mejores a las alturas propuestas teniendo factores de carga muy bajos, el análisis técnico revela que es factible la instalación de sistemas híbridos para uso doméstico, ya que la energía anual de salida es suficiente para cubrir los requerimientos energéticos. Sin embargo es necesario realizar un análisis económico, partiendo de las condiciones presentes en la zona y realizando análisis de sensibilidad que permitan establecer las condiciones en las cuales la instalación de sistemas híbridos es factible. Para este caso de estudio en particular, los resultados muestran que para la velocidad media de la zona (4.398 m/s) no es factible la instalación de sistemas híbridos, en primer lugar porque la media de velocidad no es de las mejores y en segundo porque el precio de la electricidad resulta ser muy barata, por lo cual el tiempo de recuperación de la inversión va más allá de los 20 años. El análisis realizado indica que la factibilidad de la instalación para cada uno de los modelos, y para diferentes consumos energéticos (número de familias involucradas) requiere una velocidad mínima de 10 m/s teniendo tasas internas de retorno con valores por encima y cercanos a 10%, lo cual indica una recuperación de la inversión, al menos de 10 años. Por otro lado el análisis de sensibilidad de precio de electricidad muestra que para que el proyecto sea factible en la zona de estudio, el precio debería ser de al menos 3 \$/kw-hr, es decir tener un incremento de 3 veces el precio actual en la zona o en dado caso un decremento en la inversión dado por los precios vigentes en el mercado.

Las conclusiones obtenidas en este trabajo se apoyan en la utilización de la plataforma tecnológica desarrollada a partir de la metodología propuesta, que permite realizar la evaluación técnica y económica para condiciones particulares con el fin de tomar mejores decisiones, pero sobre todo para identificar las variables críticas y su sensibilidad en el modelo, de manera tal que se puedan construir alternativas para viabilizar, difundir y ampliar el uso de energía alternativa de

baja escala, más aún cuando hoy en día se cuenta con una legislación que apoya e incentiva el auto abastecimiento de energía eléctrica, al mismo tiempo que destina un presupuesto para la realización de proyectos enfocados a energías renovables. Es por esto que el análisis involucra a instancias gubernamentales para cubrir con parte de los costos asociados en la etapa de inversión ya sea a través de préstamos, subsidios o créditos, ya que en muchos la adquisición de generadores eólicos o sistemas híbridos de manera particular, no resulta ser atractivo. Por tal razón, la plataforma tecnológica pretende ser una herramienta para la toma de decisiones en la cual se involucre al gobierno como promotor de proyectos (financiamiento), a la industria privada como proveedor del producto (generadores eólicos, paneles solares, complementos, evaluaciones técnicas) y a la sociedad como beneficiaria (comunidades, familias).

Finalmente, el estudio realizado hace evidente que no basta con la existencia de la tecnología y máquinas cada vez más eficientes, si no se sigue una metodología y no se cuenta con herramientas para la toma de decisiones que permita orientar el uso de energías alternativas a baja escala. A partir de este trabajo, se incentiva la investigación y la realización de más proyectos en materia de energías alternativas y abre el panorama para la construcción de una plataforma tecnológica a nivel nacional que no que consolide información valiosa, útil y actualizada, que repercuta en un mayor uso de energías limpias en beneficio de las personas que carecen de este servicio y como apoyo a las estrategias de transición energética nacional.

8.2 Recomendaciones

Los resultados de la investigación son producto del análisis exhaustivo para un lugar en particular, 3 tipos de generadores eólicos y un modelo de panel solar. Si bien los resultados permiten tomar decisiones con respecto a las combinaciones necesarias, es restrictivo para las condiciones analizadas. Lo que se sugiere es ampliar la base de datos de diferentes lugares y diferentes modelos de generadores, de manera que la metodología propuesta pueda ampliarse a más combinaciones, de precios, costos, velocidades, alturas, direcciones. Se debe trabajar en conjunto con aquellas instituciones que se encargan de obtener mediciones meteorológicas, como es el caso del SMN que es el responsable de las mediciones. Si bien su papel no es el procesamiento de datos, es necesario que exista un trabajo conjunto que incluya mediciones de viento y radiación en lugares clave y a partir de esto realizar su procesamiento estadístico, de tal manera que la información sea accesible par los involucrados clave (empresarios, sociedad, gobierno, proveedores) e incentive a las familias a tener sistemas de energía renovable en sus hogares, siempre y cuando exista información confiable y apoyo económico. Es por esto que se recomienda construir una plataforma tecnológica mexicana, que permita a gobierno, empresarios y usuarios, conocer las oportunidades que se tiene para la implementación de sistemas híbridos de baja escala. De esta manera, se incentiva su uso, se informa acerca de las ventajas, y se identifica las combinaciones necesarias que maximizan su eficiencia. La plataforma tecnológica, debe ser una herramienta para la toma de decisiones y ser el incentivo necesario para el desarrollo de proyectos a nivel rural y urbano.

Por otra parte es necesario identificar las regiones en las que el país no cuenta con electrificación y empezar a realizar las mediciones correspondientes, de manera que para un período de un año se pueda evaluar el recurso y determinar la factibilidad del proyecto, a partir del cual se pueda gestionar los incentivos económicos necesarios vinculando a la empresa privada, el gobierno y la sociedad. Si bien el modelo está pensado para lugares que carecen de energía eléctrica, no es restrictivo para cualquier otro lugar en los que se tenga mediciones. Por lo que se sugiere, realizar metodologías que tomen en cuenta particularidades específicas, como lo son estudios en ciudades, edificios, zonas metropolitanas, etc. y no solo a nivel doméstico, sino también a nivel industrial, agrícola, etc.

También se sugiere realizar estudios tomando en cuenta, consumos reales. Dado que en este trabajo se establece una metodología, las condiciones de consumo energético se mantienen constantes. Sin embargo, se recomienda realizar un análisis exhaustivo de las necesidades energéticas, ya que estas son variables a lo largo de un año en diferentes estaciones. De esta manera el dimensionamiento de los sistemas son más precisos.

8.3 Investigaciones futuras

Los análisis realizados en este trabajo son una buena aproximación para tomar decisiones respecto a la instalación de generadores eólicos complementados con paneles solares. Sin embargo, los análisis hechos deben considerar la medición de velocidades del viento para diferentes alturas, o en dado caso realizar comparaciones bajo diferentes métodos de aproximación, ya que el valor de α (perfil de viento) es un valor que merece ser tomado en cuenta con más profundidad, al ser un factor variable en función de la hora del día o las condiciones climáticas presentes.

Por otro lado, la simulación realizada debe ser analizada con mayor detenimiento, realizando más pruebas e iteraciones, ya que para este caso se tomó como punto de partida el análisis de 100 iteraciones en cada corrida de simulación, lo cual continúa siendo un valor aproximado. También es necesario, realizar simulaciones en tiempo más cortos, lo que permita identificar con claridad los períodos de baja intensidad de viento y aquellos en los que se presenta ráfagas de viento fuertes.

Es importante continuar incrementando la base de datos, tanto de lugares como de generadores eólicos, ya que esta información incrementa la posibilidad de combinar variables e identificar las mejores condiciones de instalación, con mayores eficiencias y a menores costos. A partir del incremento de la base de datos, es posible generar modelos sintéticos que faciliten los análisis sin la necesidad de realizar mediciones. A partir de estos modelos, extrapolar con cierta certeza el comportamiento del viento para condiciones climáticas similares. El incremento de las bases de datos, no solo permitirá tomar decisiones a nivel rural, sino también en las grandes ciudades,

siempre y cuando se demuestre la factibilidad, tomando en cuenta las particularidades de cada instalación.

El desarrollo de software, será pieza fundamental para la difusión de resultados y la toma de decisiones, por lo que el desarrollo de la herramienta tecnológica debe significar el entregable más importante, en el cual se almacene información de lugares, generadores, paneles, etc. y donde se pueda modelar instalaciones híbridas o individuales con mayor precisión, tomando en cuenta la interactividad con el usuario, creando un ambiente más amigable, más funcional y versátil, al permitir realizar combinaciones de alturas, radios, velocidades, potencias, etc. que optimicen la instalación de energías alternativas, al menor costo y con la mayor eficiencia.

Capítulo 9. Referencias bibliográficas

- ANTEZANA Juan Cristóbal, “*Diseño y construcción de un prototipo de Generador eólico de eje vertical*”, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias físicas y matemáticas, Departamento de ingeniería eléctrica, Chile 2004.
- AHRENS C. Donald, “*Essentials of meteorology: an invitation to the atmosphere*” 2a Edición, Wadsworth Publishing Company, USA, 1998.
- BAÑUELOS F., ANGELES C., SERRANO J., MUCIÑO D., “*Análisis y validación de metodología usada para la obtención de perfiles de velocidad de viento*”, Universidad Nacional Autónoma de México, 2009
- BURTON Tony, SHARPE David, JENKINS Nick, BOSSANYI Ervin, “*Wind Energy Handbook*”, Editorial John Wiley & Sons, LTD, England 2001 England
- CAMBLONG, D. “*Minimización de impacto de las perturbaciones de origen eólico en la generación por aeroturbinas de velocidad variable. Tesis Doctoral, España: Mondragón Unibertsitatea, 2003*
- CATALDO J., NUNES V., “*Metodología de evaluación del potencial eólico para la instalación de aerogeneradores en plantas industriales y análisis de la sensibilidad de la factibilidad*”, Instituto de Mecánica de los fluidos e ingeniería ambiental, Universidad de la República, 2009
- DEPARTAMENTO DE ENERGÍA DE EE.UU. “*Sistemas eólicos pequeños para generación de electricidad, una guía para los consumidores en los EE.UU.*” Laboratorio Nacional de Energía Renovable, USA 2007
- DOMENECH Quezada J.L. “*Huella ecológica y desarrollo sostenible*” A.E.N.O.R., Madrid, 2009
- ESCUDERO, José M., “*Manual de energía eólica, Investigación, diseño, promoción, construcción y explotación de distinto tipo de instalaciones*”, 2ª edición. Ediciones Mundi-Prensa, España 2008
- Estrategia Nacional para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía, Secretaría de Energía, México 2011
- FRANQUESA Manuel, “*Introducción a la teoría de las turbinas eólicas*”. Extracto del libro: “*Kleine Windrader: Berenchung und Konstruktion*” Berlin 1989. España 2009

- GOVINDARAJAN A. Chittaranjan, *“Laminar flow and turbulence modeling to trace wake pattern around building clusters for domestic scale wind turbine siting”*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, USA 2008
- HERRERA S.O., VILALTA G., SEEGER K. y SCHELLONG W., *“MATLAB para la evaluación del recurso eólico”* Centro de estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba
- HULSHORST Walter, CRIADO Víctor, *“Manual práctico de evaluación de una instalación de energía eólica a pequeña escala”*, Leonardo Energy, Universidad Técnica de Madrid, España 2009
- Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética, Diario Oficial de la Federación del 28 de noviembre de 2008.
- LOPEZ Angel, DURÁN Daniel, TINAJERO Víctor, DORANTES Rubén, *“Diseño de una planta desaladora de agua de mar con fuente de energía eólica. Caso de estudio: El Municipio de Mexicali, Baja California”*, Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Atzacapotzalco, 2009
- NIEBEL Benjamín, FREIDVALS Andris, *“Ingeniería Industrial, métodos, estándares y diseño del trabajo”*, 11 edición, Editorial Alfa Omega, México 2004
- SCHMIDHEINY Stephan con el Consejo Empresarial para el Desarrollo Sostenible, *“Cambiano el Rumbo”* Una perspectiva global del empresariado para el desarrollo y el medio ambiente, Fondo de Cultura Económica, México, 1996
- FROST Walter, ASPLIDEN Carl, *“Wind Turbine Technology, Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering”*, Editorial ASME PRESS, USA, 1998
- OLIVA Rafael, *“Introducción a los modelos y control de máquinas eólicas” Cap.3* Adquisición de datos Recurso Eólico, Universidad Nacional de la Patagonia Austral y Fundación H2 Patagonia, 2011
- PIGGOTT Hugh, *“How to build a wind turbine. The axial flux windmill plans”*, June 2005
- RAMÍREZ Evangelina, MORENO Vivanco, *“Análisis de parámetros meteorológicos utilizando el modelo de la rosa de los vientos”* Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2007
- REYES, S. *“Introducción a la meteorología”* Mexicali, Universidad Autónoma de Baja California, México, 2001.

