



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA - PROCESOS Y USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA

Evaluación del recurso eólico para aerogeneradores de baja potencia: tiempo de muestreo y propagación de incertidumbres.

Tesis

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:

M. en I. Osvaldo Rodríguez Hernández

Tutor Principal:

Dr. Jesús Antonio del Río Portilla, IER UNAM

Comité Tutorial:

Dr. Manuel Martínez Fernández, IER UNAM

Dr. Jorge Alberto Andaverde Arredondo, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería

Dr. Óscar Alfredo Jaramillo Salgado, IER UNAM

Dra. María Elena Lárraga Ramírez, II UNAM

TEMIXCO, MORELOS, MÉXICO, Diciembre 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Manuel Martínez Fernández

Secretario: Dr. Jesús Antonio del Río Portilla

Vocal: Dr. Jorge Alberto Andaverde Arredondo

1er Suplente: Dr. Oscar Alfredo Jaramillo Salgado

2do Suplente: Dra. María Elena Lárraga Ramírez

Instituto de Energías Renovables

Tutor de tesis:
Dr. Jesús Antonio del Río Portilla

Firma



Resumen

El uso de aerogeneradores para aplicaciones de baja potencia es una alternativa para la generación de energía eléctrica limpia que contribuye a la mitigación del calentamiento global y al desarrollo sustentable. La correcta descripción de la velocidad del viento es crucial para determinar la viabilidad económica de un proyecto eólico. La técnica de muestreo utilizada en la evaluación del recurso se fundamenta en el trabajo de van der Hoven, que concluye que al usar la técnica de ensambles promedio la dispersión mínima de las velocidades ocurre entre 0.1 y 2 horas tiempo promedio. Estándares Internacionales en el ramo están también basados en dicho trabajo. Sin embargo, el estudio responde a condiciones de viento distintas a las intertropicales y son empleadas para aerogeneradores de gran potencia. Además, se ha demostrado que las evaluaciones del recurso que utilizan 0.5 o 1 hora de tiempo promedio conducen a una subestimación de la energía a producir. Este trabajo analiza la influencia del uso de diferentes tiempos promedio sobre la dispersión de los datos y la evaluación del recurso eólico, además estudia un tiempo promedio adecuado para aplicaciones de aerogeneradores de baja potencia que contribuya en el desarrollo de evaluaciones del recurso confiables. Encontramos una máxima dispersión en un tiempo promedio de un minuto. La región de vientos estables descrita por van der Hoven no fue encontrada en el análisis de la dispersión que aquí se presenta. El uso de este tiempo en la evaluación del recurso eólico en aerogeneradores de baja potencia detectará la mayor cantidad de cambios en las series de tiempo que pueden contribuir a la producción de energía. Las evaluaciones del recurso calculadas muestran que el uso de uno y diez minutos como tiempo promedio genera una diferencia en la estimación de la potencia de alrededor del 17%. Éste puede ser un factor que impida la penetración de aerogeneradores de baja potencia como abastecedoras de energía. También se presenta una metodología para desarrollar una estimación del error en la energía con base en el error asociado a la medición de la velocidad, la función de la densidad de probabilidad y la curva de potencia del aerogenerador. La metodología utiliza datos reales sin tratamiento estadístico previo y un catálogo de 28 curvas de potencia de aerogeneradores ajustado por el método de Lagrange para calcular la estimación de potencia del viento de salida y sus propagaciones de error correspondientes. Se encuentra que un porcentaje de error en velocidad del viento de 10%, se propaga en un 5% en las estimaciones de producción de energía. Errores del 5% y 2% en la medición conducen a una propagación de errores en la producción de energía que tienden al 2.5 y 1 por ciento respectivamente. La propagación que aquí se propone, complementa las evaluaciones tradicionales del recurso eólico. La estimación del error en la potencia de salida, permite calcular intervalos en el costo nivelado de generación o el tiempo de retorno de la inversión. La implementación de este método aumenta la confiabilidad de los estudios tecno-económicos.



Agradecimientos

Agradezco al Centro de Ciencias de la Complejidad por su apoyo.



Índice general

Índice general	IX
Índice de figuras	XI
Índice de tablas	XIII
Introducción	1
1 La energía eólica	5
1.1. Escenario 2GC	5
1.2. La energía eólica en México	6
1.3. Granjas eólicas vs aplicaciones eólicas baja potencia.	8
2 La energía eólica de baja potencia	11
2.1. Los aerogeneradores de baja potencia <i>ABP</i>	11
2.2. Capacidad instalada a nivel mundial	14
2.3. México y la energía eólica de baja potencia	14
3 Revisión de la literatura especializada sobre <i>ABP</i>	19
3.1. <i>ABP</i> factibilidad y evaluación del recurso	19
3.2. <i>ABP</i> en Edificaciones	21
3.3. Diseño de <i>ABP</i>	22
3.4. <i>ABP</i> diseños sencillos	23
3.5. Generadores de un <i>ABP</i>	24
3.6. El tiempo de muestreo en la evaluación del recurso	25
3.7. El error en la evaluación del recurso	27

4	Determinación de un Tiempo de Muestreo	31
4.1.	Introducción	31
4.2.	Dispersión de las velocidades	32
	Ensamble de promedios	32
	Espectro de las velocidades de viento	33
4.3.	Evaluación del recurso eólico	38
5	El error en la evaluación del recurso	43
5.1.	Introducción	43
5.2.	El recurso eólico y la propagación de incertidumbre	44
	Rayleigh <i>FDP</i>	46
	Curvas de potencia de <i>ABP</i>	47
5.3.	Error en la evaluación del recurso eólico	48
	Aplicación en los estudios de factibilidad tecno-económica	52
6	Conclusiones	55
	Bibliografía	57
A	Catálogo de curvas de potencia de <i>ABP</i>	63



Índice de figuras

1.1. Velocidades de viento, promedio anual.	7
1.2. Estimación potencia eléctrica anual	8
2.1. <i>ABP</i> capacidad total acumulada	13
2.2. Capacidad Mundial <i>ABP</i>	17
4.1. Espectro de velocidades de van der Hoven	34
4.2. Diagrama de flujo, programa Matlab	36
4.3. Primer resultado, serie de tiempo	37
4.4. Segundo resultado, espectro de la dispersión	38
4.5. Ejemplo de la evaluación del recurso	40
5.1. Rayleigh <i>FDP</i>	49
5.2. 28 evaluaciones del recurso eólico	50
5.3. Errores asociados a la evaluación del recurso	51
5.4. Coeficientes de correlación de Pearson entre polinomios y datos	51



Índice de tablas

4.1. Características técnicas de los <i>ABP</i> seleccionados	39
4.2. Evaluaciones del recurso para distintos tiempos promedio	40
4.3. Diferencias porcentuales entre distintos tiempos promedio	41
5.1. Tres curvas de potencia del catalogo de 28 <i>ABP</i>	48
A.1. Catálogo de 28 <i>ABP</i>	64



Introducción

La energía eólica en México tiene una de las proyecciones de crecimiento más prometedoras entre las renovables según indican los estudios recientes. México no es ajeno a la problemática entorno al calentamiento global y la construcción de un desarrollo sustentable, existe legislación y programas derivados entorno al uso de las energías renovables como abastecedoras de electricidad. Los cuales contemplan el desarrollo tecnológico y humano especializado involucrando en la cadena de abastecimiento eléctrico al beneficiario y los sectores vulnerables como elementos que fomentaran el desarrollo sustentable a largo plazo del país, ejemplo de ello es el programa *PSIE*, que pese a sus resultados moderadamente satisfactorios es un esfuerzo que involucra directamente a la sociedad en el círculo virtuoso de las energías renovables como motor del desarrollo sustentable.

Producto de la legislación actual en México, existen proyectos en el ámbito tecnológico de los *ABP*, sin embargo, se limitan al diseño, construcción y caracterización de los dispositivos y sus componentes. Se han dejado de lado los proyectos de evaluación del recurso orientados a este tipo de aplicaciones, estudios que son fundamentales para la implementación de *ABP* como abastecedores de energía. El trabajo que aquí se presenta es una metodología valiosa que contribuye en el desarrollo del uso de aerogeneradores de baja potencia en México que complementa los proyectos actuales en el país.

En este contexto, el trabajo aquí presentado estudia el proceso de la evaluación del recurso eólico para aplicaciones de baja potencia, para ello se estudia la influencia de distintos tiempos de muestreo en el cálculo de la energía que es posible producir, para ello: se determina el tiempo de muestreo adecuado en la estimación del recurso eólico, se analiza la influencia del uso de distintos tiempos de promedio en la evaluación del recurso eólico para un aerogenerador de baja potencia, se desarrolla una metodología para el cálculo de la incertidumbre en la evaluación del recurso eólico, y finalmente se desarrolla una metodología para el uso del error en la evaluación del recurso en los estudios de factibilidad tecno-económica.

En la primer parte del estudio se analiza el ensamble de promedios como técnica de muestreo en la evaluación del recurso eólico, se calcularon varios conjuntos de ensambles promedio a partir de un conjunto de datos y se analiza el comportamiento de la dispersión para determinar un tiempo de promedio adecuado para aplicaciones de *ABP*, además se estudia la influencia de la selección del tiempo de promedio en la evaluación del recurso eólico.

Objetivos del estudio

En este contexto, se plantean los siguientes objetivos del trabajo:

1. Determinar el tiempo de muestreo adecuado en la estimación del recurso eólico para aplicaciones de *ABP*.
2. Analizar la influencia del uso de distintos tiempos de promedio en la evaluación del recurso eólico para *ABP*.
3. Desarrollar una metodología para el cálculo de la incertidumbre en la evaluación del recurso eólico.
4. Desarrollar una metodología para el uso del error en la evaluación del recurso en los estudios de factibilidad tecno-económica.

Estructura del trabajo

Una vez detectados los principales problemas en la revisión bibliográfica se presenta una estructura de trabajo con la finalidad de establecer de una secuencia lógica que permita el cumplimiento de los objetivos antes planteados que concluya en un trabajo estructurado, integral y original.

1. *Determinación de la tasa de muestreo adecuada para ABP.*
Esta etapa del estudio tiene como objetivo determinar el muestreo óptimo para este tipo de aplicaciones. El tiempo de muestreo utilizado para aerogeneradores de gran potencia se basa en un estudio de la dispersión de los datos. Para determinar el tiempo de muestreo se plantea desarrollar un estudio para un conjunto de velocidades de viento, analizar la dispersión de las velocidades a distintos tiempos promedio.
2. *Estimación de la energía.*
Una vez que se cuenta con un conjunto de datos que representan de forma confiable las condiciones de viento del lugar y un aerogenerador seleccionado es posible determinar

la energía disponible y la generada. Complementario al tiempo de muestro es necesario comparar resultados entre evaluaciones del recurso realizadas utilizando ensamble de promedios a distintos intervalos de tiempo.

3. *Cálculo de la incertidumbre.*

Una de las necesidades detectadas en la revisión bibliográfica es la de calcular la incertidumbre asociada al cálculo de la energía. Con este resultado se podrá determinar si la diferencia entre evaluaciones a distintos tiempos promedio es significativa o no.

4. *Análisis de factibilidad tecno-económica.*

En esta etapa se conjuntan los elementos anteriores, tomando en cuenta la cantidad de energía generada, seleccionado un aerogenerador y tomando en cuenta la generación posible, se plantea el uso del error como un elemento más en los estudios de factibilidad tecno-económica.

Síntesis de resultados

Del análisis de la dispersión se encuentra que existe un máximo cercano de la zona del tiempo promedio de un minuto. Para evaluaciones del recurso eólico se propone el uso del tiempo promedio de un minuto para aplicaciones de *ABP* con la finalidad de detectar la mayor cantidad de cambios en la serie de tiempo, cambios que pueden contribuir en la producción de energía.

Del análisis del espectro de las dispersiones, la cantidad de información contenida en la serie de tiempo es alrededor de dos ordenes de magnitud que la descrita en trabajos previos. Además, la región de vientos estables descrita por van der Hoven no está presente en el análisis del espectro desarrollado en esta tesis, por lo tanto, el uso de los 10 minutos como tiempo para el ensamble de promedios no necesariamente representa las condiciones de operación para un aerogenerador.

Las evaluaciones del recurso eólico calculadas muestran que usar tiempos de promedio para los ensambles de uno y diez minutos genera una diferencia del 17% entre las evaluaciones del recurso correspondientes. Lo cual puede ser un factor que impida la penetración de esta fuente renovable de energía. También de la evaluación del recurso se demuestra que aunque se usen *ABP* de características técnicas similares las estimaciones del recurso eólico arrojan resultados diferentes, por lo tanto, existen al menos dos factores que deben ser tomados en consideración para tener evaluaciones confiables, la apropiada selección del aerogenerador y el tiempo de promedio para el ensamble.

La energía eólica.

Un camino al desarrollo sustentable

1.1. Escenario 2GC

Más de 100 países han adoptado un protocolo para limitar las emisiones de Gases Efecto Invernadero (*GEI*) con la finalidad de alcanzar un calentamiento global de no más de dos grados Celsius. Este compromiso es una proyección al año 2050 conocida como escenario 2GC. El establecer un límite de emisiones sirve como referencia para orientar todos los esfuerzos de mitigación y reducción de los riesgos, impactos y daños ocasionados por el cambio climático [1].

El escenario 2GC describe una matriz de producción de energía consistente con las trayectorias de emisiones que recientes investigaciones indican, darán un 80 % de probabilidades de limitar el incremento de la temperatura media del planeta en dos grados centígrados. [1]. El 2GC establece el objetivo de recortar las emisiones de *CO2* relacionadas con la producción de energía por más de la mitad para el 2050 (en comparación con el año 2009), dicho documento afirma que transformar el sector energético es vital mas no es la única solución, ya que el objetivo sólo puede ser alcanzado si el *CO2* y las emisiones de gas efecto invernadero en los sectores no relacionados con la producción energética son también reducidos. Sin embargo, fijar como objetivo un escenario 2GC implica la construcción e implementación de políticas que promuevan la disminución de las emisiones de *GEI*, tarea nada sencilla cuando hoy en día la humanidad se enfrenta a grandes problemas como la pobreza, la contaminación y paralelamente busca un crecimiento económico.

La generación de energía eléctrica históricamente sienta sus bases en el uso de combustibles fósiles que son los principales emisores de *GEI*. Por ejemplo, en el caso específico de México, más del 75 % de la producción eléctrica utiliza este tipo de combustibles[2]. Por lo tanto, ante la meta y límites establecidos en 2GC y la compleja realidad económica y social existe la necesidad de utilizar alternativas de generación eléctrica más limpias que conduzcan, no sólo, a un abastecimiento energético amigable con el medio ambiente, sino que contribuyan al desarrollo

económico y social, es decir, que construyan un desarrollo sustentable.

Las energías renovables naturalmente están asociadas al desarrollo sustentable, por lo tanto, adquiere importancia cualquier trabajo que promueva el uso de estas fuentes como abastecedoras de energía eléctrica limpia. Entre las renovables, la energía eólica es la que mayor crecimiento ha presentado en los últimos años en el ámbito internacional, desde el 2008 el desarrollo de esta fuente de energía se ha duplicado alcanzando una capacidad instalada acumulada de 300 GW, suficiente para cubrir el 2.5% de la demanda energética global. Este desarrollo es encabezado por China, Estados Unidos y Alemania con capacidades instaladas de 75, 60 y 31 GW respectivamente. Además, en países como Dinamarca, Portugal y España, la energía eólica satisface el 30, 20 y 18% de las necesidades energéticas por país respectivamente [3]. Dichos avances son posibles gracias al desarrollo de políticas que promuevan su uso haciéndolas competitivas con las fuentes tradicionales de energía.

1.2. La energía eólica en México

Según datos de la Secretaría de Energía [4], se han realizado estudios específicos para determinar el potencial eólico en algunas regiones donde es posible el desarrollo de proyectos eólicos, por ejemplo, el Istmo de Tehuantepec, las penínsulas de Yucatán y Baja California, y la región norte del Golfo de México. Tan sólo para Oaxaca los estudios del *National Renewable Energy Laboratory* de Estados Unidos y diversas instituciones mexicanas, estimaban un potencial teórico superior a los 40,000 MW en el 2010.

Estudios recientes [5] afirman que el potencial eólico de casi toda la República Mexicana, tiene cerca de 1,700 horas por año con velocidades de viento mayores a los 3 m/s como lo muestra la figura 1.1.

Dicho estudio mostró que México tiene la capacidad de producir más de 2000 kW por año de potencia eléctrica generado por aerogenerador instalado en casi todos los estados de la república con excepción del estado de Chiapas, como puede ser observado en la figura 1.2; cabe destacar que hay al menos seis estados de los 31 referidos donde la producción por aerogenerador instalado se incrementa a más de 5000 kW.

La misma *Prospectiva de energías renovables 2013-2014* [4] describió los desarrollos eólicos mexicanos, los cuales comenzaron con los proyectos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) Guerrero Negro (Puerto Viejo) y La Venta, inaugurados en 1982 y 1994 respectivamente, estos fueron los únicos proyectos hasta el año de 2009, cuando a partir del desarrollo de la primera temporada abierta de reserva de capacidad en el estado de Oaxaca se inauguraron múltiples proyectos eólicos con participación privada.

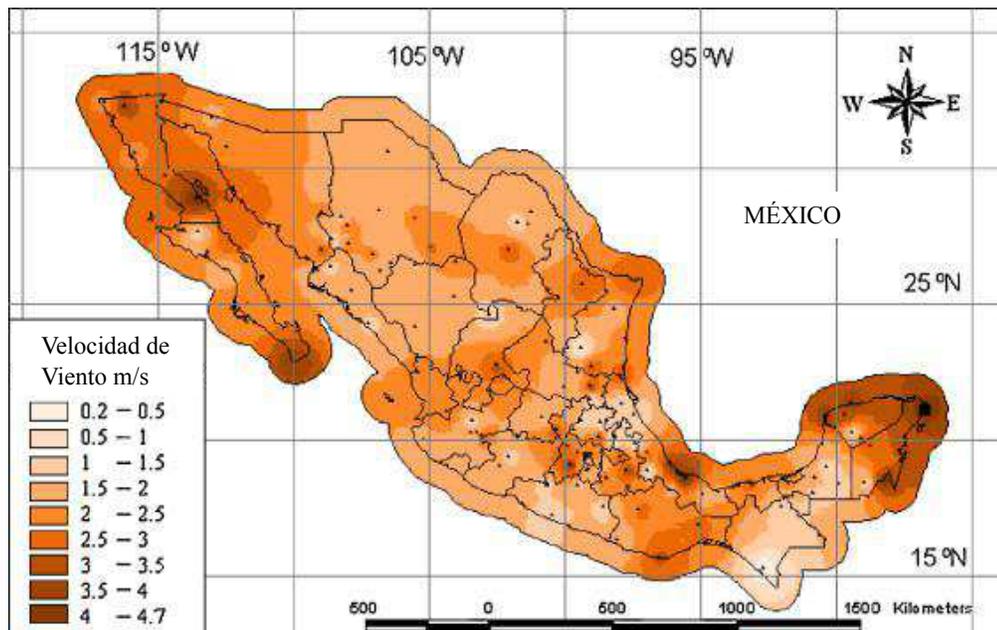


Figura 1.1: Velocidades de viento, promedio anual. (Figura tomada de [5])

En el servicio público, a partir de 2009 se desarrollaron cinco proyectos bajo el esquema de Productor Independiente de Energía, La Venta III y Oaxaca I, II, III y IV, adicionando 510 MW de capacidad al entrar en operación en 2012, los cuales representan el 85% de la capacidad efectiva de generación eléctrica eólica en el servicio público, el resto pertenecen a CFE, los datos anteriores no toman en cuenta la figura de autoabastecimiento de energía.

Hoy en día, según el *Balance Nacional de Energía 2012* [6] en México contamos con una capacidad efectiva de generación eléctrica de 598 MW, de los cuales tan solo 87 MW pertenecen a la CFE y el resto a Productores Independientes (PI). Adicionalmente se encuentran en construcción o por iniciar obras, 18 proyectos con una capacidad total de 1,778.15 MW que con los cuales se espera incrementen la capacidad hasta 2,923.2 MW en el corto plazo.

Para la generación eólica se prevé que en 2027 se alcance un nivel de generación de 33 GWh/año, lo cual representaría un crecimiento de cerca del 500% con respecto a 2013. Se espera que tan solo en 2017 la generación eólica alcance 21.5 GWh/año desde 12.9 GWh/año en 2016, como resultado de la entrada de los proyectos considerados en las temporadas abiertas.

El desarrollo de la energía eólica en México contempla únicamente la explotación del recurso a gran escala a partir de granjas eólicas. En sus inicios los desarrollos eólicos eran conducidos por la CFE, hoy en día la estrategia de desarrollo involucra en gran medida a la iniciativa privada, ya que el desarrollo de grandes granjas eólicas requiere grandes inversiones. Hecho que deja al alcance de unos pocos la participación en el desarrollo eólico del país. Sin embargo, la generación de energía mediante esta fuente renovable está compuesta de una vertiente que per-

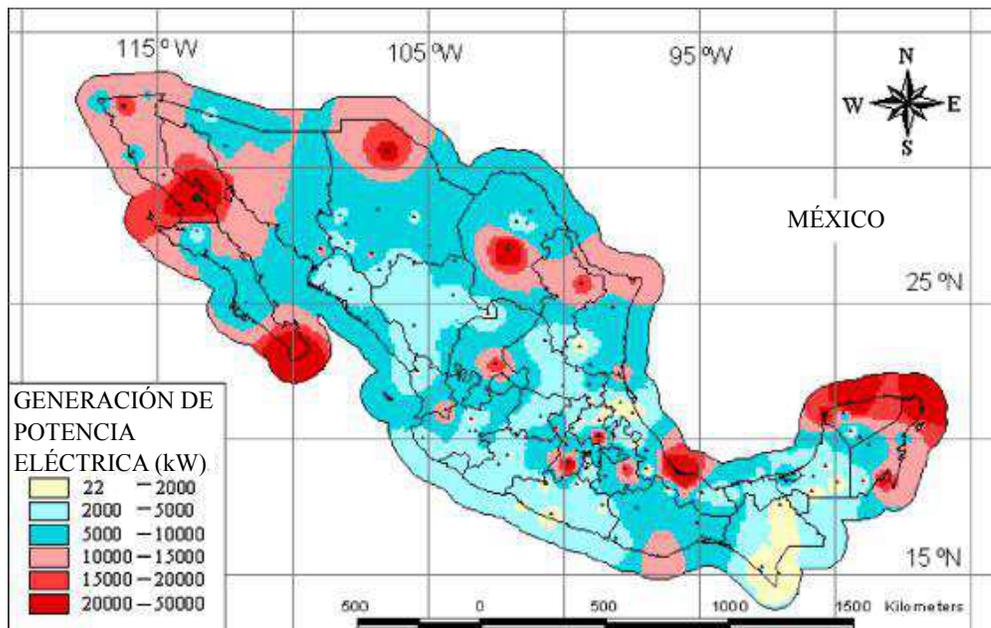


Figura 1.2: Potencia eléctrica que puede ser generada por año (figura tomada de [5]).

mite la participación directa de los usuarios finales, contribuye al abastecimiento eléctrico de las regiones alejadas a la red y genera un desarrollo sustentable con un mayor impacto social. Dicha vertiente contempla el uso de aerogeneradores de baja potencia como abastecedores de energía.

1.3. Granjas eólicas vs aplicaciones eólicas baja potencia.

El crecimiento de la capacidad instalada acumulada mundial de la energía eólica en los últimos años ha generado, una gran diversificación de los problemas técnicos en el área, esto pese a la simplicidad del principio básico de generación: el transformar la energía cinética del viento en potencia eléctrica.

Con la finalidad de producir costos competitivos de generación eléctrica en el mercado, la explotación de la energía eólica se desarrolla mediante la instalación de conjuntos de aerogeneradores de gran potencia en granjas eólicas con capacidades instaladas cada vez mayores. De tal forma que los retos en la industria eólica consisten en: diseñar aerogeneradores cada vez más grandes que operen a condiciones de viento estables, saber la cantidad energía que será posible producir, instalar, despachar, transmitir y consumir; tanto en los sistemas de tierra firme como en los instalados a mar abierto. Tarea nada sencilla ante la intermitencia del viento y las condiciones climáticas específicas.

Sin embargo, este no es el único camino para la explotación del recurso eólico. El crecimiento mundial de esta fuente renovable, ha promovido el uso de dispositivos de mucha menor potencia que principalmente complementan sistemas híbridos aislados a la red eléctrica o en el abastecimiento doméstico. Este tipo de aplicaciones también se han enfrentado a problemas técnicos como el diseño y el control de las velocidades de operación, el modelado y selección de los sistemas aislados, el diseño y la integración a las edificaciones o a la red eléctrica, ya sea de manera independiente o complementario con otras fuentes de energía renovables o no. Es decir, pese a partir ambas vías de explotación del recurso eólico de un principio de generación eléctrica común, los contextos físicos de operación los transforman en problemas a resolver completamente diferentes. En dicha diversificación de problemas técnicos, se pueden identificar dos grandes vertientes: la primera relacionada con la explotación a gran escala, la cual utiliza aerogeneradores con potencias del orden de los Mega Watts, que operan a velocidades sostenidas a alturas que van entre los 100 y 120 metros, cuya implementación debe ir acompañada a grandes rasgos de un estudio de la geografía y condiciones meteorológicas del lugar para la correcta selección del aerogenerador a instalar, las líneas de transmisión y la capacidad del sistema para el consumo de la potencia generada. Este tipo de aplicaciones son desarrolladas principalmente por grandes empresas o gobiernos debido al alto costo de las inversiones; la segunda vertiente es la pequeña escala o de uso doméstico, que principalmente se usa en sistemas eléctricos aislados o conectados a la red eléctrica y están orientados a satisfacer las necesidades energéticas domésticas o como fuentes complementarias a los sistemas de abastecimiento eléctrico tradicional, como, los sistemas integrados a las edificaciones.

Un estudio desarrollado en el mercado canadiense, [7] afirmó que el uso de turbinas de pequeña capacidad (debajo de los $10kW$) de eje vertical son capaces de competir con otras energías renovables en nichos específicos del mercado. Se ha demostrado que el uso de estas tecnologías ofrece beneficios ambientales que pueden contribuir significativamente al objetivo de reducir las emisiones de gas efecto invernadero al desplazar el uso de los combustibles fósiles convencionales y tomar un paso esencial a un futuro sustentable. La energía eólica de baja potencia es considerada para ser una de las energías renovables líderes con cero emisiones y mínimo impacto en cuerpos de agua, paisajes y biodiversidad.

Uno de los argumentos en contra de la implementación masiva de aerogeneradores de baja potencia (*ABP*) es la posibilidad de perturbar la estabilidad de la red eléctrica. Sin embargo, recientes estudios han demostrado que el uso de fuentes de potencia descentralizadas, como las que proveen los sistemas eólicos de baja potencia, puede facilitar la sincronización de las redes eléctricas modernas [8]. Las principales diferencias entre los aerogeneradores que se usan en los sistemas de baja potencia con los utilizados a gran escala son las siguientes [9]:

1. Los Aerogeneradores de Baja Potencia (*ABP*) cuentan con aspas fijas y sistemas de protección pasiva en caso de altas velocidades de viento.
2. Las turbinas de baja potencia operan a velocidades de viento variables y no cuentan con

sistemas de orientación activa.

3. Los sistemas de *ABP* no son despachables.
4. En el caso de un *ABP*, un sistema electrónico de potencia conecta el generador a la red: en el caso de un generador de corriente directa se utiliza un inversor, de una máquina de corriente alterna, una combinación de rectificador e inversor es usado para la integración a la red.
5. No es necesario hacer una conexión separada a la red de sub-estación, el aerogenerador de baja potencia está integrado en el sistema local de distribución eléctrica.
6. Un aerogenerador de baja potencia es la principal opción para la integración con edificaciones.
7. Un aerogenerador de gran potencia está diseñado para operar bajo condiciones de viento estables, sin embargo, uno de baja potencia opera principalmente en condiciones de viento turbulento.