- REHMAN S., ABBADI N. “*Wind shear coefficients and their effect on energy production*” Arabia Saudi, 2005
- SALDAÑA, Ricardo, “*Estudio de los potenciales bio energéticos, eólico, mini hidráulico y solar en México*” Instituto de Investigaciones Eléctricas, División de Energías Alternas, Gerencia de energías no convencionales, México 2005
- SARMIENTO Antonio, “*Días de autonomía*”, Centro de Estudios de Tecnologías Energéticas Renovables, Cuba, 2009
- TONDA Juan, “*El oro solar y otras fuentes de energía*” Fondo de Cultura Económica, Primera Edición, México 1993
- ZAMORA Marlene, LEYVA Elia, LAMBERT Alejandro, “*Recurso eólico en Baja California*” Revista digital universitaria, 1 de febrero de 2010, Vol. 11 No 2.
- Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables. Secretaría de Energía. 2009. *Op. Cit.*
- Plan de Energías Renovables 2011-2020. Evaluación Ambiental Estratégica. Documento para la Iniciación del Procedimiento de Evaluación Ambiental-Ley 9/2006, Comercio , Gobierno de España, 2010

Páginas web visitadas

- Agencia Andaluza de la Energía “*Energía eólica, guía técnica*”, Consejería de innovación, ciencia y empresa, España, consultado el 12 de febrero de 2010 obtenido de la página:
<http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/agenciadelaenergia/nav/com/portada.jsp>
- ALTENER RES & RUE DISSEMINATION, CONFEDERACIÓN DE USUARIOS Y USUARIOS, EUROPEAN COMMISSION, D.G.TREN, “*Proyecto RES&RUE Dissemination, Energía Eólica*”, consultado el 31 de enero de 2011, obtenido de la página:
<http://www.cec.europa.eu/campanas/medio%20ambiente/res&rue/htm/guia/eolica.htm>
- Asociación Danesa de la Industria Eólica, consultado el 16 de febrero de 2011, obtenido de la página:
www.windpower.org
- CFE, Comisión Federal de Electricidad, Estadísticas, Indicadores operativos, consultado el 23 de marzo de 2010, obtenido de la página:
<http://www.cfe.gob.mx/QuienesSomos/estadisticas/Paginas/Estadistica.aspx>
- Global Wind Energy Council “*Global Wind Energy Outlook 2008*” consultado el 31 de enero 2011, obtenido de la página:
<http://www.gwec.net/index.php?id=92>

- HALKEMA J.A., “*Wind Energy: Facts and Fiction. A half truth is a whole lie*” consultado el 13 de abril de 2011, obtenido de la página:
<http://www.countryguardian.net/halkema-windenergyfactfiction.pdf>
- HERNANDEZ Nelson, “*Mundo Capacidad de generación eléctrica (2009)*” Periódico Virtual: Gerencia y energía, Julio de 2010, consultado el 20 de abril de 2011, obtenido de la página:
http://gerenciayenergia.blogspot.com/2010_07_01_archive.html
- INEGI. “*Conteo de Población y Vivienda 2005*” Consulta Interactiva de datos. Consultado el 3 de febrero de 2011, obtenido de la página:
http://www.inegi.org.mx/lib/Olap/consulta/general_ver4/MDXQueryDatos.asp?proy=cpv05_viviendas
- INEGI. “*México en cifras-Información Nacional, por entidad federativa y municipios*”, Estadística, consultado el 6 de marzo de 2011, obtenido de la página:
<http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx>
- METAS Meteorólogos Asociados, “*Presión atmosférica, presión barométrica y altitud, conceptos y aplicaciones*”, Febrero 2005, consultado el 10 de marzo de 2011, obtenido de la página:
<http://www.metas.com.mx/guiametas-Presion.html>
- Natural Resources Canadá, RETScreen International, Permitiendo Decisiones de energía más limpia, consultado el 22 de febrero de 2011, obtenido de la página:
<http://www.retscreen.net/es/download.php>
- Servicio Meteorológico Nacional, Observando el tiempo, Estaciones Meteorológicas Automáticas, consultado el 22 de febrero de 2011, obtenido de la página:
www.smn.conagua.gob.mx
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología Cambio climático en México, “*El sector privado y el cambio climático*”, consultado el 29 de marzo de 2011, obtenido de la página:
http://cambio_climatico.ine.gob.mx/sectprivcc/mercadobonoscarbono.html

ANEXOS

ANEXO A. Proyectos eólicos en México

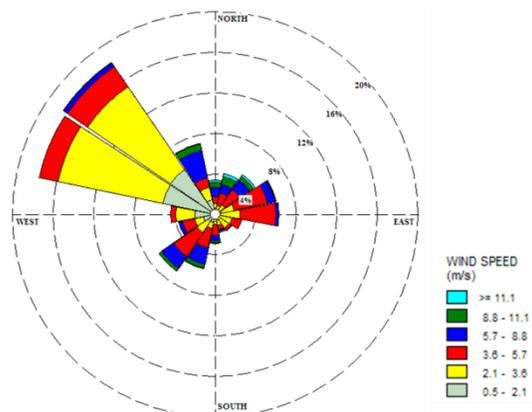
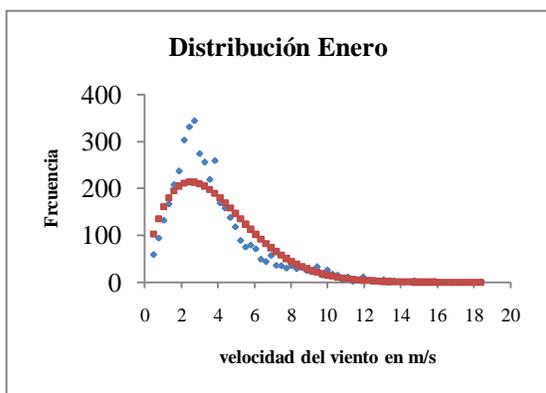
Tabla 33 Proyectos de energía eólica comprometidos y en ejecución

Proyectos	MW	Fecha	Superficie (Ha)	Municipio
La Venta	1.35	1994	1.8	Juchitán
Guerrero Negro	0.6	1999	6	
La Venta II	83.3	2007	720	Juchitán
Eurus	250	2009	2500	Juchitán
Parques ecológicos de México	79.9	2009	1050	Juchitán
Fuerza eólica del Istmo	30	2010	300	Juchitán
Electricidad del Valle de México	67.5	2009	444	Juchitán y Asunción Ixtaltepec
Eoliatec del Istmo	22	2010	220	Juchitán
Bii Nee Stipa Energía Eólica	26.3	2009	340	El Espinal
La Venta III	101.4	Nov. 2010	1014	Juchitán
Oaxaca I	101.4	2010	1014	Juchitán
Centro Regional de Tecnología Eólica	5	ND	50	Juchitán
Desarrollos eólicos Mexicanos	227.5	2011	2275	Juchitán
Eoliatec del pacífico	160.5	2011	1605	Juchitán
Eoliatec del Istmo	142.2	2011	1422	Juchitán
Gamesa Energía	288	2011	2880	Juchitán
Vientos del Istmo	180	2012	1800	Juchitán
Energía Alterna Istmeña	215.9	2012	2159	Juchitán
Unión Fenosa Generación México	227.5	2010	2275	Juchitán
Fuerza eólico del istmo (segunda fase)	50	2011	500	Juchitán
Oaxaca II-IV	304.2	Sep. 2011	3042	Juchitán

Fuente: Programa Especial para el aprovechamiento de energías renovables

ANEXO B. Resultados mensuales

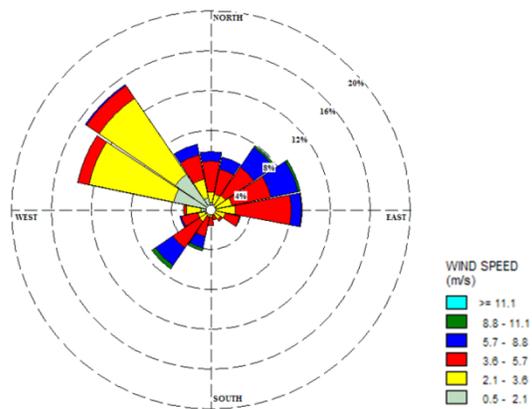
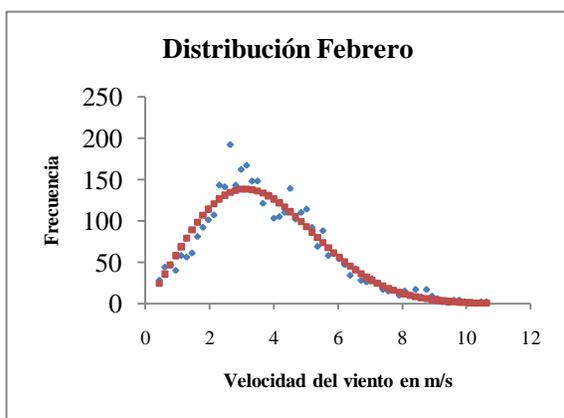
Enero



Datos	4336
Valor máximo [m/s]	18.5
Valor mínimo [m/s]	0.34
Constante C [m/s]	4.38
Constante k	1.67
Desviación	3.10
R^2 (ajuste lineal)	0.9847

Datos Totales	4464
Promedio de velocidad	3.65
En calma ($v < 1$)	104
Frecuencia de vientos en calma	2.35%
Disponibilidad de datos	99.17%
Datos incompletos	37
Datos totales usados	4427

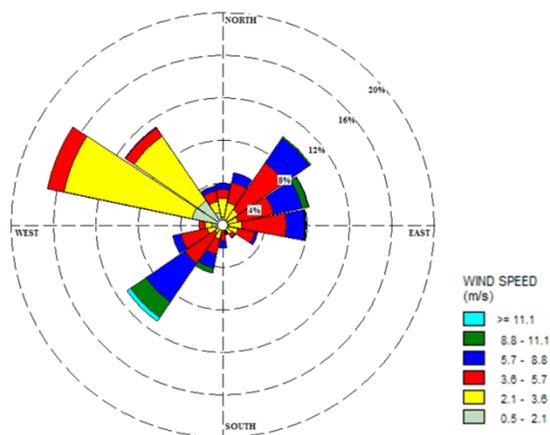
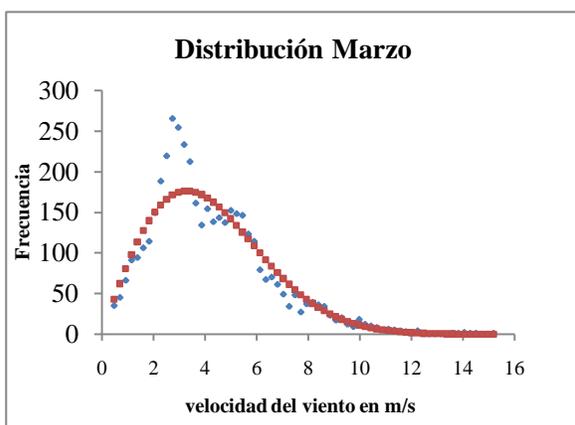
Febrero



Datos	3804
Valor máximo [m/s]	10.71
Valor mínimo [m/s]	0.34
Constante C [m/s]	4.18
Constante k	2.14
Desviación	2.96
R^2 (ajuste lineal)	0.9985

Datos Totales	4032
Promedio de velocidad [m/s]	3.68
En calma ($v < 1$)	97
Frecuencia de vientos en calma	2.50%
Disponibilidad de datos	96.40%
Datos incompletos	145
Datos totales usados	3887

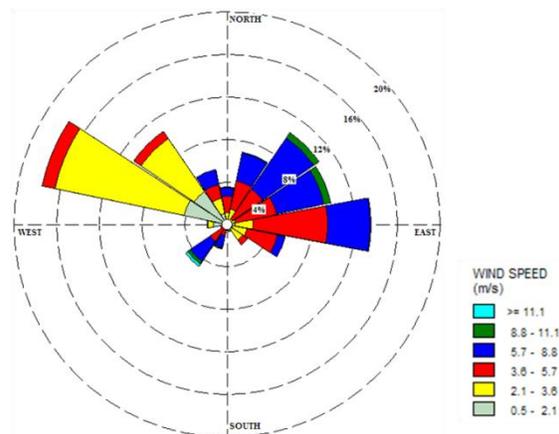
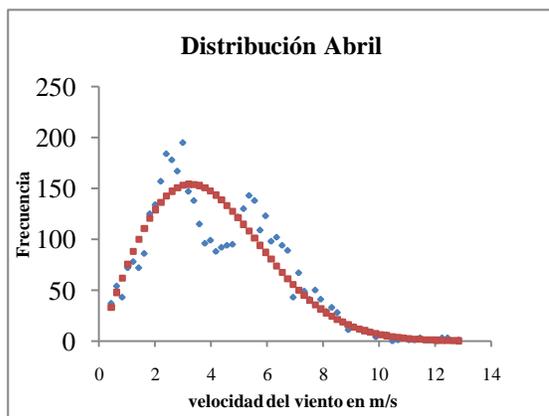
Marzo