Ante las grandes vertientes de pequeña y gran escala, la posibilidad de explotar la energía eólica en cualquiera de ellas ofrece un desarrollo sustentable, sin embargo, existen sutiles diferencias que pueden impactar en mayor o menor medida el desarrollo de la componente social. A gran escala, el beneficio económico y medioambiental son justificados al ofrecer una fuente de energía libre de *GEI*, con costos de generación competitivos, beneficiando a los usuarios de la red eléctrica y generando un consecuente desarrollo sustentable. Sin embargo, la explotación a baja potencia aprovecha la energía a una escala menor, al alcance de los usuarios finales conectados o no a la red eléctrica, poniendo así a la sociedad en contacto directo con los beneficios de un abastecimiento eléctrico por energía renovable, no sólo para lugares alejados de la red eléctrica sino también para usuarios que desean incorporar este tipo de sistemas para el aprovechamiento del recurso eólico local. En este último caso, el usuario de un *ABP* puede abastecer la red local y aprovechar el marco regulatorio actual de interconexión eléctrica para disminuir su consumo y por lo tanto su tarifa. Es en esta vertiente donde se sustenta el uso de dispositivos de baja potencia.

En este contexto, como primer parte del trabajo en el siguiente capítulo se presenta una breve introducción de la energía eólica de baja potencia para continuar con el estado del arte en materia del uso de aerogeneradores domésticos como abastecedores de energía eléctrica a pequeña escala. De la revisión desarrollada se detectan los principales problemas en los cuales se trabaja en la actualidad para posteriormente tomar dicha revisión como fundamento del trabajo de tesis aquí presentado.

La energía eólica de baja potencia

Contexto Mundial y Nacional

Como primer elemento de estudio se presenta un análisis de las dispersiones de las velocidades de viento respecto a los tiempos promedio utilizados como técnica de muestreo. Se encuentra una gran dispersión de las velocidades de viento, hecho que no concuerda con el uso de un tiempo promedio de diez minutos como el óptimo para la representación de las denominadas “condiciones de viento estables” del sitio. Se encuentra un máximo de la dispersión para un tiempo promedio de un minuto, el cual proponemos como el adecuado para detectar las ráfagas de viento, mismas que pueden contribuir en la producción de electricidad para el caso de un *ABP*. Además, encontramos diferencias en las evaluaciones del recurso calculadas a distintos tiempos promedio, por lo tanto, la selección de un tiempo de muestreo inapropiado puede conducir a evaluaciones del recurso poco confiables.

Con la finalidad de contribuir en la construcción de evaluaciones del recurso eólico confiables, se desarrolla una metodología para el cálculo de una propagación del error en la medición de la velocidad del viento en términos de la potencia eléctrica. Con este resultado es posible generar un intervalo de la energía posible de generar y así estimar, por ejemplo, un intervalo de tiempo en el retorno de la inversión o un intervalo en el posible costo de generación.

2.1. Los aerogeneradores de baja potencia *ABP*

El uso de aerogeneradores de baja potencia *ABP* es común alrededor del mundo, sin embargo, no hay una definición unificada para un *ABP*. Originalmente, se definió un *ABP* como aquel aerogenerador que se utiliza para abastecer las necesidades energéticas de un hogar. Esta definición pierde sentido ante las diferencias en las demandas energéticas domésticas alrededor del mundo. Por un lado, mientras que una familia Estadounidense necesitaría una turbina con una potencia de 10 *kW* para satisfacer completamente sus necesidades, una familia euro-

pea necesitaría un dispositivo con una potencia de 4 kW y 1 kW para una familia China [9].

Alrededor del mundo existen varias definiciones para un *ABP*, la tabla ?? presenta algunas clasificaciones por país. La más importante es la presentada en el estándar internacional IEC 61400-2, que aborda temas técnicos para *ABP*. Dicho estándar define un *ABP* por su área de barrido, que debe ser menor a los 200

La capacidad global instalada ha alcanzado más de 576 MW a finales del 2011. China cuenta con el 40 % y Estados Unidos de Norte-América con el 35 % de esta capacidad.

Más de 120 MW de nueva capacidad instalada se agregó en el 2011, un incremento de la capacidad global instalada del 27%. En términos de capacidad nueva instalada, esto representa casi duplicar el tamaño del mercado, ya que en el 2010 sólo se presentaron ventas globales de 64 MW.

Globalmente, un incremento en el tamaño promedio de los aerogeneradores de baja potencia puede ser observado: En 2010, el tamaño promedio de aerogenerador instalado era de 0.66 kW, y en el 2011 había alcanzado un tamaño de 0.77 kW. Turbinas instaladas nuevas en el 2011 tenían un tamaño promedio del 1.6 kW. El mismo fenómeno de crecimiento en el promedio de los dispositivos instalados se dio en China pasando de 0.37 kW al final del 2010 a 0.45 kW en el 2011.

Debido al incremento del precio de los combustibles fósiles y la demanda eléctrica, actualmente el interés en los aerogeneradores de baja potencia es mayor, tanto en países industrializados como en vías de desarrollo. En particular en estos últimos años, el interés se presenta principalmente en los sistemas independientes a la red eléctrica o para pequeñas redes. Para sistemas alejados a la red eléctrica comúnmente son económicamente competitivos y proveen una opción real para sustituir la costosa y contaminante generación eléctrica por diesel [9].

También en países con buena infraestructura eléctrica, los *ABP* pueden generar electricidad a costos competitivos y contribuir a la sustitución de combustibles fósiles o fuentes de energía nucleares.

Sin embargo, en ambas áreas existen grandes retos en los temas relacionados con el marco regulatorio y financiero, hoy en día el mercado de *ABP* es frágil en este sentido. Pocos países ofrecen esquemas de apoyo donde la principal barrera para muchos potenciales usuarios de esta fuente renovable de energía es la inversión inicial.

Uno de los aspectos fundamentales que facilitará la penetración del uso de *ABP* como productores de energía a escala doméstica, es la generación de políticas estatales y nacionales que promuevan e incentiven su uso. La investigación presentada en [10] toma el contexto Australiano y discute la relación entre las políticas estatales y federales, la capacidad instalada de *ABP*

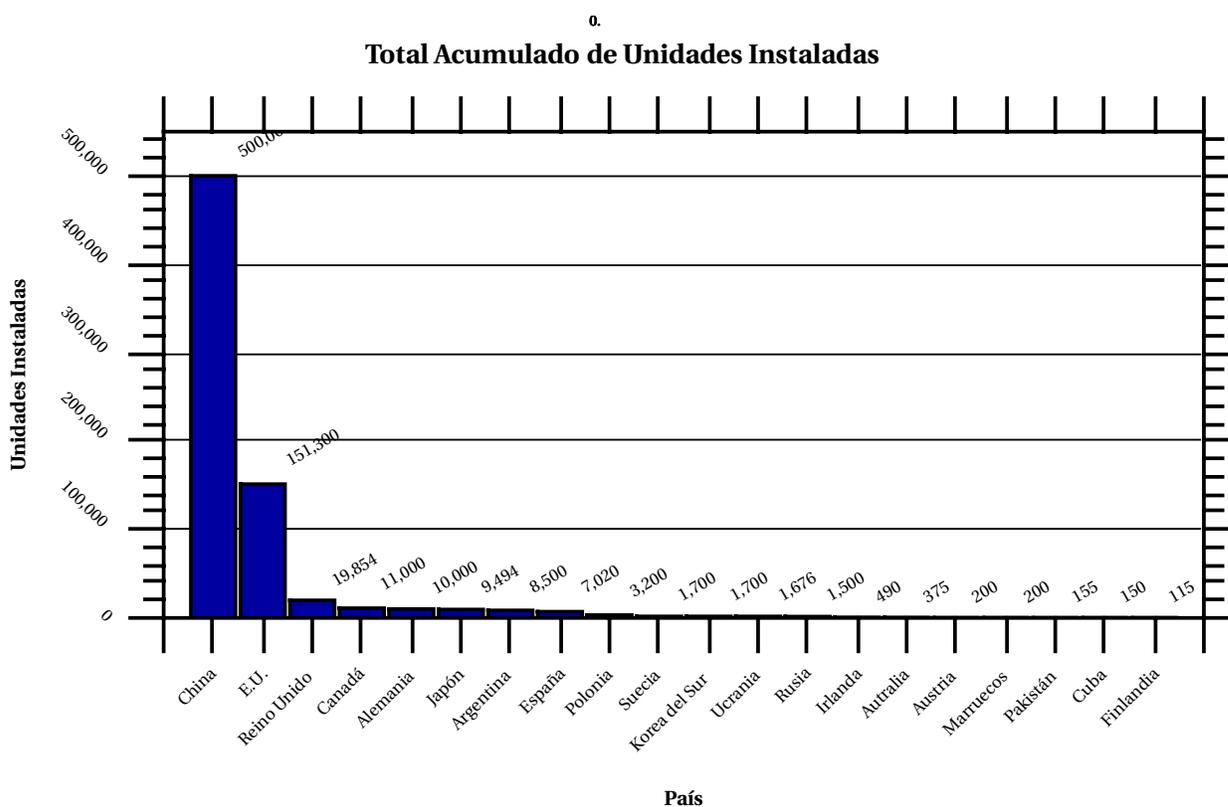


Figura 2.1: Total acumulado de aerogeneradores de baja potencia instalado.

y las complejidades de desarrollar instrumentos que sostengan a la industria de las energías renovables en el tiempo. La investigación encontró que la falta de la debida diligencia en el desarrollo de políticas públicas genera malos resultados por la industria de la energía renovable a pequeña escala y un mayor nivel de riesgo político. Entre las principales barreras encontradas en la penetración de *ABP* se encuentra el elevado costo de producción de este tipo de tecnologías en comparación con los costos ofrecidos por la red eléctrica.

Actualmente, uno de los mayores problemas de la humanidad es el combinar la producción de energía y el respeto por el medio ambiente. Un problema de desarrollo sustentable ha sido claramente demostrado en la cumbre de Johannesburgo 2002. Energía renovable, inagotable, limpia son necesarias estas condiciones como una prioridad. Argelia y Túnez han entrado a esta estrategia en el contexto de desarrollo sustentable al integrar la promoción de la energía renovable. El marco legislativo y regulatorio adoptado en los años recientes testifica este compromiso [11].

2.2. Capacidad instalada a nivel mundial

El mercado mundial para aerogeneradores de baja potencia ha tenido un gran crecimiento: A finales del 2011, un total acumulado de al menos 730,00 aerogeneradores de baja potencia han sido instalados alrededor del mundo (excluyendo los dos de los más grandes mercados del mundo China e Italia), durante el 2011, el número de aerogeneradores instalados creció en un 11 %.

China continúa ensombreciendo a todos los grandes mercados, incluyendo a los Estados Unidos de Norte América y Reino Unido, con un total de capacidad instalada superior a las 500,000 unidades, que representa el 68 % del mercado mundial en términos totales así como de las unidades nuevas instaladas.

Ante el evidente desarrollo de la energía eólica a nivel mundial y los beneficios que genera su uso en las tres partes constitutivas del desarrollo sustentable, en la siguiente sección se desarrolla una revisión del estado del arte de los *ABP*.

2.3. México y la energía eólica de baja potencia

México es ajeno a la problemática global en relación al cambio climático y el desarrollo sustentable. Se ha legislado al respecto y en noviembre del 2008 se decreta la *Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energetica (LAERFTE)*, que tiene por objeto el “regular el aprovechamiento de fuentes de energía renovables y las tecnologías limpias para generar electricidad con fines distintos a la prestación del servicio público de energía eléctrica, así como establecer la estrategia nacional y los instrumentos para el financiamiento de la transición energética”. Producto de lo establecido en dicha ley, en el año 2013 se presenta el *Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018* del cual se genera el *Programa especial para el aprovechamiento de energías renovables 2014-2018 (PEAER)* [12], dicho programa establece los objetivos, estrategias y líneas de acción que serán aplicadas por el Gobierno Federal para alcanzar un límite de generación eléctrica basada en combustibles fósiles del 65 % para el 2024, y una meta de participación de tecnologías de generación limpia del 35 % para el mismo año según la Ley General de Cambio Climático (*LGCC*).

Los objetivos del *PEAER* [12] se concentran en cinco:

1. Objetivo 1. Aumentar la capacidad instalada y la generación de electricidad a partir de fuentes renovables de energía.
2. Objetivo 2. Incrementar la inversión pública y privada en la generación, así como en la construcción y ampliación de la infraestructura para su interconexión.
3. Objetivo 3. Incrementar la participación de biocombustibles en la matriz energética nacional.

4. Objetivo 4. Impulsar el desarrollo tecnológico, de talento y de cadenas de valor en energías renovables.
5. Objetivo 5. Democratizar el acceso a las energías renovables mediante la electrificación rural, el aprovechamiento térmico y la participación social.

En el año 2013, la Secretaría de Energía (*SENER*) desarrolló el Inventario Nacional de Energías Renovables (*INER*), el cual señala que entre las renovables la que mayor potencial tiene probado es la eólica con 87,600 *GWH*. En el año 2012, la producción de electricidad a través de aerogeneradores contribuye con el 4.61 % de la producción eléctrica nacional. Esta producción de energía se divide en dos sectores: uno orientado a satisfacer la demanda de particulares con una capacidad instalada de 729 *MW* y otra a través de algunos proyectos eoloelectricos en pequeña escala con una participación de 0.028 *MW*.

Por otro lado, la *SENER* y la Comisión Federal de Electricidad (*CFE*) alineadas con el objetivo 5 del *PEAER* desarrollan actualmente el Proyecto Servicios Integrales de Energía (*PSIE*), que tiene como objetivo dotar de electricidad, a través de sistemas de energía renovable, a 86 comunidades rurales remotas identificadas que no cuentan con servicio de energía eléctrica y que por su alto grado de dispersión difícilmente serán integradas a la red eléctrica nacional. De las 86 localidades detectadas, 33 serán financiadas por el Banco Mundial y el resto a través de convenios entre los gobiernos federal, estatal y municipal. El *PSIE* considera reducir el porcentaje de población rural que no cuenta con el servicio de energía eléctrica a nivel nacional, aprovechar el recurso solar local y así reducir los niveles de marginación y pobreza de la población rural, además busca impulsar el desarrollo del mercado regional de tecnologías alternativas y la creación de empresas regionales que implementen este tipo de proyectos, contribuir en el desarrollo de capacidades técnicas locales en los estados beneficiarios del proyecto y finalmente crear una base de proyectos piloto de generación de energía eléctrica para replicarse en otras comunidades rurales del país. Este proyecto confirma los beneficios de desarrollar proyectos de energías renovables donde se involucra a los beneficiados en la cadena de instalación y mantenimiento como lo se ha demostrado en el caso de los *ABP* [13].

Parte de las estrategias y líneas de acción que componen el objetivo 4, es la creación de los Centros Mexicanos de Innovación (*CEMI*), en particular el *CEMI Eólico* contempla hoy en día la ejecución de dos proyectos que contemplan problemáticas relacionadas a los *ABP*, el P-07 y P-19 que llevan por títulos: “Integración y consolidación de capacidades nacionales para desarrollo de pequeños aerogeneradores, mediante el diseño, construcción y pruebas exhaustivas un aerogenerador de con capacidad de 20 kW” y “Diseño y evaluación de sistemas de control para aerogeneradores de pequeña escala enfocados a confiabilidad y seguridad” respectivamente. Estos proyectos abordan aspectos respecto a la caracterización de los aerogeneradores, sin embargo, dejan de lado la etapa de evaluación del recurso que determina la factibilidad tecnológica del proyecto.

En el ámbito industrial, según datos de la Asociación Mundial de Energía Eólica (*WWEA* por sus siglas en inglés), en el año 2011, México contaba sólo con una empresa fabricante de *ABP*, en comparación con Estados Unidos y China que lideran el mercado con 58 y 57 fabricantes respectivamente, que son además los dos países con la mayor capacidad instalada en el mundo.

Como se ha observado la energía eólica en México tiene una de las proyecciones de crecimiento mas prometedoras entre las renovables. La legislación y los programas derivados entorno al uso de las energías renovables como abastecedoras de electricidad contemplan el desarrollo tecnológico y humano involucrando en la cadena de desarrollo al beneficiario como lo muestra el programa *PSIE* para el caso de las tecnologías fotovoltaicas. Sin embargo, hoy en día los proyectos para el uso de *ABP* se limitan al diseño, construcción y caracterización de los dispositivos y sus componentes. Se han dejado de lado los proyectos de evaluación del recurso orientados a este tipo de aplicaciones, estudios que son fundamentales para la implementación de *ABP* como abastecedores de energía. El trabajo presentado en esta tesis es una herramienta valiosa que contribuye en el desarrollo de esta tecnología en México.

Una vez establecido el contexto de la situación actual de la tecnología *ABP*, en el siguiente capítulo se presenta la revisión bibliográfica que describe las principales líneas de investigación que hoy en día se estudian.

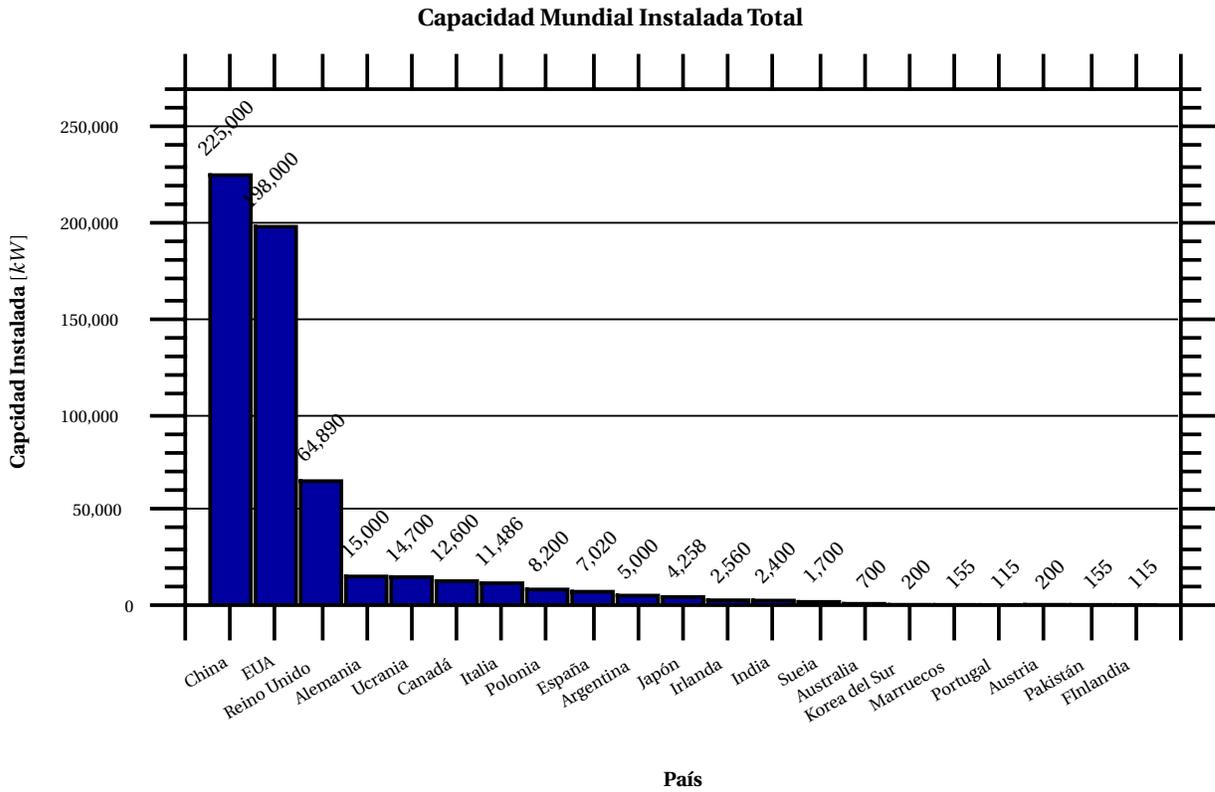


Figura 2.2: Capacidad mundial instalada de aerogeneradores de baja potencia instaladas.

Investigación actual de la eólica de baja potencia

Para tener una visión integral sobre el estado del arte, así como detectar los principales problemas que hay que hacer frente en la implementación de aerogeneradores de baja potencia como alternativa nivel doméstico. En este capítulo se presenta una revisión bibliográfica donde se detectaron los tópicos recurrentes de tal forma que presentan grandes temas para su clasificación, cada uno presenta los trabajos desarrollados así como una breve descripción de los mismos. Una vez presentados los trabajos se analizan las necesidades y se plantean los alcances del trabajo.

3.1. *ABP* factibilidad y evaluación del recurso

El primer tema que concentra algunos trabajos de la revisión se refieren a la evaluación del recurso y los estudios de factibilidad para aplicaciones de *ABP*, dichos estudios representan una de las etapas más importantes para la implementación de este tipo de tecnologías como abastecedoras de energía, ya que de éstos se determina la factibilidad tecno-económica del proyecto.

El desarrollo de estudios confiables de evaluación de recurso eólico para aplicaciones domésticas no es tarea sencilla, ya que no es común el contar con bases de datos con el registro histórico de las velocidades de viento. De tal forma, que trabajos como [14] que buscan aprovechar recursos ya existentes como los que ofrece el análisis numérico objetivo de la capa límite, o *NOABL* por sus siglas en inglés, desarrollado por el Departamento de Energía y cambio climático del Reino Unido. En dicho trabajo se utilizaron las velocidades de viento que ofrece el programa *NOABL* y se aplica en zonas urbanas para el aprovechamiento de recurso eólico de baja potencia. Este tipo de trabajos reafirma la importancia del uso de *ABP* y su integración con el entorno. El desarrollo de estudios específicos para una localidad puede ser una tarea interminable dada la gran cantidad de variables del sistema que hay que monitorear, sin embargo, el uso de herra-

mientas existentes como el que ofrece *NOABL* es una alternativa mas ante la escasez de datos en sitios de interés. El estudio afirmó que es común encontrar un bajo rendimiento en *ABP* ya que luego de ser instalados la cantidad de energía que se produce es menor a la esperada, esto se debe a dos factores principalmente: primero, a que la mayor parte de la turbinas instaladas en áreas urbanas están diseñadas sin tomar en cuenta la naturaleza compleja del viento en el nivel del techo donde son montadas y segundo, la dificultad de estimar el recurso eólico en las regiones urbanas.

Los procesos estadísticos son comunes en los estudios de factibilidad tecno-económica, ya que para el desarrollo de los mismos, es necesario tener un estimado de la cantidad de energía que es posible producir en el sitio; a partir de dicha cantidad, la inversión inicial y el tiempo que durará el proyecto es posible estimar un costo de generación eléctrica, sin embargo el proceso estadístico involucrado han conducido al desarrollo de estudios [15, 16, 17, 18, 19, 20], que plantean como un área de estudio la confiabilidad de las evaluaciones del recurso eólico y el comportamiento dinámico de los dispositivos, ya que se ha mostrado que la metodología de evaluación del recurso no es adecuada para aplicaciones de baja potencia.

En cuanto a la calidad de los datos utilizados en la evaluación del recurso, los estudios encontrados en la revisión bibliográfica [21, 22, 23, 24, 25, 26], utilizan como elementos de estudio para la evaluación del recurso eólico velocidades de viento promediados por intervalos de una hora por ser los datos que se encuentran disponibles en las estaciones meteorológicas, se ha demostrado que al aumentar el tiempo promedio se conduce a una subestimación del recurso eólico, lo cual puede ser factor determinante en la aceptación o no del sitio como abastecedor de energía eléctrica [27].

El trabajo desarrollado en [28] analizó el crecimiento global de los mercados relacionados con la fabricación y compra de *ABP*, dicho crecimiento a generado la necesidad de metodologías mas rigurosas en las pruebas de estos dispositivos que aseguren la calidad, confiabilidad y desempeño. En dicho trabajo, se planteó un modelo para el desarrollo de pruebas de desempeño. En el se detectó la necesidad de tiempos de velocidades promedio menores a los 10 minutos con la finalidad de reducir los errores en las curvas de potencia de los *ABP* particularmente en las velocidades más altas. Además este trabajo afirmó que hay curvas de potencia proporcionadas por los fabricantes en algunos aerogeneradores que presentan grandes discrepancias con la potencia real del dispositivo en altas velocidades.

En el documento [22] se planteó que un elemento importante en las evaluaciones del recurso eólico a baja potencia es la selección del aerogenerador, una selección adecuada del mismo puede ser un factor determinante en la factibilidad del proyecto energético. De igual forma, el trabajo [29] presentó los resultados de modelar un sistema híbrido aislado compuesto por energía solar, eólica y diesel. Se determinó que uno de los factores clave es el ajuste de una adecuada curva de potencia del aerogenerador es factor clave el cálculo del costo de la energía y la configuración óptima del sistema ya que bajo un régimen de viento dos curvas de potencia

distintas ofrecerán distintas estimaciones en la producción de energía. Resultado confirmado por el trabajo [30], donde compara distintos modelos de *ABP* bajo un mismo régimen de viento y demuestra que la adecuada selección de turbinas hace factible satisfacer las necesidades energéticas de un hogar.

En cuanto a las curvas de potencia del aerogenerador, [31] discutió la curva de potencia ideal para un *ABP*, la curva de potencia ideal se refiere a condiciones ideales (es decir, el viento es estable, laminar, espacialmente uniforme). La curva de potencia ideal tiene dos aplicaciones principalmente: la predicción de energía que puede ser extraída y la extensión de la curva de potencia a sitios que tienen diferentes niveles de turbulencia del sitio en condiciones ideales.

Parte fundamental de las evaluaciones del recurso son las funciones de densidad de probabilidad que representan las condiciones de viento del sitio, el trabajo [32] analizó la necesidad de investigación rigurosa en temas relacionados con las funciones de densidad de probabilidad empleadas en la evaluación del recurso para aerogeneradores de baja potencia. Planteó la necesidad de desarrollar un análisis de la incertidumbre asociada con las evaluaciones y su relación con las velocidades promedio. Entre otras cosas, establece que es necesario determinar la resolución de muestreo adecuada para minimizar impactos de ráfagas y otros efectos ocasionados por la turbulencia.

Respecto los estudios de factibilidad el trabajo [33] desarrollado en Alberta, Canada, comparó los impactos medio-ambientales, el balance energético y el costo del ciclo de vida de dos sistemas: un sistema eólico aislado y un generador diesel para el abastecimiento energético de una casa, el estudio reveló que uno de los factores clave se encuentra el correcto dimensionamiento del sistema eólico para hacer al sistema renovable competitivo con la tecnología diesel.

Los sistemas de generación eléctrica distribuida compuestos por *ABP* son cada vez más frecuentes; el trabajo [34] resumió los tres principales problemas técnicos involucrados: 1) La determinación del sitio de instalación e integración con edificaciones existentes, 2) la conexión e integración a la red tanto de aerogeneradores individuales como conjuntos de ellos y 3) la integración de estos sistemas con sistemas complementarios como los fotovoltaicos.

De la revisión bibliográfica, se encontró la existencia de trabajos orientados a la integración de los *ABP* a las edificaciones para aprovechar las corrientes de viento que se generan entre edificios, en la siguiente sección se presentan los trabajos al respecto.

3.2. *ABP* en Edificaciones

El grupo de trabajo 3 del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (*IPCC* por sus siglas en inglés) indica que en 2010 el sector de edificaciones consume el 32% de la energía de uso final en el mundo. Una de las opciones de mitigación es la integración de energías renovables [35] en las edificaciones. La evaluación del recurso para aerogeneradores de baja potencia

para aplicaciones urbanas se ha estudiado y demostrado que el conocimiento sobre las interacciones con la topología urbana o sub-urbana, así como los campos de viento turbulento son factores importantes para la adecuada ubicación de dichos aerogeneradores [36, 14, 37]. Estudios recientes [38, 39, 40] afirman que el tipo de aerogeneradores adecuados para el sector de edificaciones son del tipo de eje vertical ya que son capaces de generar energía en condiciones de alta turbulencia. En esta sección se presentan los estudios encontrados para la implementación de *ABP* en edificaciones.

Existe una necesidad de analizar los problemas técnicos relacionados a la implementación de aerogeneradores de baja potencia en edificaciones como los desarrollados por [36, 41]. Trabajos para determinar el tipo de aerogeneradores óptimos para este tipo de aplicaciones como los desarrollados en [42, 43].

Las primeras máquinas para extraer energía del viento partían del concepto de un aerogenerador de eje vertical *AEV*, sin embargo, la idea de que este tipo de dispositivos no son útiles para la extracción a gran escala permanece hoy en día. Ante el gran desarrollo de los aerogeneradores de eje horizontal, los trabajos de investigación sobre los *AEV* continuaron aunque en menor medida. El trabajo [39] realizó una revisión sobre las ventajas y desventajas técnicas en el diseño y uso de *ABP* de eje vertical. El estudio afirmó que este tipo de aerogeneradores son adecuados para la generación de electricidad en condiciones donde los tradicionales aerogeneradores de eje horizontal son incapaces de ofrecer eficiencias razonables como en condiciones de altas velocidades de viento y flujos turbulentos. Planteó además como problemas a resolver, las altas velocidades de arranque debido al alto torque a vencer, los bajos coeficientes de potencia y la deficiente integración con edificaciones.