Datos	4367
Valor máximo [m/s]	15.29
Valor mínimo [m/s]	0.34
Constante C [m/s]	4.74
Constante k	1.96
Desviación	3.35
R^2 (ajuste lineal)	0.9954

Datos Totales	4464
Promedio de velocidad [m/s]	4.05
En calma ($v < 1$)	93
Frecuencia de vientos en calma	2.09%
Disponibilidad de datos	99.71%
Datos incompletos	13
Datos totales usados	4451

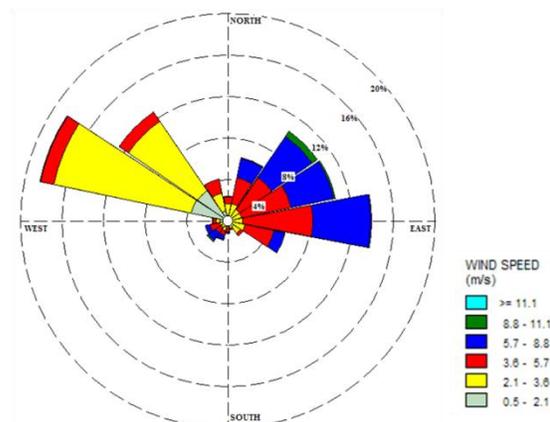
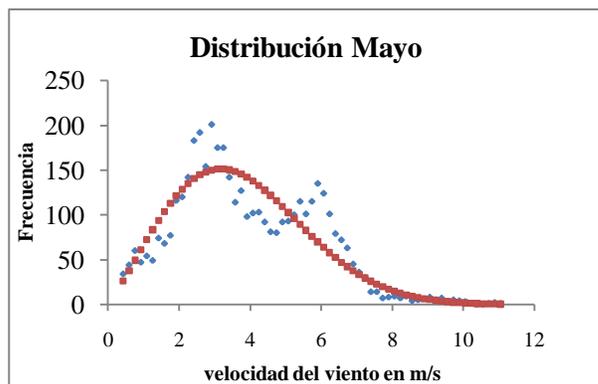
Abril



Datos	4183
Valor máximo [m/s]	12.93
Valor mínimo [m/s]	0.34
Constante C [m/s]	4.60
Constante k	2.01
Desviación	3.25
R^2 (ajuste lineal)	0.9982

Datos Totales	4320
Promedio de velocidad [m/s]	4.1
En calma ($v < 1$)	133
Frecuencia de vientos en calma	3.09%
Disponibilidad de datos	99.56%
Datos incompletos	19
Datos totales usados	4301

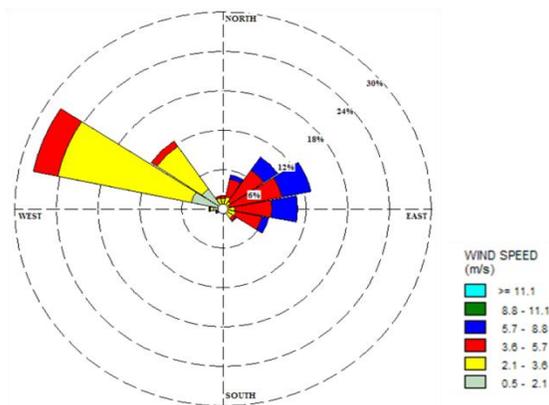
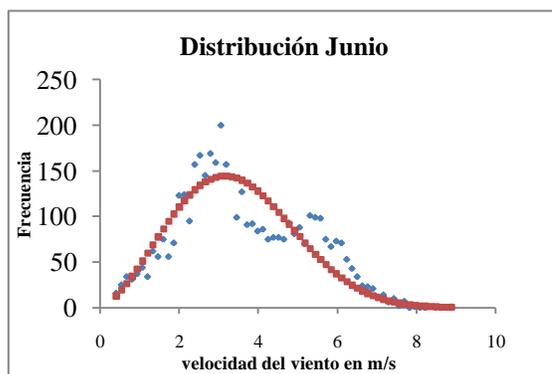
Mayo



Datos	4328
Valor máximo [m/s]	11.13
Valor mínimo [m/s]	0.34
Constante C [m/s]	4.26
Constante k	2.14
Desviación	3.01
R^2 (ajuste lineal)	0.9967

Datos Totales	4464
Promedio de velocidad [m/s]	3.79
En calma ($v < 1$)	150
Frecuencia de vientos en calma	3.36%
Disponibilidad de datos	99.96%
Datos incompletos	2
Datos totales usados	4462

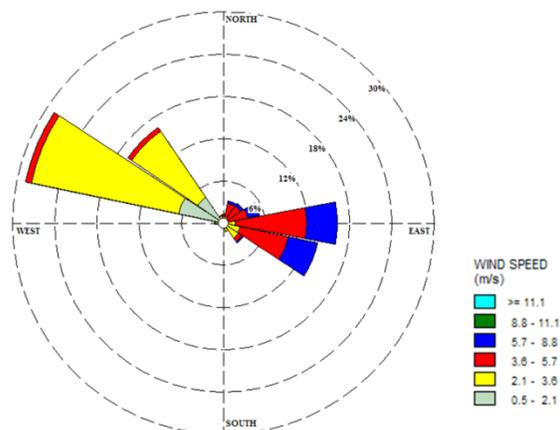
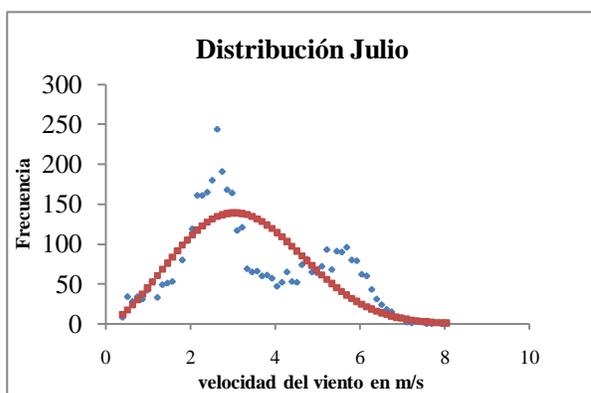
Junio



Datos	4231
Valor máximo [m/s]	8.96
Valor mínimo [m/s]	0.34
Constante C [m/s]	3.89
Constante k	2.48
Desviación	2.75
R^2 (ajuste lineal)	0.9940

Datos Totales	4320
Promedio de velocidad [m/s]	3.56
En calma ($v < 1$)	85
Frecuencia de vientos en calma	1.97%
Disponibilidad de datos	99.70%
Datos incompletos	13
Datos totales usados	4307

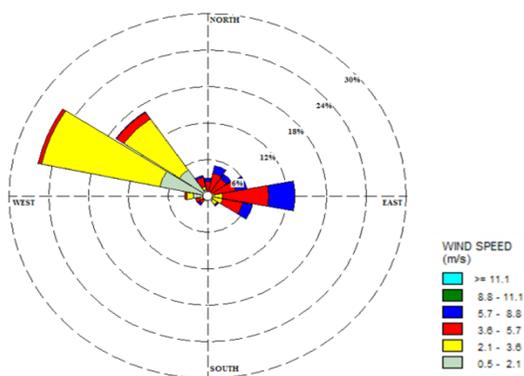
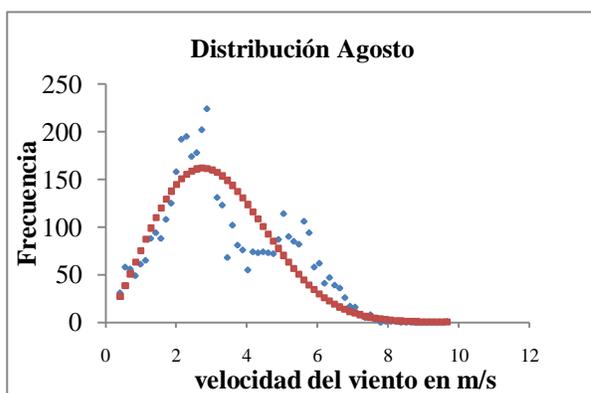
Julio



Datos	4362
Valor máximo [m/s]	8.10
Valor mínimo [m/s]	0.34
Constante C [m/s]	3.73
Constante k	2.51
Desviación	2.64
R^2 (ajuste lineal)	0.9868

Datos Totales	4464
Promedio de velocidad [m/s]	3.36
En calma ($v < 1$)	110
Frecuencia de vientos en calma	2.46%
Disponibilidad de datos	99.98%
Datos incompletos	1
Datos totales usados	4463

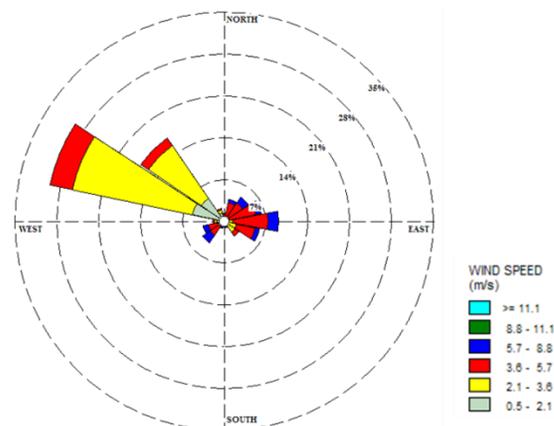
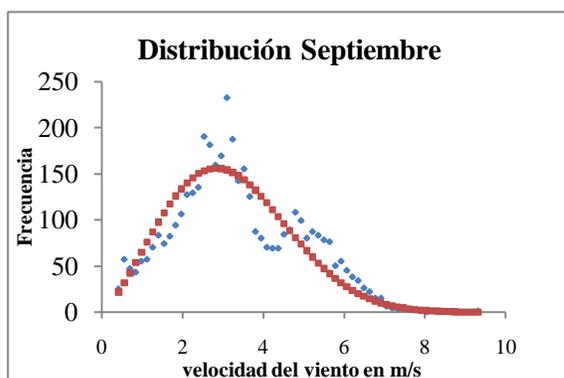
Agosto



Datos	4335
Valor máximo [m/s]	9.74
Valor mínimo [m/s]	0.34
Constante C [m/s]	3.59
Constante k	2.24
Desviación	2.54
R^2 (ajuste lineal)	0.9920

Datos Totales	4464
Promedio de velocidad [m/s]	3.26
En calma ($v < 1$)	148
Frecuencia de vientos en calma	3.32%
Disponibilidad de datos	99.98%
Datos incompletos	1
Datos totales usados	4463

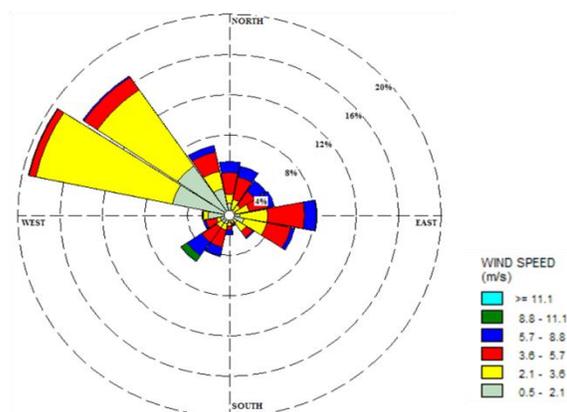
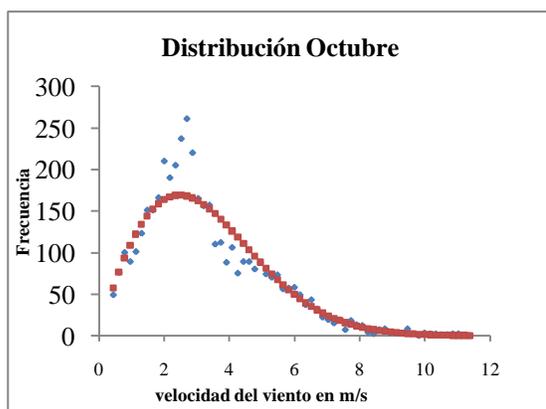
Septiembre



Datos	4210
Valor máximo [m/s]	9.38
Valor mínimo [m/s]	0.34
Constante C [m/s]	3.62
Constante k	2.31
Desviación	2.56
R^2 (ajuste lineal)	0.9946

Datos Totales	4320
Promedio de velocidad [m/s]	3.29
En calma ($v < 1$)	123
Frecuencia de vientos en calma	2.85%
Disponibilidad de datos	99.98%
Datos incompletos	1
Datos totales usados	4319