A los aerogeneradores instalados en edificaciones son clasificados como de micro-generación, el trabajo [40] presenta una revisión sobre la instalación *ABP* en edificios. En la revisión detectaron que la densidad de energía aumenta de 3 a 8 veces gracias a su altura. La gran cantidad de ráfagas que se presentan puede afectar el desempeño de la turbina. El estudio afirmó que el centro del techo no es el mejor lugar para el montaje del aerogenerador, la zona que presenta las mayores velocidades de viento es justo a la altura de la azotea. Para este tipo de aplicaciones se afirma que en aplicaciones urbanas *ABP* de eje vertical son una buena solución.

3.3. Diseño de *ABP*

Parte importante de la revisión bibliográfica desarrollada es el diseño de los aerogeneradores, en esta sección se presentan los trabajos encontrados en la revisión al respecto.

Los perfiles aerodinámicos son parte del diseño de cualquier aerogenerador, el trabajo [44] comparó los desempeños de dos perfiles aerodinámicos, concluyó que el perfil de gaviota presenta un mejor desempeño y puede ser empleado en el campo de los *ABP* de eje horizontal,

además afirmó que para las aspas de aerogeneradores de baja potencia que operan en condiciones números de Reynolds bajos, la viscosidad del aire tiene mayor influencia en su desempeño aerodinámico. Que es una de las grandes dificultades en el diseño de una turbina eólica.

Uno de los principales problemas involucrados en el diseño de un *ABP* es el ruido que genera al operar altas velocidades. El trabajo [45] propuso un diseño de ruido bajo para el ambiente urbano con una capacidad de 2.25kW y un diámetro de 2 m , el cual utilizó el principio de Venturi. La principal ventaja del diseño propuesto, aparte del bajo ruido que genera, es la capacidad de captar una mayor cantidad de aire de un área de barrido mayor, además está equipado con un generador de imán permanente con una eficiencia mayor y densidad de energía a un costo mínimo.

El trabajo [38] presentó una completa revisión de *ABP* tipo Savonius empleados en la producción de baja potencia, desarrolló una discusión sobre los recientes avances para la simulación numérica de este tipo de aerogeneradores tanto en dos como en tres dimensiones, discute las principales ventajas de las mismas y las posibilidades que ofrecen en términos de la optimización de estos dispositivos.

3.4. *ABP* diseños sencillos

El uso de *ABP* como abastecedores de energía eléctrica, no sólo genera el evidente beneficio de la electrificación a través de una fuente renovable. Las fuentes renovables de energía comúnmente están asociadas al desarrollo sustentable, ya que el uso de este tipo de tecnologías genera impactos en las tres partes constitutivas de este desarrollo: la social, económica y medioambiental. Y son tan grandes dichos impactos que alrededor del mundo la implementación a gran escala a partir de granjas eólicas es la forma de explotación más común y es la que ha impulsado el gran desarrollo de la energía eólica en los últimos años. Conduciendo dicho crecimiento el diseño y construcción de dispositivos cada vez más grandes con la finalidad de disminuir los costos de instalación y por ende el costo de generación.

Sin embargo, ésta no es la única forma en que es posible utilizar la energía eólica para el abastecimiento eléctrico. Los principios de generación son tan conocidos que es posible construir un *ABP* con materiales de rehuso provenientes de tecnologías como la automotriz¹. En este sentido, se ha demostrado [13] que la incrustación social del proceso de generación de conocimiento y habilidades en la manufactura, instalación y mantenimiento genera un acelerador económico local que garantiza un desarrollo sustentable a largo plazo [13, 46]. Es decir, es posible generar impactos sociales y económicos en mayor medida y directo a los beneficiarios si localmente se involucra a la comunidad en el proceso de construcción y mantenimiento. Además, como fuente renovable provee una alternativa limpia que contribuye al desarrollo del índice de

¹Para el caso de los generadores eléctricos.

desarrollo humano [13]. Por lo tanto, el desarrollar evaluaciones de recurso eólico confiables es un factor clave para penetración de esta fuente.

A diferencia de un aerogenerador de potencia del orden de los Mega Watts, un *ABP* tiene la gran ventaja de esta al alcance de cualquier usuario no sólo en la accesibilidad de los costos sino en la propia fabricación del aparato. El artículo [47] presentó una metodología usada para el diseño de un *ABP* de bajo costo para uso doméstico. Un método de ingeniería es usado para la planeación, construcción y ensamblaje de un prototipo de manera sencilla y segura. Los materiales, componentes y herramientas usados en la construcción del sistema son estándares, de bajo costo y disponibles en el mercado.

La parametrización, instalación y prueba de un *ABP* de tres aspas con eje horizontal se presentó en el trabajo [48]. Las aspas de las turbinas fueron fabricadas con madera de *Mansonia Altissima* debido a la gran abundancia en la región de *Ilorin Nigeria*, lugar donde se llevó a cabo el estudio. El trabajo afirmó que este tipo de dispositivos son una alternativa viable para las regiones al sur del país donde el recurso es abundante y la red eléctrica no tiene cobertura.

3.5. Generadores de un *ABP*

Hoy en día, los generadores de imanes permanentes son una opción atractiva para aplicaciones en *ABP* debido a su alta eficiencia, alto factor de potencia, tamaño compacto, larga duración, alto control, operación estable y bajo costo por unidad, el trabajo [49] da antecedentes del tema así como los actuales avances en el área.

En este mismo contexto, parte importante del diseño de este tipo de componentes es la fabricación y diseño óptimo, el trabajo [50] presentó el diseño y simulación del desempeño de un prototipo de $8kW$. Las herramientas que presentó ofrecen resultados razonables en términos de tiempo de cómputo y comparación con los resultados experimentales.

El objetivo del estudio en [51] fue diseñar un *ABP* de eje horizontal e investigar la posibilidad de mejorar la captura de energía. Planteó una extensión telescópica del área de barrido del aerogenerador que opere en bajas velocidades de viento y en una zona edificada. El estudio reveló que es posible tener una mejora en la captura de viento, sin embargo, para aprovecharla es necesario generar un diseño de aerogenerador que considere dicha extensión y aproveche la aceleración del flujo de viento.

El diseño y fabricación de un generador de imán permanente integrado directamente a un *ABP* se describió en el trabajo [52]. Dicho generador responde a un diseño simple y de fácil manufactura, la potencia calculada es de $1000 W$ a $300 rpm$ o $2000 W$ a $500 rpm$ y cuenta con una eficiencia del 90%. El trabajo afirma que el generador desarrollado representa un opción

atractiva para su uso en *ABP* de eje vertical debido al bajo torque de arranque.

Los aerogeneradores de baja potencia que operan a bajas velocidades regularmente se enfrentan al problema de bajos desempeños debidos a la separación laminar y separación laminar de burbujas en las aspas. El uso de perfiles especialmente diseñados para funcionar a bajos números de Reynolds permite obtener velocidades de arranque menores, incrementando el torque de arranque y por lo tanto, mejorando el desempeño integral de la turbina [53].

En la etapa del diseño *ABP* existe una amplia gama de materiales para la fabricación de aspas, el trabajo [54] presentó un caso de estudio para determinar la adecuada selección de materiales en estructuras compuestas. La metodología presentada ofrece una herramienta gráfica útil en la toma de decisiones sobre la selección de materiales.

3.6. El tiempo de muestreo en la evaluación del recurso

Ante la revisión desarrollada se detecta un mayor número de necesidades en el ámbito de la evaluación del recurso eólico para *ABP*, el tema es importante ya que son dichos estudios los que permitirán la penetración de esta fuente renovable no solo como abastecedora de energía eléctrica limpia sino como motor del desarrollo sustentable.

El principal elemento que determina el uso de energías renovables es la evaluación tecno-económica del recurso. Este proceso consiste en usar sólo conocimiento teórico de las velocidades de viento de la región, las curvas de potencia de un aerogenerador de interés y sus costos; para estimar los costos de producción eléctrica.

Estudios de evaluación del recurso precisos y confiables son cruciales para el desarrollo exitoso de la energía eólica [24]. Es práctica común, que las evaluaciones se basen en velocidades de viento que fueron medidas a una frecuencia de uno o 0.5 Hz. Este arreglo de datos es procesado en promedios de diez minutos y son almacenadas las variables promedio, desviación estándar, máximo y mínimo [55].

Este proceso de ensambles de velocidades promedio por intervalos de diez minutos, se basa en los resultados de van der Hoven [56]. Él introdujo la idea que velocidades estables de viento pueden ser representadas por ensambles promediados a diez minutos. De acuerdo a sus observaciones los diez minutos corresponden al tiempo con mínima dispersión de datos entre múltiples tiempos promedio. Los datos utilizados en el estudio fueron medidos en Brookhaven National Lab, Long Island, Upton, New York, ubicado en 40° 52' 24" N, 72° 52' 19" W. Este fenómeno de vientos estables es también reportado por [57]. Sin embargo, en un análisis similar [27] describió cambios en los parámetros estadísticos de datos medidos en la región inter-tropical. Trabajo previo [27] mostró que la evaluación del recurso eólico basado en ensambles promedio de 10 minutos, puede conducir a la subestimación de la producción eléctrica. El uso de veloci-

dades promediadas elimina las altas velocidades de la muestra conduciendo a valores bajos de dispersión y generando tendencias centrales, lo cual es aceptable si con este tiempo de muestreo se representarán sitios con condiciones de viento de mínima dispersión, y el proyecto a desarrollar contempla aerogeneradores de gran potencia, ya que es en dichas condiciones de viento estables en donde un aerogenerador de este tipo opera y produce energía. Sin embargo, si el proyecto contempla la instalación de un *ABP*, el paradigma de vientos estables en promedios de 10 minutos, no necesariamente es una adecuada representación de las condiciones de viento, ya que gran cantidad de la información referente a la dispersión se pierde en la medias calculadas, información que describe las ráfagas en intervalos de tiempo menor capaces de producir energía para el caso de un *ABP*. Complementariamente, se ha demostrado que el tiempo de promedio en la etapa de caracterización tiene una influencia importante en las curvas de frecuencia acumulada, este comportamiento conduce a distintos desempeños en las curvas de potencia de los aerogeneradores caracterizados [43]. De tal forma, que la selección de un adecuado tiempo de muestreo tanto en la caracterización de los dispositivos donde se general las curvas de potencia del aerogenerador como en la etapa de evaluación del recurso es vital en la correcta descripción del sitio y en la consecuente evaluación tecno-económica.

En este contexto, se considera que parte fundamental del proceso de evaluación del recurso es la técnica de muestreo y el tiempo sugerido para el monitoreo de la velocidad del viento. Existe evidencia que el uso de distintos tiempos de muestreo influyen en la evaluación del recurso, sin embargo para este tipo de aplicaciones no se ha estudiado el impacto significativo o no que tiene en los estudios de factibilidad tecno-económica.

Otro uso frecuente de los ensambles promedio de diez minutos se puede encontrar en la metodología descrita en el estándar internacional [55] que describe los procesos técnicos en la caracterización del desempeño de un aerogenerador. El cual está principalmente orientado a las aplicaciones con turbinas eólicas de gran potencia. El anexo H del estándar define como tiempo adecuado de caracterización cuando se hable de *ABP*. Sin embargo, no hay mención alguna sobre el tiempo a usar para la evaluación del recurso cuando se habla de estos últimos aerogeneradores.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que los sistemas de generación eólica de baja y alta potencia poseen grandes diferencias como la potencia a abastecer, las características de los aerogeneradores [20, 38, 58], sus interacciones con la compleja topografía urbana o suburbana [32, 41, 36], los diferentes requerimientos de instalación, transportación, habilidades técnicas de instalación, operación, reparación y mantenimiento. Además, el despliegue de los sistemas eólicos de baja potencia evita las necesidad de cuantiosas inversiones para generación, transmisión y distribución que generalmente se encuentran únicamente al alcance de grandes empresas especializadas asociadas con gobiernos o industrias, dejando al alcance del usuario final el disfrute de los beneficios del abastecimiento eléctrico renovable. Por lo tanto, los proyectos de generación a pequeña y gran escala con aerogeneradores no deben ser analizados como problemas equivalentes citeElizondo:2009il,ameku:08.

Seguir la metodología marcada por el estándar para una aplicación de *ABP* no es tarea sencilla para el usuario común, lo cual es un obstáculo que impide la penetración de esta fuente renovable de energía como abastecedor eléctrico en aplicaciones domésticas, reduciendo así el impacto del desarrollo sustentable que esta fuente de energía es capaz de promover.

El trabajo presentado por [59] mostró cómo es afectada la producción de electricidad para los aerogeneradores de baja potencia bajo condiciones turbulentas. También mencionó que las curvas de potencia calculadas usando la norma IEC correspondiente no toman en cuenta este efecto, y, por lo tanto, recomienda la inclusión de pruebas para *ABP* bajo estas condiciones. Además, la evaluación del recurso eólico usando una metodología que involucra la curva de potencia del aerogenerador con una distribución probabilística presenta limitaciones para aplicaciones de *ABP* en áreas urbanas [32] donde los flujos turbulentos son frecuentes donde dichos aerogeneradores operan.

Es importante mencionar que pese a ser problemas distintos, las metodologías de evaluación del recurso y caracterización de dispositivos son comúnmente abordados simultáneamente ya que ambos comparten la técnica de muestreo. En este trabajo se propone el abordar la evaluación del recurso, ya que es ésta etapa la que define el uso o no de *ABP* como abastecedores de energía. De tal forma, que los resultados que de aquí se obtengan servirán para la regionalización de estándares generados en lugares del planeta con condiciones de viento diferentes.

De la revisión podemos afirmar que el uso de esta fuente renovable con fines domésticos se encuentra al alcance de usuarios finales, no sólo en la compra directa de los aerogeneradores ya que es posible su construcción con tecnología ya desarrollada debido a su relativa simpleza técnica de armado instalación y mantenimiento. Pese a esto, la decisión para su uso depende de metodologías derivadas de estándares internacionales que no necesariamente plantean procesos sencillos o económicos a seguir por el usuario común.