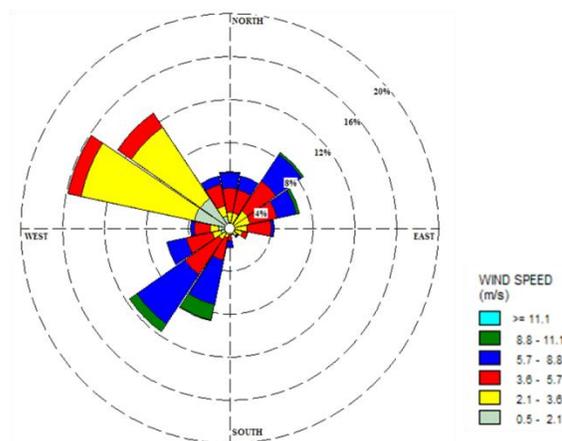
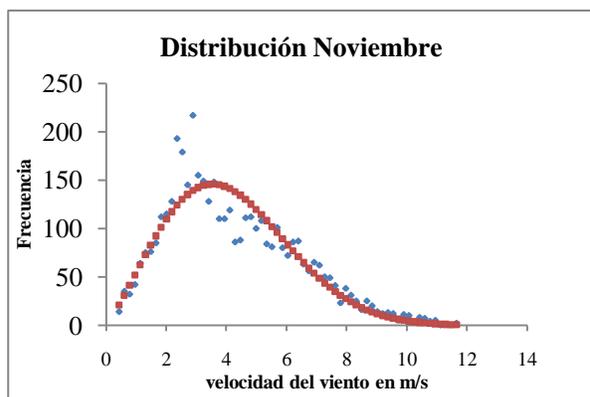
Octubre



Datos	4374
Valor máximo [m/s]	11.82
Valor mínimo [m/s]	0.34
Constante C [m/s]	3.70
Constante k	1.87
Sigma	2.62
R^2 (ajuste lineal)	0.9949

Datos Totales	4464
Promedio de velocidad [m/s]	3.18
En calma ($v < 1$)	113
Frecuencia de vientos en calma	2.53%
Disponibilidad de datos	99.96%
Datos incompletos	2
Datos totales usados	4462

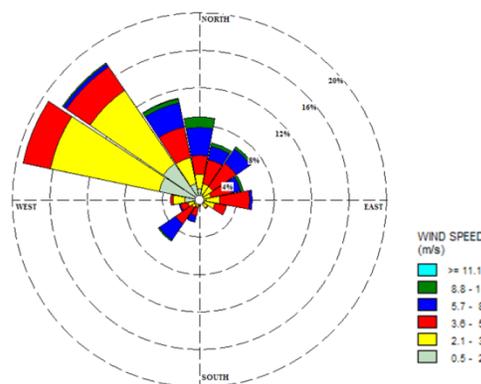
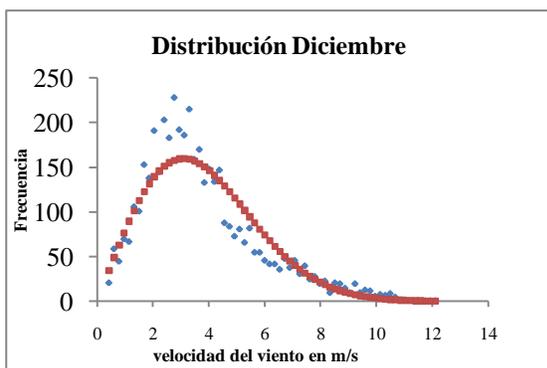
Noviembre



Datos	4298
Valor máximo [m/s]	11.74
Valor mínimo [m/s]	0.34
Constante C [m/s]	4.69
Constante k	2.18
Desviación	3.32
R ² (ajuste lineal)	0.9955

Datos Totales	4320
Promedio de velocidad [m/s]	4.17
En calma (v<1)	21
Frecuencia de vientos en calma	0.49%
Disponibilidad de datos	99.84%
Datos incompletos	7
Datos totales usados	4313

Diciembre

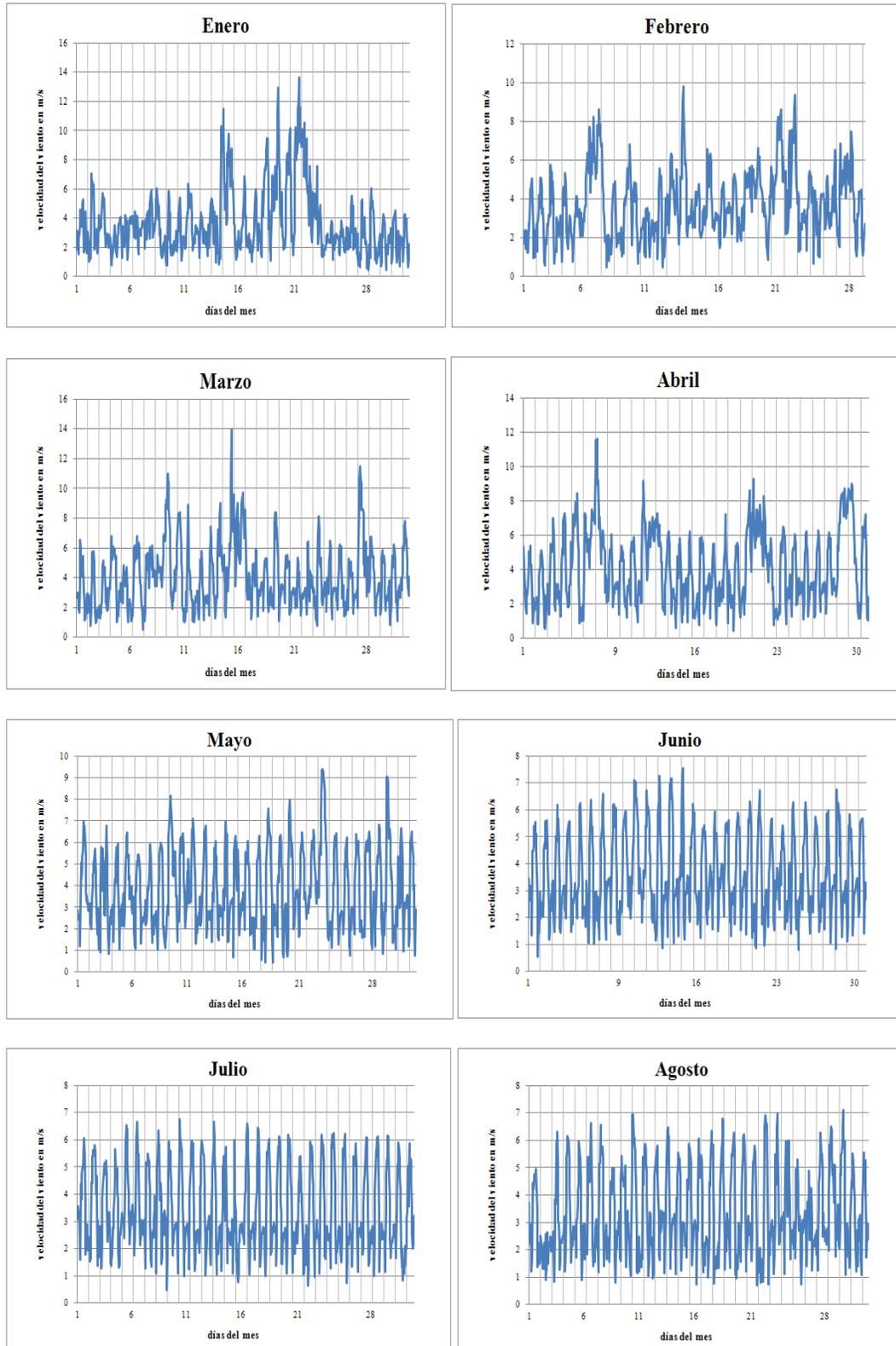


Datos	4416
Valor máximo [m/s]	12.21
Valor mínimo [m/s]	0.34
Constante C [m/s]	4.31
Constante k	2.03
Desviación	3.05
R ² (ajuste lineal)	0.9913

Datos Totales	4464
Promedio de velocidad [m/s]	3.72
En calma (v<1)	45
Frecuencia de vientos en calma	1.01%
Disponibilidad de datos	99.66%
Datos incompletos	15
Datos totales usados	4449

Figura 47 Distribución de frecuencia, Rosa de los Vientos y procesamiento de datos mensuales

ANEXO C. Comportamiento del viento promedio al día por hora y mes



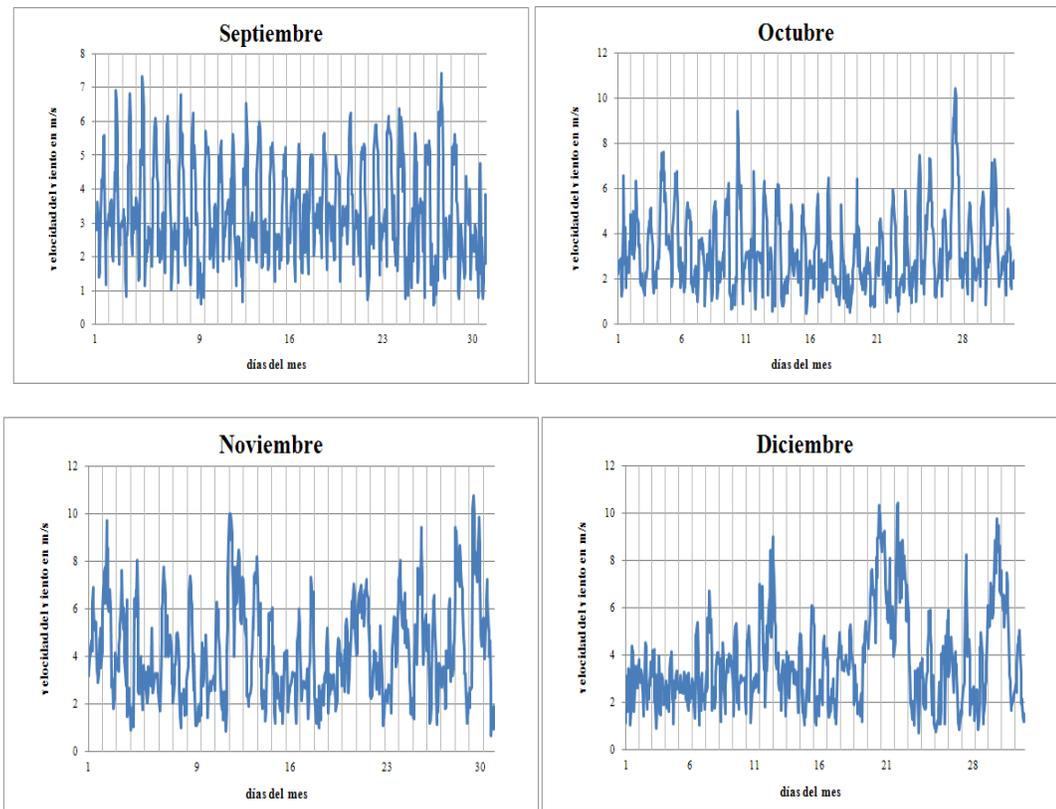


Figura 48 Comportamiento del viento promedio por hora, al día y por cada mes

ANEXO D. Precio y consumo per cápita en Baja California

Tabla 34 Estadísticas de venta. Precio por sector

Precio Medio (\$/kWh) Baja California					
Sector	2005	2006	2007	2008	2009
Doméstico	0.9818	1.0392	1.0968	1.1299	1.0998
Comercial	2.0625	2.3328	2.3825	2.5276	2.3597
Servicios	1.4221	1.5568	1.5956	1.6504	1.7945
Agrícola	0.4106	0.4151	0.4372	0.4549	0.4551
Mediana ind.	1.0202	1.1093	1.1318	1.4127	1.1714
Gran Industria	0.7309	0.8166	0.8484	1.1825	0.9289
Total	1.0258	1.1166	1.1529	1.3427	1.1755

Fuente: Comisión Federal de Electricidad

Tabla 35 Consumo promedio por usuario

Consumo Medio (kWh/Usuario)					
Sector	2005	2006	2007	2008	2009
Doméstico	269	280	271	270	265
Comercial	643	644	612	582	534
Servicios	3,523	3,812	3,859	4,290	4,229
Agrícola	7,393	7,768	8,507	7,629	8,240
Mediana ind.	31,167	30,398	28,763	27,240	23,707
Gran Industria	2,070,058	1,934,811	1,694,017	1,566,413	1,475,426
Total	789	806	780	761	717

Fuente: Comisión Federal de Electricidad

ANEXO E. Lista de precios para los generadores eólicos y panel solar

Tabla 36 Lista de precios para generador modelo i1POWER

Lista de precios	Precio	Porcentaje
Aerogenerador	2739	33.04%
Controlador de voltaje	477	5.75%
Inversor Phonix	833	10.05%
Torre 18m	3137	37.84%
Pack de baterías Rolls Led Acid 24 V 400Ah	1104	13.32%
Total	8290	100%

Tabla 37 Lista de precios para generador modelo i5POWER

Lista de precios	Precio	Porcentaje
Aerogenerador	7201	39.36%
Controlador de voltaje	1527	8.35%
Inversor Phonix	1611	8.80%
Torre 18m	5750	31.43%
Pack de baterías Rolls Led Acid 48 V 400Ah	2208	12.07%
Total	18297	100.00%

Tabla 38 Lista de precios para generador modelo i10POWER

Lista de precios	Precio	Porcentaje
Aerogenerador	14371	30.76%
Controlador de voltaje	1527	3.27%
Inversor Phonix	9655	20.67%
Torre 18m	15645	33.49%
Pack de baterías Rolls Led Acid 120 V 400Ah	5520	11.82%
Total	46718	100.00%

ANEXO F. Análisis de costo beneficio a diferentes precios, número de familias y velocidades del viento 29

Tabla 39 Análisis costo beneficio para un precio de electricidad de 1.0998 \$/Kw-hr

Familias	MODELO iPOWER			
	Velocidad Media [m/s]			
	4.398	6	8	10
1	--	-3.99%	3.65%	8.61%
2	--	-3.82%	3.74%	8.68%
3	-4.12%	-3.06%	3.84%	8.75%
4	--	0.72%	3.93%	8.81%
5	--	3.11%	4.75%	8.88%
6	--	-3.06%	6.41%	8.95%
7	--	-0.90%	7.65%	9.57%
8	--	0.58%	8.32%	10.45%
9	--	-3.06%	9.13%	11.15%
10	--	-1.65%	4.75%	11.72%
11	--	-0.41%	5.64%	11.87%
12	--	-3.13%	6.41%	12.29%
13	--	-1.97%	6.90%	9.27%
14	--	-0.98%	4.06%	9.57%
15	--	-3.12%	4.75%	10.04%
16	--	-2.17%	5.36%	10.45%
17	--	-1.40%	5.79%	10.82%
18	--	-3.11%	6.29%	10.96%

Familias	MODELO i5POWER			
	Velocidad Media [m/s]			
	4.398	6	8	10
1	--	-0.63%	7.51%	13.65%
2	--	-0.58%	7.55%	13.67%
3	--	-0.52%	7.58%	13.70%
4	--	-0.46%	7.61%	13.73%
5	--	-0.40%	7.64%	13.75%
6	--	-0.35%	7.68%	13.78%
7	-3.08%	-0.29%	7.71%	13.81%
8	-1.31%	0.12%	7.74%	13.83%
9	--	1.52%	7.78%	13.86%
10	--	2.53%	7.81%	13.88%
11	--	3.50%	7.84%	13.91%
12	--	4.34%	7.87%	13.94%
13	-4.24%	4.93%	7.91%	13.96%
14	--	5.58%	8.47%	13.99%
15	--	6.15%	8.80%	14.01%
16	--	0.05%	9.26%	14.04%
17	--	0.79%	9.68%	14.06%
18	--	1.45%	10.05%	14.09%

Familias	MODELO i10POWER			
	Velocidad Media [m/s]			
	4.398	6	8	10
1	--	0.23%	9.77%	16.21%
2	--	0.25%	9.78%	16.22%
3	--	0.27%	9.79%	16.23%
4	--	0.29%	9.80%	16.24%
5	--	0.31%	9.82%	16.25%
6	--	0.33%	9.83%	16.26%
7	--	0.35%	9.84%	16.27%
8	--	0.37%	9.85%	16.28%
9	--	0.39%	9.86%	16.29%
10	--	0.42%	9.87%	16.29%
11	--	0.44%	9.89%	16.30%
12	--	0.46%	9.90%	16.31%
13	--	0.48%	9.91%	16.32%
14	--	0.50%	9.92%	16.33%
15	--	0.52%	9.93%	16.34%
16	-4.98%	0.54%	9.94%	16.35%
17	-4.04%	0.56%	9.96%	16.36%
18	-3.26%	0.58%	9.97%	16.37%

Tabla 40 Análisis costo beneficio para un precio de electricidad de 2\$/Kw-hr

²⁹ Los porcentajes representan el valor de la TIR, se marcan en color azul aquellos que sobrepasan el valor de 10%.

MODELO i1POWER				
Familias	Velocidad Media [m/s]			
	4.398	6	8	10
1	-3.41%	5.62%	13.30%	19.48%
2	-0.34%	5.70%	13.36%	19.53%
3	4.82%	6.29%	13.42%	19.58%
4	-0.34%	9.57%	13.48%	19.63%
5	-3.10%	11.92%	14.31%	19.69%
6	-0.34%	6.29%	16.06%	19.74%
7	-2.31%	8.08%	17.44%	20.37%
8	-0.34%	9.36%	18.09%	21.33%
9	-1.88%	6.29%	19.04%	22.12%
10	-3.10%	7.39%	14.31%	22.77%
11	-1.60%	8.47%	15.24%	22.81%
12	-2.64%	6.19%	16.06%	23.30%
13	-1.41%	7.13%	16.53%	20.15%
14	-2.31%	7.98%	13.61%	20.37%
15	-3.10%	6.21%	14.31%	20.88%
16	-2.07%	6.97%	14.94%	21.33%
17	-2.77%	7.59%	15.35%	21.75%
18	-1.91%	6.23%	15.89%	21.83%
19	-2.52%	6.80%	13.79%	22.18%
20	-3.10%	7.39%	14.31%	20.22%

MODELO i5POWER				
Familias	Velocidad Media [m/s]			
	4.398	6	8	10
1	-0.38%	8.72%	18.07%	26.59%
2	-0.32%	8.75%	18.09%	26.62%
3	-0.27%	8.78%	18.12%	26.64%
4	-0.21%	8.81%	18.14%	26.66%
5	1.64%	8.85%	18.16%	26.68%
6	3.94%	8.88%	18.19%	26.70%
7	5.77%	8.91%	18.21%	26.72%
8	7.28%	9.30%	18.23%	26.74%
9	0.29%	10.60%	18.26%	26.76%
10	1.64%	11.52%	18.28%	26.79%
11	2.87%	12.50%	18.30%	26.81%
12	3.94%	13.37%	18.33%	26.83%
13	4.82%	13.96%	18.35%	26.85%
14	0.76%	14.67%	19.00%	26.87%
15	1.64%	15.31%	19.27%	26.89%
16	2.48%	9.20%	19.78%	26.91%
17	3.24%	9.87%	20.24%	26.93%
18	0.25%	10.50%	20.66%	26.96%
19	0.96%	10.97%	20.80%	26.98%
20	1.64%	11.52%	21.16%	27.08%

MODELO i10POWER				
Familias	Velocidad Media [m/s]			
	4.398	6	8	10
1	-2.62%	9.60%	21.08%	30.47%
2	-2.59%	9.61%	21.09%	30.48%
3	-2.56%	9.63%	21.10%	30.49%
4	-2.54%	9.64%	21.11%	30.50%
5	-2.51%	9.65%	21.12%	30.50%
6	-2.48%	9.66%	21.13%	30.51%
7	-2.46%	9.67%	21.14%	30.52%
8	-2.43%	9.68%	21.14%	30.53%
9	-2.40%	9.70%	21.15%	30.54%
10	-2.00%	9.71%	21.16%	30.55%
11	-0.64%	9.72%	21.17%	30.55%
12	0.57%	9.73%	21.18%	30.56%
13	1.64%	9.74%	21.19%	30.57%
14	2.58%	9.75%	21.20%	30.58%
15	3.38%	9.77%	21.21%	30.59%
16	4.16%	9.78%	21.21%	30.59%
17	4.87%	9.79%	21.22%	30.60%
18	5.47%	9.80%	21.23%	30.61%
19	6.09%	9.81%	21.24%	30.62%
20	-2.03%	9.83%	21.25%	30.63%

Tabla 41 Análisis costo beneficio para un precio de electricidad de 3\$/Kw-hr

Familias	MODELO iIPOWER			
	Velocidad Media [m/s]			
	4.398	6	8	10
1	3.16%	12.17%	21.39%	29.53%
2	5.82%	12.23%	21.44%	29.58%
3	10.96%	12.87%	21.49%	29.62%
4	5.82%	16.51%	21.54%	29.67%
5	3.40%	19.25%	22.52%	29.72%
6	5.82%	12.87%	24.65%	29.76%
7	4.05%	14.83%	26.35%	30.51%
8	5.82%	16.23%	27.08%	31.70%
9	4.43%	12.87%	28.28%	32.68%
10	3.40%	14.04%	22.52%	33.49%
11	4.68%	15.24%	23.65%	33.44%
12	3.78%	12.74%	24.65%	34.07%
13	4.85%	13.76%	25.18%	30.31%
14	4.05%	14.70%	21.69%	30.51%
15	3.40%	12.77%	22.52%	31.13%
16	4.27%	13.59%	23.29%	31.70%
17	3.66%	14.25%	23.75%	32.21%
18	4.39%	12.78%	24.40%	32.25%
19	3.88%	13.39%	21.90%	32.69%
20	3.40%	14.04%	22.52%	30.38%

Familias	MODELO iSPOWER			
	Velocidad Media [m/s]			
	4.398	6	8	10
1	5.93%	15.77%	27.64%	39.48%
2	5.97%	15.79%	27.66%	39.50%
3	6.01%	15.82%	27.68%	39.52%
4	6.04%	15.84%	27.70%	39.54%
5	7.79%	15.87%	27.72%	39.56%
6	10.11%	15.89%	27.74%	39.58%
7	12.04%	15.91%	27.76%	39.60%
8	13.70%	16.37%	27.78%	39.62%
9	6.52%	17.86%	27.80%	39.64%
10	7.79%	18.88%	27.83%	39.66%
11	9.01%	20.05%	27.85%	39.69%
12	10.11%	21.09%	27.87%	39.71%
13	11.01%	21.77%	27.89%	39.73%
14	6.96%	22.64%	28.71%	39.75%
15	7.79%	23.43%	28.98%	39.77%
16	8.62%	16.23%	29.61%	39.79%
17	9.39%	17.00%	30.19%	39.81%
18	6.47%	17.72%	30.71%	39.83%
19	7.13%	18.25%	30.83%	39.85%
20	7.79%	18.88%	31.29%	39.93%

Familias	MODELO iI0POWER			
	Velocidad Media [m/s]			
	4.398	6	8	10
1	3.88%	16.83%	31.74%	45.08%
2	3.90%	16.84%	31.75%	45.08%
3	3.91%	16.85%	31.76%	45.09%
4	3.93%	16.85%	31.77%	45.10%
5	3.95%	16.86%	31.78%	45.11%
6	3.96%	16.87%	31.78%	45.12%
7	3.98%	16.88%	31.79%	45.12%
8	3.99%	16.89%	31.80%	45.13%
9	4.01%	16.90%	31.81%	45.14%
10	4.36%	16.91%	31.82%	45.15%
11	5.56%	16.92%	31.82%	45.16%
12	6.69%	16.93%	31.83%	45.16%
13	7.71%	16.94%	31.84%	45.17%
14	8.65%	16.95%	31.85%	45.18%
15	9.45%	16.96%	31.86%	45.19%
16	10.26%	16.97%	31.87%	45.19%
17	11.01%	16.98%	31.87%	45.20%
18	11.64%	16.99%	31.88%	45.21%
19	12.31%	17.00%	31.89%	45.22%
20	4.33%	17.01%	31.90%	45.23%

Tabla 42 Análisis costo beneficio para un precio de electricidad de 4\$/Kw-hr

Familias	MODELO i1POWER			
	Velocidad Media [m/s]			
	4.398	6	8	10
1	7.60%	17.51%	28.65%	39.02%
2	10.33%	17.56%	28.69%	39.07%
3	15.92%	18.29%	28.74%	39.11%
4	10.33%	22.50%	28.79%	39.16%
5	7.83%	25.76%	29.97%	39.20%
6	10.33%	18.29%	32.56%	39.25%
7	8.50%	20.54%	34.65%	40.13%
8	10.33%	22.15%	35.51%	41.59%
9	8.89%	18.29%	37.00%	42.79%
10	7.83%	19.60%	29.97%	43.80%
11	9.14%	20.99%	31.34%	43.66%
12	8.22%	18.13%	32.56%	44.44%
13	9.31%	19.29%	33.19%	39.95%
14	8.50%	20.37%	28.97%	40.13%
15	7.83%	18.16%	29.97%	40.90%
16	8.72%	19.10%	30.90%	41.59%
17	8.10%	19.85%	31.44%	42.22%
18	8.84%	18.18%	32.24%	42.23%
19	8.32%	18.86%	29.23%	42.77%
20	7.83%	19.60%	29.97%	40.02%