3.7. El error en la evaluación del recurso

La evaluación del recurso eólico es uno de los más importantes pasos en el desarrollo de cualquier proyecto eólico. De éste análisis se determina la posible cantidad de potencia eléctrica a producir y por lo tanto, contribuye a la determinación de la viabilidad tecno-económica del sitio. La evaluación del recurso se basa en registros históricos del clima y las características técnicas de la tecnología renovable a implementar. La energía eólica como fuente renovable no es la excepción, por lo tanto el desarrollar precisas y meticulosas metodologías para medir y registrar las velocidades del viento son factores críticos en la implementación de esta fuente renovable de energía [24].

La evaluación del recurso eólico típica consiste en medir las velocidades del viento con una frecuencia de 1 a 2 Hz y almacenar la media aritmética cada diez minutos durante un intervalo

de tiempo de al menos un año. El conjunto de velocidades del viento registrado es utilizado para construir una distribución de frecuencias, a la cual se ajusta una función de densidad de probabilidad *FDP*. Esta función en conjunto con una curva de potencia de un aerogenerador (*CPA*) proveen los elementos necesarios para calcular la cantidad de energía que es posible producir con el aerogenerador seleccionado operando bajo esas condiciones específicas de la región [60].

Los cálculos estadísticos con comunes en la evaluación del recurso eólico. En este sentido, el detectar y reducir las fuentes de incertidumbre es esencial en este tipo de estudios. En la referencia [61] se presentó un estudio sobre los modelos de distribución probabilísticos que representen la variabilidad del recurso. Un estado del arte en términos de la evaluación es presentado por [62], dichos estudios desarrollan metodologías para el cálculo de evaluaciones del recurso discuten aspectos sobre la medición del viento, sin embargo, no se encontró trabajo reportado en la literatura que estudie la influencia de la calidad en la medición sobre la estimación de la energía posible a producir.

El análisis de las incertidumbres juega un rol muy importante en la industria de la energía eólica dado que provee una percepción del riesgo así como el grado de la confiabilidad del estudio. Por ejemplo, en el campo de la caracterización de las turbinas eólicas, existe el Estándar Internacional *IEC 61400 part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines* [55], que tiene el propósito de “proveer una metodología uniforme que asegure la consistencia, precisión y reproducibilidad en la medición y análisis del desempeño del aerogenerador”. El anexo D del estándar presenta una metodología para calcular la incertidumbre del desempeño del aerogenerador. En la caracterización de un aerogenerador aparece una fuente extra de incertidumbre debido al proceso estadístico envuelto en el ajuste de su curva de potencia. Ante el uso frecuente del estándar los trabajos que se presentan a continuación generan recomendaciones técnicas para mejorar la confiabilidad de los estudios de evaluación del recurso y las pruebas de desempeño energético. El trabajo [28] desarrolló estudios para mejorar las técnicas estadísticas empleadas ante las poco confiables pruebas de caracterización de los *ABP*. El artículo [31] introduce el concepto de “curva de potencia ideal” y propone criterios de utilidad para la inclusión en el estándar. Finalmente, el trabajo [27] muestra la influencia del tiempo de promedio en la estimación de la potencia producida. Ante el implícito proceso estadístico contenido en la evaluación del recurso eólico, el obtener evaluaciones del recurso confiables será posible al reducir las fuentes de incertidumbre asociadas el proceso de cálculo [32]. Hasta este momento, los estudios de evaluación del recurso eólico no incluyen una estimación del error asociado al cálculo de la energía que es posible producir, el único camino que hace posible dicha estimación es la caracterización del dispositivo. Sin embargo, los problemas antes mencionados pese a compartir técnicas de medición, son problemas completamente distintos.

En el proceso de la evaluación del recurso existen al menos las siguientes fuentes de incertidumbre: la asociada a la medición de las velocidades de viento, en el ajuste de una función de densidad de probabilidad que represente las velocidades de viento medidas, en el cálculo de

los parámetros de dichas curvas, en la pérdida de información en la dispersión de la muestra ocasionado por el cálculo de las medias aritméticas, en el la medición de la potencia de salida de un aerogenerador que es caracterizado, en el ajuste de una función que represente la curva de potencia del aerogenerador. Respecto al error asociado al proceso de medición de las velocidades del viento, desarrollar cualquier análisis sobre la influencia de este error sobre la potencia eléctrica no es posible. Esto se debe a que la información contenida en el proceso de medición, se pierde una vez que se calcula la media aritmética presente en la técnica de muestreo. Lo cual limita cualquier concepto de dispersión a la desviación estándar calculada a lo largo del tiempo, parámetro que no necesariamente describe de manera eficaz el fenómeno físico. La principal deficiencia de este técnica de muestreo es asumir que las velocidades del viento pueden ser descritas como procesos provenientes de una distribución normal, hecho que no es necesariamente cierto para el caso donde existen grandes cambios de las velocidades de viento a lo largo del tiempo.

El trabajo en [63] presenta un estudio sobre la influencia de la calidad de la medición en la evaluación del recurso, sin embargo, supone que las velocidades del viento obedecen una distribución normal, cuando en la literatura, se ha presentado un amplio catalogo de funciones de densidad de probabilidad que se han utilizado para representar las condiciones de viento alrededor del mundo [64, 65], incluso, una distribución normal puede no ser la mejor ya que se han reportado modelos probabilísticos bimodales como el descrito por [66].

Otra fuente de incertidumbre está asociada a la calidad del ajuste de la *FDP* al conjunto de datos medidos. Se han desarrollado varios trabajos en este sentido para determinar la calidad del ajuste en condiciones y localidades específicas por distintas *FDP* [67, 68, 69, 70]. Con la finalidad de reducir dichas incertidumbres en los ajustes, se han desarrollado mejoras a las técnicas estadísticas proponiendo criterios de ajuste, un criterio empleado en la literatura esta asociado a el cálculo del coeficiente de correlación entre la distribución de frecuencias y las funciones propuestas [64], otro criterio parte de la linealidad que debe existir entre la función y los datos para el cálculo de los parámetros que definen la línea recta, mismos que definirán el mejor ajuste [27].

Por otro lado, la confiabilidad de la evaluación del recurso depende de la precisión de los parámetros que definen la función de densidad de probabilidad (*FDP*). Sin embargo, no siempre es sencillo obtener estimaciones precisas debido a la cantidad limitada de datos [71], así como la gran variedad de *FDP* posibles de ajustar [64, 65].

En los estudios de factibilidad, es necesario determinar el error en el cálculo de la evaluación del recurso con la finalidad de determinar si la diferencia en la energía calculada debida al uso de distintos tiempos de muestreo es significativo, este tipo de propagación no se ha desarrollado debido a que la técnica de muestreo utilizada elimina las variables necesarias, limitando así el concepto de dispersión. Una vez desarrollada la metodología para el cálculo del error en la evaluación del recurso se considera su utilidad y se propone una metodología para uso en los

estudios de factibilidad tecno-económica. Con los resultados de la propagación en la evaluación del recurso, es posible generar intervalos en las metodologías comúnmente usadas, como los son la determinación del tiempo de retorno de la inversión o en la estimación del el costo nivelado de producción.

Una vez detectados los principales problemas, a continuación se propone un estructura en donde que aborde los temas relacionados a la evaluación del recurso eólico y los estudios de factibilidad tecno-económica. En dichos temas, se detecta la posibilidad del desarrollo de trabajos originales tomando en cuenta los proyectos desarrollados anteriormente [27]. Los temas restantes, quedan fuera de los objetivos del estudio por corresponder a tópicos de otras áreas de investigación, sin embargo, se mantienen presentes para el desarrollo de futuras líneas de trabajo.

En el siguiente capítulo se presenta la primer parte del estudio respecto a los tiempo de muestreo y su influencia en la evaluación del recurso.

Una representación confiable de las velocidades de viento para *ABP*

Determinación de un tiempo de muestreo

Una vez presentado el contexto de la evaluación del recurso eólico para aplicaciones de *ABP*, analizado la revisión de la literatura, definido los alcances del trabajo así como la estructura del estudio. Se presenta en este capítulo el estudio desarrollado para la determinación del tiempo de muestreo y se complementa con un análisis sobre la influencia del tiempo de promedio en la evaluación del recurso. Posteriormente, el capítulo 4 presenta las metodologías tanto para la determinación del error en la evaluación del recurso como su aplicación en los estudios de factibilidad tecno-económica. Para finalmente presentar en el capítulo 5 las conclusiones del trabajo.

4.1. Introducción

En este capítulo presentamos la metodología utilizada en la evaluación del recurso eólico a partir de elementos estadísticos fáciles de reproducir e interpretar, los cuales serán útiles en la determinación de la factibilidad del proyecto y contribuya a la penetración social *ABP*. Además, en el caso específico de *ABP* determinaremos si el tiempo de promedio presentado en el estándar internacional es válido para la región inter-tropical.

Además, estudiamos un tiempo de promedio adecuado para *ABP* tomando en consideración la capacidad de un *ABP* para aprovechar los intervalos cortos de tiempo con alta velocidad de viento para generar energía, el análisis de la dispersión de las velocidades de viento a través de un espectro de potencias y el estudio de la influencia de tiempo de promedio en la evaluación del recurso. Para ello, varias evaluaciones del recurso son calculadas con la finalidad de determinar el impacto de usar tiempos de promedio menores a los diez minutos en el cálculo de la energía posible a producir, las muestras calculadas se generan usando la técnica de ensambles de promedios a partir de una muestra medida a intervalos de tiempo de un segundo, los datos

usados fueron medidos en Instituto de Energías Renovables, durante un período de tiempo de 50 días en Temixco, Morelos, México. ($18^{\circ} 50' 23''$, $99^{\circ} 14' 11''$). Los tiempos de promedio que utilizamos en el estudio fueron 1/60, 1/12 y 1/6. Con estos nuevos arreglos de datos, y en conjunto con las curvas de potencia de tres aerogeneradores de uso doméstico, se calcularon las correspondientes evaluaciones del recurso que nos darán elementos para determinar la influencia del tiempo de promedio sobre la estimación de la energía que es posible producir.

Esta parte del trabajo está organizada como sigue: En primer lugar se presentan los elementos teóricos relacionados con la técnica de ensambles de promedios; luego se desarrolla el marco conceptual, analizamos y discutimos el espectro de potencias de la dispersión de las velocidades de viento. Para complementar el análisis, se desarrollan evaluaciones del recurso eólico con la finalidad de claramente establecer una relación entre el tiempo del ensamble de promedios y la evaluación del recurso.

4.2. Espectro de la dispersión de las velocidades de viento para *ABP*

En esta sección se desarrolla el análisis sobre la dispersión de los datos de viento que determine un tiempo de promedio apropiado para aplicaciones de energía eólica de baja potencia en la región inter-tropical. Para ello se presentan los elementos conceptuales relacionados con la técnica de ensamble de promedios, su uso en los estudios de evaluación del recurso donde los datos experimentales son utilizados en conjunto con la curva de potencia del aerogenerador.

Ensamble de promedios

Los estudios relacionados con la evaluación del recurso eólico desde el punto de vista teórico se basan en conjuntos de datos calculados por la técnica de ensamble de promedios de 10 minutos. Con el propósito de establecer una idea clara de dicha técnica se explica brevemente a continuación.

Sea U_{1s} , el conjunto de todas las velocidades de viento registradas a intervalos de tiempo de un segundo¹ y tienen la forma

$$U_{1s} = \{u_1, u_2, u_3, u_4, \dots, u_n\}, \quad (4.1)$$

donde u_i es la velocidad medida al segundo i -ésimo. Esto es, para todo U_{1s} , el ensamble de

¹en este trabajo asumimos a la variable velocidades de viento continuas

promedios m con k -segundos como tiempo de promedio está dado por la ecuación 4.2,

$$\begin{aligned} m_K &= \frac{1}{k} \left(\sum_{w=1}^k U_w, \sum_{w=k+1}^{k+k} U_w, \dots, \sum_{w=jk+1}^{jk+k} U_w \right) \\ &= (m_k, m_{k+k}, \dots, m_{jk+k}), \end{aligned} \quad (4.2)$$

donde j es el número de conjuntos con $k > 3$ elementos que pueden ser calculados de una muestra con n elementos.

Como resultado de utilizar la ecuación (4.2) sobre los datos medidos por segundo, es posible obtener una serie de tiempo extra la cual estará conformada por los elementos que describen la dispersión a cada intervalo promediado. Esta información está contenida en la desviación estándar de la muestra, a esta serie de tiempo la denominaremos STD_K por la ecuación (4.3), donde el sub-índice K corresponde al mismo tiempo que se utiliza para calcular el ensamble de promedios definido en la ecuación (4.2).

$$\begin{aligned} STD_K &= \frac{1}{\sqrt{k}} \left(\sqrt{\sum_{w=1}^k (x_w - m_k)^2}, \sqrt{\sum_{w=k+1}^{k+k} (x_w - m_{k+k})^2}, \dots, \sqrt{\sum_{w=jk+1}^{jk+k} (x_w - m_{jk+k})^2} \right) \\ &= (STD_k, STD_{k+k}, \dots, STD_{jk+k}) \end{aligned} \quad (4.3)$$

Esta serie de tiempo asociada la dispersión se usa en la sección 4.2 para desarrollar un análisis por espectro de potencias de la dispersión de los datos. En la sección 4.3, tres conjuntos de datos fueron calculados con $k = 60, 300, 600$ segundos, que corresponden a m_{1min} , m_{5min} y m_{10min} respectivamente y serán usados para estudiar la influencia del tiempo de promedio en las evaluaciones del recurso eólico para *ABP*.

En la siguiente sección se describen los conceptos relacionados al análisis de la dispersión de las velocidades a través del un estudio de espectro de potencias, el cual proveerá elementos útiles para determinar un tiempo de promedio adecuado en los ensambles para aplicaciones de *ABP*.

Espectro de las componentes horizontales de las velocidades de viento

El utilizar 10 minutos como tiempo de promedio en los ensambles se basa en los resultados del trabajo de van der Hoven [56], el cual provee una interpretación de una región de mínima dispersión en el espectro de las componentes horizontales de las velocidades de viento. El estudio se desarrolló en Brookhaven, NY, EUA. Se encontró que este mínimo, aunque no claramente definido en la gráfica que presenta, está asociado a “condiciones de viento estables” según los resultados es posible representar condiciones de viento estables cuando se mide continuamente y promedia a intervalos de 10 minutos .