Familias	MODELO i5POWER			
	Velocidad Media [m/s]			
	4.398	6	8	10
1	10.53%	21.76%	36.58%	52.05%
2	10.56%	21.79%	36.60%	52.07%
3	10.59%	21.81%	36.62%	52.09%
4	10.62%	21.83%	36.64%	52.11%
5	12.47%	21.85%	36.67%	52.13%
6	15.02%	21.88%	36.69%	52.15%
7	17.19%	21.90%	36.71%	52.17%
8	19.08%	22.44%	36.73%	52.19%
9	11.13%	24.19%	36.75%	52.21%
10	12.47%	25.38%	36.77%	52.23%
11	13.80%	26.78%	36.79%	52.25%
12	15.02%	28.04%	36.81%	52.27%
13	16.02%	28.84%	36.83%	52.29%
14	11.59%	29.90%	37.84%	52.31%
15	12.47%	30.87%	38.14%	52.33%
16	13.37%	22.26%	38.91%	52.35%
17	14.22%	23.16%	39.62%	52.37%
18	11.07%	24.01%	40.27%	52.39%
19	11.76%	24.63%	40.38%	52.41%
20	12.47%	25.38%	40.95%	52.47%

Familias	MODELO i10POWER			
	Velocidad Media [m/s]			
	4.398	6	8	10
1	8.37%	23.05%	41.91%	59.46%
2	8.38%	23.05%	41.91%	59.47%
3	8.40%	23.06%	41.92%	59.47%
4	8.41%	23.07%	41.93%	59.48%
5	8.42%	23.08%	41.94%	59.49%
6	8.43%	23.09%	41.95%	59.50%
7	8.45%	23.10%	41.95%	59.50%
8	8.46%	23.11%	41.96%	59.51%
9	8.47%	23.11%	41.97%	59.52%
10	8.84%	23.12%	41.98%	59.53%
11	10.06%	23.13%	41.99%	59.54%
12	11.25%	23.14%	41.99%	59.54%
13	12.35%	23.15%	42.00%	59.55%
14	13.37%	23.16%	42.01%	59.56%
15	14.24%	23.17%	42.02%	59.57%
16	15.14%	23.18%	42.02%	59.58%
17	15.98%	23.18%	42.03%	59.58%
18	16.69%	23.19%	42.04%	59.59%
19	17.45%	23.20%	42.05%	59.60%
20	8.80%	23.21%	42.06%	59.61%

Tabla 43 Análisis costo beneficio para un precio de electricidad de 5\$/Kw-hr

Familias	MODELO iPOWER			
	Velocidad Media [m/s]			
	4.398	6	8	10
1	11.23%	22.33%	35.60%	48.35%
2	14.14%	22.38%	35.64%	48.39%
3	20.36%	23.21%	35.69%	48.43%
4	14.14%	28.08%	35.73%	48.48%
5	11.47%	31.92%	37.14%	48.52%
6	14.14%	23.21%	40.23%	48.57%
7	12.18%	25.80%	42.74%	49.61%
8	14.14%	27.66%	43.73%	51.35%
9	12.59%	23.21%	45.53%	52.79%
10	11.47%	24.70%	37.14%	53.99%
11	12.86%	26.32%	38.77%	53.77%
12	11.88%	23.01%	40.23%	54.71%
13	13.05%	24.35%	40.96%	49.44%
14	12.18%	25.60%	35.95%	49.61%
15	11.47%	23.05%	37.14%	50.53%
16	12.41%	24.13%	38.25%	51.35%
17	11.76%	24.98%	38.87%	52.10%
18	12.54%	23.08%	39.83%	52.09%
19	11.99%	23.84%	36.25%	52.73%
20	11.47%	24.70%	37.14%	49.50%

Familias	MODELO i5POWER			
	Velocidad Media [m/s]			
	4.398	6	8	10
1	14.43%	27.33%	45.34%	64.56%
2	14.45%	27.35%	45.36%	64.58%
3	14.48%	27.37%	45.38%	64.60%
4	14.51%	27.39%	45.40%	64.62%
5	16.53%	27.41%	45.42%	64.64%
6	19.37%	27.43%	45.44%	64.66%
7	21.83%	27.45%	45.46%	64.68%
8	24.01%	28.09%	45.48%	64.70%
9	15.06%	30.14%	45.50%	64.72%
10	16.53%	31.53%	45.52%	64.74%
11	18.00%	33.18%	45.54%	64.76%
12	19.37%	34.68%	45.56%	64.78%
13	20.49%	35.62%	45.58%	64.80%
14	15.57%	36.89%	46.81%	64.82%
15	16.53%	38.05%	47.13%	64.84%
16	17.53%	27.88%	48.06%	64.86%
17	18.47%	28.93%	48.90%	64.88%
18	15.00%	29.92%	49.68%	64.90%
19	15.75%	30.64%	49.79%	64.92%
20	16.53%	31.53%	50.47%	64.96%

Familias	MODELO i5POWER			
	Velocidad Media [m/s]			
	4.398	6	8	10
1	12.07%	28.85%	51.93%	73.80%
2	12.08%	28.86%	51.94%	73.81%
3	12.09%	28.87%	51.95%	73.81%
4	12.10%	28.88%	51.95%	73.82%
5	12.12%	28.89%	51.96%	73.83%
6	12.13%	28.90%	51.97%	73.84%
7	12.14%	28.90%	51.98%	73.85%
8	12.15%	28.91%	51.98%	73.85%
9	12.16%	28.92%	51.99%	73.86%
10	12.55%	28.93%	52.00%	73.87%
11	13.86%	28.94%	52.01%	73.88%
12	15.16%	28.94%	52.02%	73.89%
13	16.37%	28.95%	52.02%	73.89%
14	17.50%	28.96%	52.03%	73.90%
15	18.46%	28.97%	52.04%	73.91%
16	19.47%	28.98%	52.05%	73.92%
17	20.43%	28.99%	52.06%	73.92%
18	21.22%	28.99%	52.06%	73.93%
19	22.09%	29.00%	52.07%	73.94%
20	12.50%	29.01%	52.08%	73.95%

ANEXO G. Plataforma Tecnológica

Sistema de Evaluación Energética Evaluación Climática



Ubicación:

- Cozumel
- Eco Guardas
- Humilpan
- La rumorosa
- Mérida
- San Juanico
- Presa Allende
- Zihuatanejo

Estación:

Estado:

Latitud:

Longitud:

Altitud:

Mes	Pres. [mmHg]	Prec. [mm]	Vel. [m/s]	Rad. [W/m ²]	Densidad [Kg/m ³]
Ene.					
Feb.					
Mar.					
Abr.					
May.					
Jun.					
Jul.					
Ago.					
Sep.					
Oct.					
Nov.					
Dic.					
Prom. Anual					

Sistema de Evaluación Energética Evaluación Climática



Ubicación:

Estación:

Estado:

Latitud:

Longitud:

Altitud:

Mes	Temp. [C]	Hum. Rel. [%]	Pres. [mmHg]	Prec. [mm]	Vel. [m/s]	Rad. [W/m ²]	Densidad [Kg/m ³]
Ene.	7.37	59.70	655.68	251.00	4.36	314.88	1.086
Feb.	7.02	70.72	655.37	98.07	4.18	385.52	1.087
Mar.	8.29	59.31	656.45	33.56	4.74	485.34	1.084
Abr.	9.28	66.00	655.01	58.77	4.6	521.2	1.078
May.	12.86	52.45	655.62	0.00	4.26	606.45	1.065
Jun.	18.86	43.24	656.00	0.00	3.89	609.89	1.044
Jul.	22.83	38.99	656.14	3.03	3.73	566.38	1.030
Ago.	22.21	39.13	655.96	1.25	3.59	537.1	1.032
Sep.	19.81	39.48	655.65	9.87	3.62	533.54	1.040
Oct.	13.41	68.58	657.50	86.45	3.7	401.27	1.066
Nov.	8.56	54.47	657.79	22.82	4.69	382.77	1.085
Dic.	8.05	63.20	656.81	96.38	4.31	280.45	1.085
Prom. Anual	13.21	54.60	656.17	55.10	4.14	468.73	1.07

Figura 49 Sistema de Evaluación Energética, "Evaluación climática"

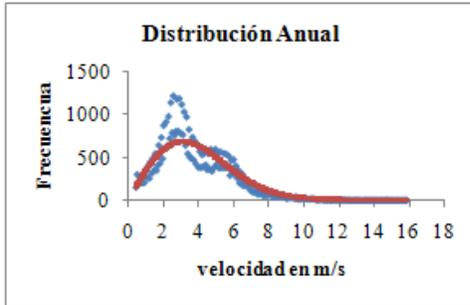
Sistema de Evaluación Energética
Distribución del Viento y Rosa de los Vientos



Ubicación: **La rumorosa**

Disponibilidad de datos en intervalos de 10min.

Datos	51243	
Valor máximo	15.86	[m/s]
Valor mínimo	0.39	[m/s]
Constante C	4.398	[m/s]
Constante K	2.00	[--]
sigma	3.11	



Datos Totales	52560	
Promedio de velocidad	3.65	[m/s]
En calma (v<1)	1222	
Frec. de vientos en calma	2.34%	
Disponibilidad de datos	99.53%	
Datos incompletos	245	
Datos totales usados	52315	

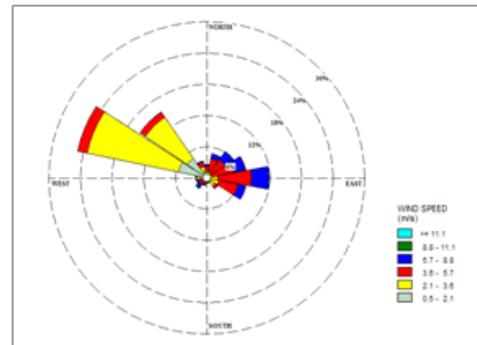


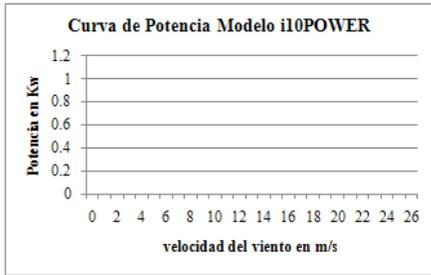
Figura 50 Sistema de Evaluación Energética “Distribución del viento y Rosa de los vientos”

Sistema de Evaluación Energética
Selección de generadores y paneles solares



Generador: **i10POWER**

Modelo:	i10POWER	
Fabricante:	INNOVA Wind Power	
Diámetro rotor:		m
Dimensiones de la torre:		m
Potencia Nominal:		Kw
Voltaje:		v
Tipo de conexión:	Carga de baterías	
Velocidad de conexión:		m/s
Velocidad de potencia nominal:		m/s
Velocidad de corte:		m/s



Velocidad	Potencia [Kw]
0	
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	
21	
22	
23	
24	
25	
26	

Panel Solar: **PFV8012**

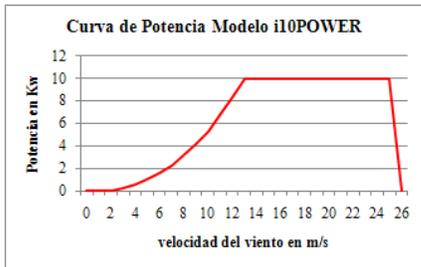
Modelo	PFV8012	
Máxima Potencia		Watts
Voltaje Nominal		Vcd
Voltaje Máximo		Vcd
Corriente máximo		Amp
Voltaje de Cto. Abierto		Vcd
Corriente de corto circuito		Amp
Eficiencia		%
Dimensiones		cm
Peso		Kg

Sistema de Evaluación Energética
Selección de generadores y paneles solares



Generador: **i10POWER**

Modelo:	i10POWER	
Fabricante:	INNOVA Wind Power	
Diámetro rotor:	7	m
Dimensiones de la torre:	24	m
Potencia Nominal:	10	Kw
Voltaje:	12,24,48	v
Tipo de conexión:	Carga de baterías	
Velocidad de conexión:	3	m/s
Velocidad de potencia nominal:	13	m/s
Velocidad de corte:	25	m/s



Velocidad	Potencia [Kw]
0	0
1	0
2	0
3	0.30
4	0.60
5	1.02
6	1.57
7	2.28
8	3.13
9	4.15
10	5.34
11	6.71
12	8.26
13	10.00
14	10.00
15	10.00
16	10.00
17	10.00
18	10.00
19	10.00
20	10.00
21	10.00
22	10.00
23	10.00
24	10.00
25	10.00
26	0

Panel Solar: **PFV8012**

Modelo	PFV8012	
Máxima Potencia	80	Watts
Voltaje Nominal	12	Vcd
Voltaje Máximo	14.4	Vcd
Corriente máximo	6.6	Amp
Voltaje de Cto. Abierto	21	Vcd
Corriente de corto circuito	33.4	Amp
Eficiencia	10.2	%
Dimensiones	102.5 x 97 x 5	cm
Peso	10.5	Kg