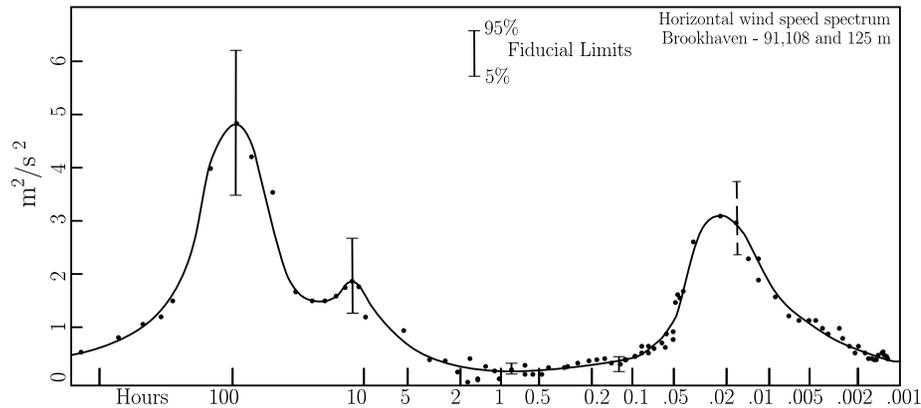


Figura 4.1: Espectro de las velocidades horizontales del viento generado por van der Hoven, el mínimo se localiza en las vecindades del ensamble de promedios de los 10 minutos, el primer pico se debe a las fluctuaciones de las velocidades de viento ocasionada por los sistemas de presión migratorios de escala de tiempo-mapa sinóptico. El último pico, se encuentra en el rango micro-meteorológico. Reconstruido de [56].

En la figura 4.1 hemos re-graficado el espectro de las componentes horizontales de las velocidades de viento presentado por van der Hoven. En la gráfica observamos dos grandes contribuciones al espectro; un pico ocurre en un tiempo promedio de 4 días y el segundo en un tiempo promedio de un minuto. De acuerdo a van der Hoven, el primero se debe a las fluctuaciones de las velocidades de viento ocasionada por los sistemas de presión migratorios de escala de tiempo-mapa sinóptico. El último pico, se encuentra en el rango micro-meteorológico. En este punto es claro que habrá mayor dispersión de los datos a bajas frecuencias, cercanas a un minuto. Estas variaciones de las velocidades de viento se encuentran fuera del rango de las condiciones estables observadas en periodos de los diez minutos.

Así, el usar un tiempo promedio de 10 minutos puede ser una buena aproximación para algunas regiones geográficas donde un análisis de la dispersión presenta dicho mínimo; sin embargo, en aquellos donde existe un amplio rango de variaciones a lo largo del tiempo, puede no ser una buena aproximación.

Como ya se ha mencionado, la principal diferencia entre un gran aerogenerador y los *ABP*, es la capacidad de estos últimos de generar energía incluso en los cambios súbitos de las velocidades de viento debido a la baja inercia de los dispositivos. A esta capacidad de responder rápidamente los cambios de la velocidad del viento y generar energía la denominaremos respuesta dinámica. De lo anterior consideramos que utilizar un tiempo promedio de 10 minutos por la técnica de ensamble de promedios, resultará en un filtro de alta frecuencia que puede ser consistente para un gran aerogenerador, pero no para un *ABP*. De esta forma cuando se eva-

lúa el recurso en un proyecto de alta potencia donde serán utilizados grandes aerogeneradores, es prudente seleccionar un tiempo promedio que presente las condiciones del viento estables del sitio, las ráfagas menores a los diez minutos no serán “sentidos” por estos dispositivos y consecuentemente no contribuirán a la producción de potencia. Por lo tanto, usar un tiempo promedio de 10 minutos en este tipo de proyectos es consistente. En contraste, un *ABP* puede utilizar un tiempo de muestreo menor debido a su rápida respuesta y variabilidad del viento.

En este trabajo nos enfocamos en *ABP* donde las ráfagas repentinas contribuyen a la producción eléctrica debido a la rápida respuesta dinámica de los dispositivos [17, 19, ?] así como sus interacciones con las condiciones micro meteorológicas del sitio. Por lo tanto, consideramos que el utilizar promedios de 10 minutos no es un procedimiento adecuado ya que se ha demostrado que el uso de velocidades promediadas disminuye la dispersión de los datos eliminando los velocidades más altas que contribuyen en mayor medida a las producción energética [27].

Ante la interrogante sobre si los tiempos promedio afectan sobre la evaluación del recurso, a continuación se presenta una metodología para analizar si la influencia del tiempo promedio en la evaluación del recurso eólico para aplicaciones de *ABP*. Consiste en calcular a partir de un conjunto de datos medidos a intervalos de tiempo de un segundo, dos series de tiempo: una de promedios m_k y otra de desviaciones estándar STD_k para los siguientes valores de k

$$K = \{2 \dots 9, 10 \dots 90, 100 \dots 900, 1000 \dots 4000\}$$

con incrementos de 1, 10, 100 y 200 segundos respectivamente. Es decir, las series de tiempo, m_K y STD_K representan los conjuntos de datos calculados para un ensamble de promedios y la correspondiente desviación estándar, ambos comparten el valor k . De tal forma que compararemos en el estudio 46 series de tiempo para distintos tiempos promedio y 46 series de desviaciones estándar.

Una vez calculadas todas las series de tiempo, utilizamos las correspondientes a la dispersión STD_i para desarrollar un análisis de espectro de potencias a cada una de las series [72]. Para cada serie se detecta y grafica el máximo de contribución al espectro. Este proceso se realiza para cada una de las 46 series de tiempo. En conjunto proveerán el tiempo de promedio que contribuya en mayor medida a las dispersiones y determinarán el tiempo que buscamos para las aplicaciones de *ABP*. Para desarrollar la metodología antes descrita se genera un código en Matlab cuyo diagrama de flujo se presenta en la figura 4.2.

El primer elemento que se presenta como resultado es la gráfica de una de las series de tiempo m_K y STD_K con $k = 60s$. En la figura 4.3 se grafican los primeros 30 minutos de la serie de tiempo m_{1min} representada por el símbolo \square . Cada punto presenta el promedio calculado a intervalos de tiempo de un minuto y sus correspondientes desviaciones estándar STD_{1min} . Esta última serie es representada por las barras de error. Como se mencionó anteriormente, la serie de tiempo asociada a la dispersión será la utilizada para desarrollar el análisis de espectro de las dispersiones. Es importante mencionar que el tamaño de las barras de error no es constante a

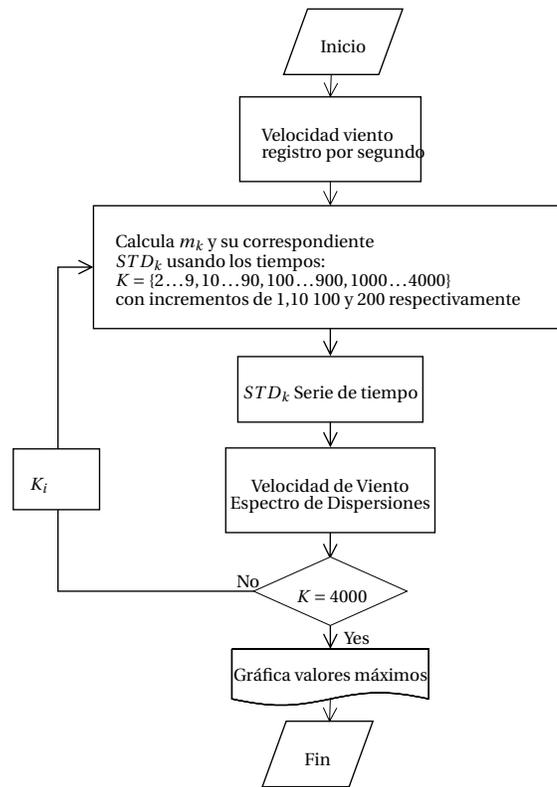


Figura 4.2: Diagrama del flujo del código de Matlab escrito para el estudio del espectro de la dispersión de las velocidades de viento.

lo largo del tiempo, lo cual confirma la existencia de variabilidad de las velocidades de viento.

Una vez calculadas todas las series temporales m_K y STD_K se calcula para cada STD_K el espectro de potencias y se detecta el máximo. Como resultado presentamos la figura 4.4 que contiene los máximos de todas los espectros de cada STD_K calculada. Para reforzar la discusión, se presentan en la misma gráfica los espectros completos para las series STD_{1min} , STD_{10min} y STD_{1hr} representadas por el símbolo \square unido por una línea sólida y el símbolo \triangle unido por la línea punteada y finalmente el símbolo \circ respectivamente.

En la figura 4.4 se observa que STD_{1min} y STD_{10min} presentan contribuciones al espectro en dos frecuencias, concentraremos la discusión en el máximo de estas. Existe una diferencia considerable entre los máximos, equivalente a los $250 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Esto confirma que el pico de la dispersión espectral se encuentra cerca del tiempo promedio de un minuto de acuerdo al trabajo de van der Hoven [56], lo notable del resultado son las grandes diferencias entre las magnitudes de los picos del máximo asociado al promedio de un minuto y la presencia del mismo en una región de vientos inter-tropicales. Dicha diferencia indica que existe una mayor dispersión en los datos estudiados en este sitio en particular. Además el máximo correspondiente al

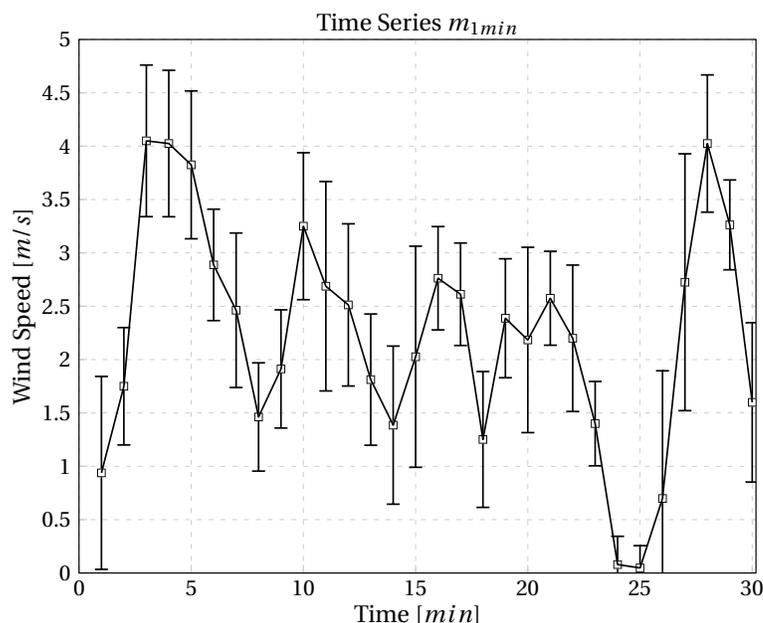


Figura 4.3: En esta gráfica se presentan los primeros 30 minutos de la serie de tiempo m_{1min} representada por el símbolo \square . Cada punto es el promedio calculado a intervalos de tiempo de un minuto y sus correspondientes desviaciones estándar STD_{1min} . Ésta última serie es representada por las barras de error.

tiempo promedio de una hora m_{1hr} se observa en la región izquierda inferior y está representado por el símbolo \circ . De acuerdo al espectro presentado por van der Hoven existe una zona de vientos estables entre las 0.1 y 2 horas donde la dispersión de las velocidades es pequeña, región observable en la figura 4.1, dicha zona de condiciones estables de viento no es observada en la figura 4.4 ya que entre los promedios de una hora y un minuto, sólo es posible afirmar que la dispersión disminuye en función del tiempo promedio, mas no que alcanza una región de estabilidad. Por otro lado, una diferencia significativa entre los espectros son las órdenes de magnitud entre las dispersiones, lo cual indica la existencia de mayores cambios detectados a lo largo del tiempo en la región aquí presentada. En cambio, existe una diferencia significativa entre STD_{10min} y STD_{1hr} . Este comportamiento significa que no hay una región en el espectro con un mínimo, por lo tanto, para el sitio analizado en la región intertropical un ensamble de promedios de 10 minutos no representa la denominada región de vientos estables. Esto puede ser ocasionado por la características geográficas de la región donde los datos fueron medidos y los rápidos cambios de las velocidades de viento son comunes e importantes en la producción energética para el caso de ABP.

En la siguiente sección se presenta un análisis para determinar si estos rápidos cambios en las velocidades de viento no detectados en un ensamble de promedios de diez minutos influye en la evaluación del recurso eólico.

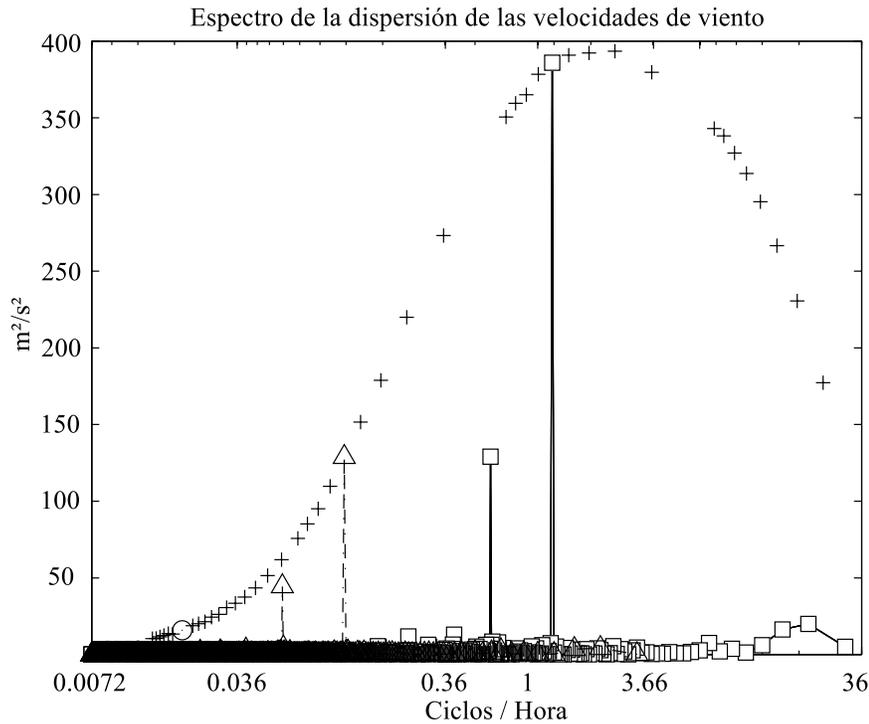


Figura 4.4: En esta figura se presentan los máximos de los espectros de cada STD_K calculada. Además, se presentan los espectros completos para las series STD_{1min} , STD_{10min} y STD_{1hr} representadas por el símbolo \square unido por una línea sólida y el símbolo Δ unido por la línea punteada y finalmente el símbolo \circ respectivamente.