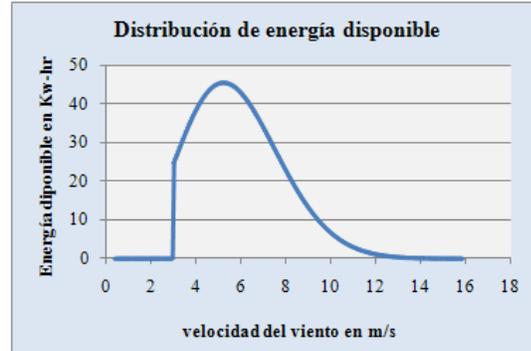
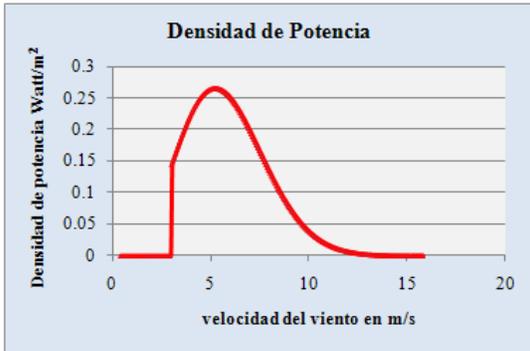
Figura 51 Sistema de Evaluación Energética “Selección de generadores y paneles solares”

Sistema de Evaluación Energética

Potencial eólico de la zona



Modelo: **i10POWER**
 Ubicación: **La rumorosa**
 Altura: **10** [m]
 Velocidad: **4.398** [m/s]



Densidad de Potencia: **20.20** [W/m²]
 Energía Disponible: **6810.99** Kw-hr anual
 Factor de carga: **7.78%** [---]
 Cp promedio: **0.14** [---]

Figura 52 Sistema de Evaluación Energética “Evaluación técnica, potencial eólico de la zona”

Sistema de Evaluación Energética

Evaluación Económica



Altura: **24** [m]
 Velocidad Promedio: **4.398** [m/s]
 Modelo generador: **i10POWER**
 Modelo panel solar: **PFV8012**

Costo de instalación: **4,671.80 €**
 Costos de mantenimiento: **700.77 €** anual
 Financiamiento gobierno: **50%**
 Tasa de interés: **10%** anual
 Inflación: **5%** anual
 Precio CO₂: **5** USD/Ton
 Watts adicionales: **0.00** [Kw-hr]

Lista de precios	Precio	Porcentaje
Aerogenerador	14,371.00 €	30.76%
Controlador de voltaje	1,527.00 €	3.27%
Inversor Phonix	9,655.00 €	20.67%
Torre 18m	15,645.00 €	33.49%
Pack de baterias Rolls Led Acid 24 V 400Ah	5,520.00 €	11.82%
Total	46,718.00 €	100.00%



Sector	Doméstico	
Precio al 2009	3	5 Kw/hr
Consumo por persona	265	Kw-hr/persona-año
Número de familias	16	familia
Número de integrantes	4	persona
Consumo por familia	1060	kw-hr/familia-año
ENERGÍA REQUERIDA	16960	kw-hr/familia-año
Número de generadores	1	generadores
Paneles solares	24	paneles
Energía Entregada por generador	9031.11	kw-hr /año
Energía entregada sistema eólico	9031.11	kw-hr /año
Energía entregada sistema solar	7698.24	kw-hr /año

TIR: **16.25%**
 Tiempo de recuperación: **6.2** años
 Inversión por familia: **1,871.79 €**

EL PROYECTO ES FACTIBLE

Figura 53 Sistema de Evaluación Energética “Evaluación Económica”

ANEXO H. Cálculo de densidad de potencia y energía

Tabla 44 Cálculo de densidad de potencia y energía para el modelo i10POWER a 10 m.

Clases	Lim Inf	Lim Sup	Marca de clase	Probabilidad	Horas	Curva de Potencia[Kw]	Densidad de potencia[W/m2]	Energía [Kw-hr]
1	0.394	0.463	0.429	0.0030181	26.439	0.0	0.0000	0.000
2	0.463	0.531	0.497	0.0034869	30.546	0.0	0.0000	0.000
3	0.531	0.600	0.565	0.0039505	34.606	0.0	0.0000	0.000
4	0.600	0.668	0.634	0.0044082	38.616	0.0	0.0000	0.000
5	0.668	0.737	0.702	0.0048595	42.569	0.0	0.0000	0.000
6	0.737	0.805	0.771	0.0053037	46.461	0.0	0.0000	0.000
7	0.805	0.873	0.839	0.0057403	50.285	0.0	0.0000	0.000
8	0.873	0.942	0.908	0.0061686	54.037	0.0	0.0000	0.000
9	0.942	1.010	0.976	0.0065881	57.712	0.0	0.0000	0.000
10	1.010	1.079	1.044	0.0069983	61.305	0.0	0.0000	0.000
11	1.079	1.147	1.113	0.0073986	64.812	0.0	0.0000	0.000
12	1.147	1.215	1.181	0.0077886	68.228	0.0	0.0000	0.000
13	1.215	1.284	1.250	0.0081678	71.550	0.0	0.0000	0.000
14	1.284	1.352	1.318	0.0085357	74.772	0.0	0.0000	0.000
15	1.352	1.421	1.386	0.0088919	77.893	0.0	0.0000	0.000
16	1.421	1.489	1.455	0.0092360	80.907	0.0	0.0000	0.000
17	1.489	1.557	1.523	0.0095676	83.812	0.0	0.0000	0.000
18	1.557	1.626	1.592	0.0098864	86.605	0.0	0.0000	0.000
19	1.626	1.694	1.660	0.0101921	89.283	0.0	0.0000	0.000
20	1.694	1.763	1.728	0.0104844	91.843	0.0	0.0000	0.000
21	1.763	1.831	1.797	0.0107630	94.284	0.0	0.0000	0.000
22	1.831	1.900	1.865	0.0110277	96.603	0.0	0.0000	0.000
23	1.900	1.968	1.934	0.0112783	98.798	0.0	0.0000	0.000
24	1.968	2.036	2.002	0.0115147	100.869	0.0	0.0000	0.000
25	2.036	2.105	2.071	0.0117367	102.813	0.0	0.0000	0.000
26	2.105	2.173	2.139	0.0119441	104.630	0.0	0.0000	0.000
27	2.173	2.242	2.207	0.0121369	106.320	0.0	0.0000	0.000
28	2.242	2.310	2.276	0.0123151	107.881	0.0	0.0000	0.000
29	2.310	2.378	2.344	0.0124787	109.313	0.0	0.0000	0.000
30	2.378	2.447	2.413	0.0126275	110.617	0.0	0.0000	0.000
31	2.447	2.515	2.481	0.0127618	111.793	0.0	0.0000	0.000
32	2.515	2.584	2.549	0.0128814	112.841	0.0	0.0000	0.000
33	2.584	2.652	2.618	0.0129866	113.763	0.0	0.0000	0.000
34	2.652	2.720	2.686	0.0130774	114.558	0.0	0.0000	0.000
35	2.720	2.789	2.755	0.0131540	115.229	0.0	0.0000	0.000
36	2.789	2.857	2.823	0.0132165	115.776	0.0	0.0000	0.000
37	2.857	2.926	2.891	0.0132651	116.202	0.0	0.0000	0.000
38	2.926	2.994	2.960	0.0133000	116.508	0.0	0.0000	0.000
39	2.994	3.063	3.028	0.0133215	116.697	0.3	0.1062	35.800
40	3.063	3.131	3.097	0.0133299	116.770	0.3	0.1121	37.788
41	3.131	3.199	3.165	0.0133253	116.729	0.3	0.1181	39.802
42	3.199	3.268	3.234	0.0133081	116.579	0.4	0.1241	41.836
43	3.268	3.336	3.302	0.0132785	116.320	0.4	0.1302	43.886
44	3.336	3.405	3.370	0.0132370	115.956	0.4	0.1363	45.947
45	3.405	3.473	3.439	0.0131838	115.490	0.4	0.1424	48.015

Clases	Lim Inf	Lim Sup	Marca de clase	Probabilidad	Horas	Curva de Potencia[Kw]	Densidad de potencia[W/m2]	Energía [Kw-hr]
46	3.473	3.541	3.507	0.0131193	114.925	0.4	0.1486	50.085
47	3.541	3.610	3.576	0.0130439	114.265	0.5	0.1547	52.152
48	3.610	3.678	3.644	0.0129580	113.512	0.5	0.1608	54.210
49	3.678	3.747	3.712	0.0128619	112.670	0.5	0.1669	56.255
50	3.747	3.815	3.781	0.0127560	111.742	0.5	0.1729	58.282
51	3.815	3.883	3.849	0.0126407	110.733	0.5	0.1788	60.286
52	3.883	3.952	3.918	0.0125166	109.645	0.6	0.1847	62.263
53	3.952	4.020	3.986	0.0123839	108.483	0.6	0.1905	64.206
54	4.020	4.089	4.054	0.0122431	107.249	0.6	0.1961	66.113
55	4.089	4.157	4.123	0.0120946	105.949	0.6	0.2016	67.977
56	4.157	4.226	4.191	0.0119389	104.585	0.7	0.2070	69.795
57	4.226	4.294	4.260	0.0117764	103.162	0.7	0.2123	71.563
58	4.294	4.362	4.328	0.0116076	101.682	0.7	0.2174	73.276
59	4.362	4.431	4.397	0.0114327	100.151	0.7	0.2223	74.931
60	4.431	4.499	4.465	0.0112524	98.571	0.8	0.2270	76.523
61	4.499	4.568	4.533	0.0110670	96.947	0.8	0.2315	78.049
62	4.568	4.636	4.602	0.0108770	95.282	0.8	0.2358	79.506
63	4.636	4.704	4.670	0.0106827	93.580	0.9	0.2399	80.890
64	4.704	4.773	4.739	0.0104845	91.844	0.9	0.2438	82.199
65	4.773	4.841	4.807	0.0102830	90.079	0.9	0.2475	83.430
66	4.841	4.910	4.875	0.0100784	88.287	1.0	0.2509	84.581
67	4.910	4.978	4.944	0.0098712	86.472	1.0	0.2541	85.649
68	4.978	5.046	5.012	0.0096618	84.637	1.0	0.2570	86.633
69	5.046	5.115	5.081	0.0094505	82.786	1.1	0.2596	87.530
70	5.115	5.183	5.149	0.0092377	80.922	1.1	0.2620	88.340
71	5.183	5.252	5.217	0.0090237	79.048	1.1	0.2642	89.061
72	5.252	5.320	5.286	0.0088090	77.166	1.2	0.2661	89.692
73	5.320	5.389	5.354	0.0085937	75.281	1.2	0.2677	90.233
74	5.389	5.457	5.423	0.0083784	73.395	1.2	0.2690	90.684
75	5.457	5.525	5.491	0.0081632	71.509	1.3	0.2701	91.044
76	5.525	5.594	5.560	0.0079485	69.628	1.3	0.2709	91.313
77	5.594	5.662	5.628	0.0077345	67.754	1.4	0.2714	91.492
78	5.662	5.731	5.696	0.0075215	65.889	1.4	0.2717	91.581
79	5.731	5.799	5.765	0.0073099	64.035	1.4	0.2717	91.581
80	5.799	5.867	5.833	0.0070998	62.194	1.5	0.2714	91.494
81	5.867	5.936	5.902	0.0068914	60.369	1.5	0.2709	91.320
82	5.936	6.004	5.970	0.0066851	58.561	1.6	0.2701	91.061
83	6.004	6.073	6.038	0.0064809	56.773	1.6	0.2691	90.719
84	6.073	6.141	6.107	0.0062792	55.006	1.6	0.2678	90.295
85	6.141	6.209	6.175	0.0060801	53.261	1.7	0.2663	89.792
86	6.209	6.278	6.244	0.0058837	51.541	1.7	0.2646	89.212
87	6.278	6.346	6.312	0.0056902	49.846	1.8	0.2627	88.556
88	6.346	6.415	6.380	0.0054998	48.179	1.8	0.2605	87.828
89	6.415	6.483	6.449	0.0053127	46.539	1.9	0.2582	87.030
90	6.483	6.552	6.517	0.0051288	44.928	1.9	0.2556	86.166
91	6.552	6.620	6.586	0.0049484	43.348	2.0	0.2528	85.236
92	6.620	6.688	6.654	0.0047715	41.798	2.0	0.2499	84.246
93	6.688	6.757	6.723	0.0045982	40.280	2.1	0.2468	83.197
94	6.757	6.825	6.791	0.0044286	38.795	2.1	0.2435	82.093

Clases	Lim Inf	Lim Sup	Marca de clase	Probabilidad	Horas	Curva de Potencia[Kw]	Densidad de potencia[W/m2]	Energía [Kw-hr]
95	6.825	6.894	6.859	0.0042629	37.343	2.2	0.2401	80.936
96	6.894	6.962	6.928	0.0041009	35.924	2.2	0.2365	79.731
97	6.962	7.030	6.996	0.0039428	34.539	2.3	0.2328	78.480
98	7.030	7.099	7.065	0.0037886	33.188	2.3	0.2290	77.186
99	7.099	7.167	7.133	0.0036383	31.872	2.4	0.2250	75.853
100	7.167	7.236	7.201	0.0034921	30.590	2.4	0.2209	74.484
101	7.236	7.304	7.270	0.0033497	29.344	2.5	0.2168	73.082
102	7.304	7.372	7.338	0.0032114	28.132	2.5	0.2125	71.651
103	7.372	7.441	7.407	0.0030770	26.954	2.6	0.2082	70.193
104	7.441	7.509	7.475	0.0029466	25.812	2.7	0.2038	68.711
105	7.509	7.578	7.543	0.0028201	24.704	2.7	0.1994	67.210
106	7.578	7.646	7.612	0.0026975	23.630	2.8	0.1949	65.691
107	7.646	7.715	7.680	0.0025788	22.590	2.8	0.1903	64.159
108	7.715	7.783	7.749	0.0024639	21.584	2.9	0.1857	62.615
109	7.783	7.851	7.817	0.0023528	20.611	3.0	0.1811	61.063
110	7.851	7.920	7.886	0.0022455	19.671	3.0	0.1765	59.505
111	7.920	7.988	7.954	0.0021419	18.763	3.1	0.1719	57.944
112	7.988	8.057	8.022	0.0020420	17.888	3.2	0.1672	56.383
113	8.057	8.125	8.091	0.0019456	17.043	3.2	0.1626	54.824
114	8.125	8.193	8.159	0.0018528	16.230	3.3	0.1580	53.269
115	8.193	8.262	8.228	0.0017634	15.447	3.3	0.1534	51.722
116	8.262	8.330	8.296	0.0016774	14.694	3.4	0.1489	50.183
117	8.330	8.399	8.364	0.0015947	13.969	3.5	0.1443	48.656
118	8.399	8.467	8.433	0.0015153	13.274	3.6	0.1398	47.141
119	8.467	8.535	8.501	0.0014390	12.606	3.6	0.1354	45.642
120	8.535	8.604	8.570	0.0013658	11.965	3.7	0.1310	44.160
121	8.604	8.672	8.638	0.0012957	11.350	3.8	0.1266	42.695
122	8.672	8.741	8.707	0.0012284	10.761	3.8	0.1224	41.251
123	8.741	8.809	8.775	0.0011641	10.197	3.9	0.1181	39.828
124	8.809	8.878	8.843	0.0011025	9.658	4.0	0.1140	38.428
125	8.878	8.946	8.912	0.0010436	9.142	4.1	0.1099	37.052
126	8.946	9.014	8.980	0.0009873	8.649	4.1	0.1059	35.700
127	9.014	9.083	9.049	0.0009336	8.178	4.2	0.1020	34.375
128	9.083	9.151	9.117	0.0008823	7.729	4.3	0.0981	33.077
129	9.151	9.220	9.185	0.0008333	7.300	4.4	0.0943	31.806
130	9.220	9.288	9.254	0.0007867	6.891	4.4	0.0907	30.563
131	9.288	9.356	9.322	0.0007423	6.502	4.5	0.0871	29.350
132	9.356	9.425	9.391	0.0007000	6.132	4.6	0.0835	28.166
133	9.425	9.493	9.459	0.0006597	5.779	4.7	0.0801	27.012
134	9.493	9.562	9.527	0.0006215	5.444	4.8	0.0768	25.888
135	9.562	9.630	9.596	0.0005851	5.126	4.8	0.0735	24.795
136	9.630	9.698	9.664	0.0005506	4.824	4.9	0.0704	23.732
137	9.698	9.767	9.733	0.0005179	4.537	5.0	0.0673	22.700
138	9.767	9.835	9.801	0.0004868	4.265	5.1	0.0644	21.699
139	9.835	9.904	9.870	0.0004574	4.007	5.2	0.0615	20.729
140	9.904	9.972	9.938	0.0004295	3.762	5.3	0.0587	19.789
141	9.972	10.041	10.006	0.0004031	3.531	5.3	0.0560	18.880
142	10.041	10.109	10.075	0.0003781	3.312	5.4	0.0534	18.001
143	10.109	10.177	10.143	0.0003545	3.105	5.5	0.0509	17.152
144	10.177	10.246	10.212	0.0003322	2.910	5.6	0.0484	16.333

Clases	Lim Inf	Lim Sup	Marca de clase	Probabilidad	Horas	Curva de Potencia[Kw]	Densidad de potencia[W/m2]	Energía [Kw-hr]
145	10.246	10.314	10.280	0.0003111	2.725	5.7	0.0461	15.543
146	10.314	10.383	10.348	0.0002912	2.551	5.8	0.0438	14.782
147	10.383	10.451	10.417	0.0002725	2.387	5.9	0.0417	14.049
148	10.451	10.519	10.485	0.0002548	2.232	6.0	0.0396	13.344
149	10.519	10.588	10.554	0.0002381	2.086	6.1	0.0376	12.667
150	10.588	10.656	10.622	0.0002224	1.948	6.2	0.0356	12.016
151	10.656	10.725	10.690	0.0002077	1.819	6.3	0.0338	11.392
152	10.725	10.793	10.759	0.0001938	1.697	6.4	0.0320	10.794
153	10.793	10.861	10.827	0.0001807	1.583	6.5	0.0303	10.221
154	10.861	10.930	10.896	0.0001685	1.476	6.6	0.0287	9.672
155	10.930	10.998	10.964	0.0001569	1.375	6.7	0.0271	9.147
156	10.998	11.067	11.033	0.0001461	1.280	6.8	0.0256	8.645
157	11.067	11.135	11.101	0.0001360	1.192	6.9	0.0242	8.166
158	11.135	11.204	11.169	0.0001265	1.108	7.0	0.0229	7.709
159	11.204	11.272	11.238	0.0001176	1.031	7.1	0.0216	7.273
160	11.272	11.340	11.306	0.0001093	0.958	7.2	0.0203	6.857
161	11.340	11.409	11.375	0.0001015	0.889	7.3	0.0192	6.461
162	11.409	11.477	11.443	0.0000943	0.826	7.4	0.0180	6.085
163	11.477	11.546	11.511	0.0000875	0.766	7.5	0.0170	5.726
164	11.546	11.614	11.580	0.0000811	0.710	7.6	0.0160	5.386
165	11.614	11.682	11.648	0.0000752	0.658	7.7	0.0150	5.063
166	11.682	11.751	11.717	0.0000696	0.610	7.8	0.0141	4.757
167	11.751	11.819	11.785	0.0000645	0.565	7.9	0.0132	4.466
168	11.819	11.888	11.853	0.0000597	0.523	8.0	0.0124	4.191
169	11.888	11.956	11.922	0.0000552	0.483	8.1	0.0117	3.930
170	11.956	12.024	11.990	0.0000510	0.447	8.2	0.0109	3.683
171	12.024	12.093	12.059	0.0000471	0.413	8.4	0.0102	3.450
172	12.093	12.161	12.127	0.0000435	0.381	8.5	0.0096	3.229
173	12.161	12.230	12.196	0.0000402	0.352	8.6	0.0090	3.021
174	12.230	12.298	12.264	0.0000371	0.325	8.7	0.0084	2.825
175	12.298	12.367	12.332	0.0000342	0.300	8.8	0.0078	2.640
176	12.367	12.435	12.401	0.0000315	0.276	8.9	0.0073	2.466
177	12.435	12.503	12.469	0.0000290	0.254	9.0	0.0068	2.301
178	12.503	12.572	12.538	0.0000267	0.234	9.2	0.0064	2.147
179	12.572	12.640	12.606	0.0000246	0.215	9.3	0.0059	2.001
180	12.640	12.709	12.674	0.0000226	0.198	9.4	0.0055	1.865
181	12.709	12.777	12.743	0.0000208	0.182	9.5	0.0052	1.737
182	12.777	12.845	12.811	0.0000191	0.167	9.7	0.0048	1.616
183	12.845	12.914	12.880	0.0000176	0.154	9.8	0.0045	1.503
184	12.914	12.982	12.948	0.0000161	0.141	9.9	0.0041	1.397
185	12.982	13.051	13.016	0.0000148	0.129	10.0	0.0038	1.295
186	13.051	13.119	13.085	0.0000136	0.119	10.0	0.0035	1.187
187	13.119	13.187	13.153	0.0000124	0.109	10.0	0.0032	1.088
188	13.187	13.256	13.222	0.0000114	0.100	10.0	0.0030	0.997
189	13.256	13.324	13.290	0.0000104	0.091	10.0	0.0027	0.913
190	13.324	13.393	13.359	0.0000095	0.084	10.0	0.0025	0.835
191	13.393	13.461	13.427	0.0000087	0.076	10.0	0.0023	0.764
192	13.461	13.530	13.495	0.0000080	0.070	10.0	0.0021	0.698
193	13.530	13.598	13.564	0.0000073	0.064	10.0	0.0019	0.638

Clases	Lim Inf	Lim Sup	Marca de clase	Probabilidad	Horas	Curva de Potencia[Kw]	Densidad de potencia[W/m2]	Energía [Kw-hr]
194	13.598	13.666	13.632	0.0000067	0.058	10.0	0.0017	0.583
195	13.666	13.735	13.701	0.0000061	0.053	10.0	0.0016	0.532
196	13.735	13.803	13.769	0.0000055	0.049	10.0	0.0014	0.485
197	13.803	13.872	13.837	0.0000051	0.044	10.0	0.0013	0.442
198	13.872	13.940	13.906	0.0000046	0.040	10.0	0.0012	0.403
199	13.940	14.008	13.974	0.0000042	0.037	10.0	0.0011	0.367
200	14.008	14.077	14.043	0.0000038	0.033	10.0	0.0010	0.334
201	14.077	14.145	14.111	0.0000035	0.030	10.0	0.0009	0.304
202	14.145	14.214	14.179	0.0000032	0.028	10.0	0.0008	0.277
203	14.214	14.282	14.248	0.0000029	0.025	10.0	0.0007	0.252
204	14.282	14.350	14.316	0.0000026	0.023	10.0	0.0007	0.229
205	14.350	14.419	14.385	0.0000024	0.021	10.0	0.0006	0.208
206	14.419	14.487	14.453	0.0000022	0.019	10.0	0.0006	0.189
207	14.487	14.556	14.522	0.0000020	0.017	10.0	0.0005	0.171
208	14.556	14.624	14.590	0.0000018	0.016	10.0	0.0005	0.155
209	14.624	14.693	14.658	0.0000016	0.014	10.0	0.0004	0.141
210	14.693	14.761	14.727	0.0000015	0.013	10.0	0.0004	0.127
211	14.761	14.829	14.795	0.0000013	0.012	10.0	0.0003	0.115
212	14.829	14.898	14.864	0.0000012	0.010	10.0	0.0003	0.104
213	14.898	14.966	14.932	0.0000011	0.009	10.0	0.0003	0.094
214	14.966	15.035	15.000	0.0000010	0.009	10.0	0.0003	0.085
215	15.035	15.103	15.069	0.0000009	0.008	10.0	0.0002	0.077
216	15.103	15.171	15.137	0.0000008	0.007	10.0	0.0002	0.070
217	15.171	15.240	15.206	0.0000007	0.006	10.0	0.0002	0.063
218	15.240	15.308	15.274	0.0000006	0.006	10.0	0.0002	0.057
219	15.308	15.377	15.342	0.0000006	0.005	10.0	0.0002	0.051
220	15.377	15.445	15.411	0.0000005	0.005	10.0	0.0001	0.046
221	15.445	15.513	15.479	0.0000005	0.004	10.0	0.0001	0.042
222	15.513	15.582	15.548	0.0000004	0.004	10.0	0.0001	0.037
223	15.582	15.650	15.616	0.0000004	0.003	10.0	0.0001	0.034
224	15.650	15.719	15.685	0.0000003	0.003	10.0	0.0001	0.030
225	15.719	15.787	15.753	0.0000003	0.003	10.0	0.0001	0.027
226	15.787	15.856	15.821	0.0000003	0.002	10.0	0.0001	0.024
							20.20	6810.99
							Watt/m2	Kw Hr anual