4.3. Evaluación del recurso eólico

Hasta este momento se han presentado diferentes tiempos de promedio y el análisis de espectro de potencias para dichas series temporales, en esta sección se analizan los posibles impactos de utilizar distintos tiempos de promedio en las evaluaciones del recurso eólico. Como primer elemento del análisis se presenta la ecuación (4.4) que relaciona la energía por metro cuadrado disponible, donde ρ es la densidad del aire y $f(u)$ es la función de densidad de probabilidad que presenta el régimen de velocidades de viento u del sitio [60].

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A \int_0^{\infty} u^3 f(u) du \tag{4.4}$$

Para un régimen de vientos determinado representado por una función de densidad de pro-

Tabla 4.1: Especificaciones básicas de los *ABP* seleccionadas.

<i>ABP</i>	Diámetro de rotor [m]	Potencia nominal [kW]	Velocidad de arranque [m/s]
Bergey	2.5	1	3
Earth Tech	2.5	.5	3
North Power	2	1	3

babilidad $f(u)$, y una curva de potencia de un aerogenerador $P_w(u)$, la potencia media de la turbina, \bar{P}_w , está dada por la expresión (4.5). Esta metodología es la más común en la estimación de la potencia de salida para las aplicaciones de *ABP* [32].

$$\bar{P}_w = \int_0^{\infty} P_w(u) f(u) du \quad (4.5)$$

Tomando en cuenta las necesidades específicas de un proyecto de *ABP* donde es importante producir energía a las más bajas velocidades, se calcularon tres evaluaciones del recurso eólico para tres *ABP*. Estos aerogeneradores fueron seleccionados para generar energía con las condiciones específicas del sitio y optimizar la explotación del recurso. La principal característica técnica es su baja velocidad de arranque y áreas de barrido similares como puede observarse en la tabla 4.1.

Los *ABP* seleccionados fueron: a) Bergey BWCXL1 [73] con un diámetro de rotor de 2.5 y una potencia nominal 1kW, b) Earth-Tech ET500 [74] con un diámetro de rotor de 2.5 meters y una potencia nominal 500W y finalmente un c) True North Power [75] *SWT* modelo "Arrow" con un diámetro de rotor de dos metros y una potencia de 1kW.

Para establecer una idea clara sobre el proceso de cálculo, se presenta la evaluación del recurso para la serie de tiempo de un minuto P_{1min} y el aerogenerador North Power *SWT*. En la figura, 4.5 se presentan la función Weibull como $f(U)$ y la curva de potencia del *ABP* seleccionado como P_w de la ecuación (4.5). Con estas funciones y el tiempo de operación durante los 49.9 días se obtiene una potencia de $P_{1min} = 10.49kWh$, como se muestra en la tabla 4.2.

La tabla 4.2 se calcula para analizar la influencia del tiempo promedio sobre la evaluación de recurso eólico, en ésta se presenta la energía disponible y la producida para cada *ABP*. Usando la ecuación (4.4) y el correspondiente tiempo de operación se calcula la columna número dos de la tabla la cual corresponde a la energía disponible $P_{Available}$, las columnas tercera, cuarta y quinta presentan los resultados de la evaluación del recurso eólico usando como tiempo de promedio 1, 5 y 10 minutos, dichas evaluaciones fueron calculadas a partir de la ecuación (4.5) y son representados por P_{1min} , P_{5min} y P_{10min} respectivamente.

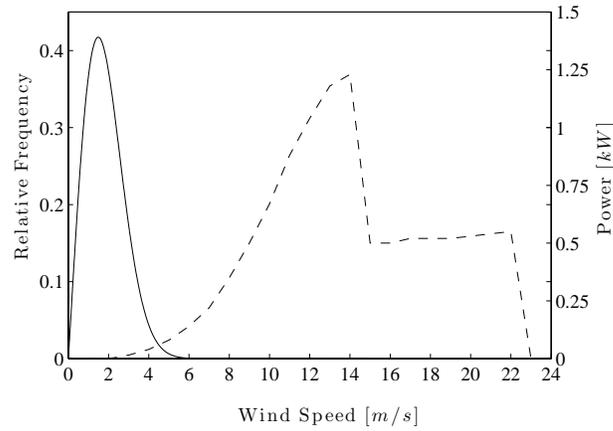


Figura 4.5: En la presente gráfica se observa función Weibull ajustada al conjunto de datos con parámetros de escala y forma $\alpha = 2.08$ y $\beta = 2.03$ y la curva de potencia del aerogenerador North Power en líneas sólida y punteada respectivamente.

Tabla 4.2: En esta tabla se presentan las evaluaciones del recurso para los *ABP* seleccionados enlistados en la primer columna. La segunda columna presenta la energía disponible para las áreas de barrido. La tercera, cuarta y quinta columna corresponde a la energía producida usando diferentes conjuntos generados para tres tiempos promedio 1, 5 y 10 respectivamente.

Modelo de Aerogenerador	$P_{Available}$	P_{1min}	P_{5min}	P_{10min}
		[kWh]		
Bergey	43.05	16.02	14.28	13.34
Earth Tech	43.05	17.78	16.03	15.00
North Power	27.68	10.49	9.37	8.75

De la tabla 4.2 se observa que el seleccionar un promedio al evaluar un *ABP* determina la producción de energía, por lo tanto, es importante establecer una metodología que se enfoque en este sentido como fue señalado por [22]. Además, es importante notar que aunque dos *ABP* presentan las mismas potencias nominales, las producciones de energía bajo las mismas condiciones de viento no son iguales. Esto se debe a las características técnicas que los componen que influyen en la eficiencia del aparato, como la calidad del generador o el diseño de las aspas.

La siguiente etapa del análisis consiste en presentar la diferencia porcentual entre las evaluaciones del recurso P_i y P_j con $i < j$, usando la ecuación (4.6). Los resultados de estas diferencias se presentan en la tabla 4.3, en la cual se observa el hecho común que el utilizar tiempos de promedio mayores, genera menores estimaciones del recurso, lo cual confirma la subestimación del recurso encontrada en el trabajo [27]. Por lo tanto, las más alta diferencia entre las estimaciones energéticas se presenta entre los tiempos promedio de 1 y 10 minutos.

Tabla 4.3: Aquí se presentan las diferencias porcentuales entre la energía calculada para los tiempos promedio de 1, 5 y 10 y los *ABP* seleccionados.

Modelo del Aerogenerador	Diferencia Porcentual [%]		
	P_{1min} y P_{5min}	P_{1min} y P_{10min}	P_{5min} y P_{10min}
Bergey	10.8	16.7	6.6
Earth Tech	9.8	15.6	6.4
North Power	10.7	16.6	6.6

$$\text{Diferencia Porcentual} = \frac{P_i - P_j}{P_j}, i < j \quad (4.6)$$

Esta subestimación es causada por asumir en el ensamble de promedios; que la media aritmética es una representación confiable de la serie de tiempo original. Esto implicaría que la variable que es medida a lo largo del tiempo es una muestra normal o Gaussiana lo cual no es necesariamente cierto [76]. Como un ejemplo de nuestro dicho, la función de densidad de probabilidad más usada en la evaluación del recurso eólico es la distribución Weibull [64]. Además, existen regiones alrededor del mundo que deben ser representadas por distribuciones bimodales [66]. Por otro lado, asociar una distribución Normal a la variable velocidad de viento genera una pérdida significativa de información del conjunto original de datos, como lo es su asimetría. Esto es un parámetro muy importante ya que las velocidades más altas son las que producen más energía y son estas la que son despreciadas en el proceso aritmético [27], de tal forma que la evaluación final no necesariamente representará las condiciones de viento produciendo una subestimación del recurso.

Es importante mencionar, que aunque la cantidad de datos utilizados en este estudio no son suficientes para detectar cambios estacionales o inter-anales, los cuales se encuentra fuera del alcance de este trabajo, son útiles para establecer una metodología clara respeto al tratamiento estadístico que sufren los datos experimentales en la evaluación del recurso eólico. La subestimación del recurso y el consecuente análisis desarrollado en este trabajo es una consecuencia de la técnica de muestreo, no del tiempo total de la evaluación, dado que la variable de estudio es el tiempo promedio para el ensamble.

El tiempo propuesto en esta parte del trabajo responde a la necesidad de tomar en consideración los rápidos cambios en las velocidades de viento que contribuyen en la generación eléctrica dado el tiempo de repuesta dinámico de un aerogenerador de baja potencia.

Además, el utilizar un tiempo de promedio más corto para el ensamble de promedios, preserva información útil para la correcta caracterización del sitio. Este tiempo toma en consideración las características físicas de los *ABP* como el tiempo de respuesta dinámica. Aunque estos resultados son en cierta medida esperados, es importante hacer énfasis que la diferen-

cia de energía en los tiempos de muestreo, es un elemento importante que debe tomarse en consideración para el desarrollo de evaluaciones del recurso confiables. De tal forma que establecer el tiempo de promedio adecuado para el tipo de aplicación eólica es de vital importancia.

Es importante señalar, que la diferencia entre las evaluaciones del recurso a distintos tiempo de promedio, como las encontradas en la tabla 4.3 puede ser un factor determinante en el rechazo o no de un proyecto que involucre el uso de *ABP* como generadores de electricidad.

Se ha detectado que existe una diferencia en la evaluación del recurso ante distintos tiempo promedio, para determinar si dicha diferencia es significativa es necesario realizar un análisis del error en la estimación del recurso, la metodología para desarrollarlo se presenta en el siguiente capítulo.

El error en la evaluación del recurso

Una contribución en el desarrollo de evaluaciones del recurso eólico confiables

5.1. Introducción

Alcanzar el objetivo de desarrollar evaluaciones del recurso confiables no es tarea sencilla, dado que como hemos visto el proceso de cálculo involucra distintas fuentes de incertidumbre que van desde las relacionadas a las variables físicas y los procesos estadísticos implícitos. En este trabajo nos enfocaremos al análisis de las incertidumbres en la etapa temprana de la estimación del recurso eléctrico. La metodología que se presenta aquí ofrece un elemento complementario que contribuye al desarrollo de evaluaciones de recurso eólico confiables. Éste método involucra tres variables la incertidumbre asociada a la medición de las velocidades del viento, la calidad del ajuste de las *FDP* y la curva de potencia de un aerogenerador *CPA*. El resultado de la aplicación del método es la propagación del error que toma en cuenta los elementos involucrados en el cálculo de la evaluación del recurso.

Para obtener la propagación del error en la primer parte de este capítulo, se presenta el marco teórico que es utilizado para analizar las incertidumbres asociadas en la evaluación del recurso eólico. Posteriormente se obtendrá una expresión específica para el caso de la incertidumbre en la evaluación del recurso y se identifican los elementos involucrados. Finalmente, se utilizan varios errores asociados a las mediciones de las velocidades de viento para calcular varias evaluaciones del recurso eólico y analizar los resultados correspondientes.

Al igual que en el capítulo anterior, para el desarrollo del este capítulo se utiliza un conjunto de datos medido y registrado en el Instituto de Energías Renovables de la U.N.A.M., durante un 50 días en Temixco, Morelos, México. (18° 50' 23", 99° 14' 11"), la principal característica de este conjunto de datos es que fueron registrados cada segundo y no poseen tratamiento estadístico previo. Es importante mencionar que aunque la muestra no es tiempo suficiente para la estimación del recurso, sí lo es para ilustrar la metodología y su uso.

5.2. El recurso eólico y la propagación de incertidumbre

La evaluación del recurso eólico es el proceso teórico utilizado para el cálculo de la cantidad de energía que es posible producir tomando en cuenta los siguientes elementos: las condiciones de viento del sitio a evaluar y las características técnicas del aerogenerador, representado por la *FDP* o $p(u)$ y la *CPA* o $P_w(u)$ respectivamente.

El proceso aritmético en la evaluación, consiste en utilizar un ensamble de promedios como se describió en el capítulo anterior. Estos elementos son lo utilizados como datos de entrada para la ecuación (4.5) como se describió en el capítulo anterior.

$$\bar{P}_w = \int_0^{\infty} P_w(u)p(u)du.$$

Esta expresión será utilizada como base para el cálculo de la propagación de incertidumbre el cual será descrito a continuación.

Una vez identificadas las funciones matemáticas utilizadas en la evaluación del recurso eólico, en esta presentamos el marco teórico respecto a la propagación de errores.

Una cantidad que es función de al menos dos variables medibles $z = f(x, y, \dots)$, la propagación del error está dada por la expresión (5.1), según [77, 78].

$$\delta z^2 \simeq \delta x^2 \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \delta y^2 \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2 + \dots + 2\delta x y^2 \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right) + \dots \quad (5.1)$$

Es importante mencionar que la expresión (5.1) contiene derivadas combinadas las cuales pueden ser eliminadas en los casos específicos donde las variables no están correlacionadas. Con la finalidad de establecer el modelo más sencillo en la propagación asumimos este hecho como real. Por lo tanto la expresión (5.1) se re-escribe como (5.2)

$$\delta z^2 \simeq \delta x^2 \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \delta y^2 \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2 + \dots \quad (5.2)$$

Los elementos δx^2 y δy^2 en la expresión (5.2) representan la varianza de cada variable.

De la ecuación (5.1) se define al término $\pi(u)$ como densidad de potencia como sigue:

$$\pi(u) = P_w(u)p(u) \quad (5.3)$$

donde P_w representa el aerogenerador seleccionado para la evaluación del recurso y $p(u)$ el modelo estadístico que representa las condiciones de viento de la región en la que se estimará el recurso.

Para calcular el error en la densidad de potencia, $\delta\pi$, se aplica la ecuación (5.2) a $\pi(u)$. Sin embargo, la *FDP* es una función de tres parámetros: la velocidad del viento u , y dos parámetros que definen la forma c y la escala k de la función. De tal forma, que la densidad de potencia π , es también una función de éstos, es decir, $\pi(u, c, k)$ como se observa en (5.4).

$$\begin{aligned}\delta\pi^2 &= \left(\frac{\partial\pi}{\partial u}\right)^2 \delta u^2 + \left(\frac{\partial\pi}{\partial c}\right)^2 \delta c^2 + \left(\frac{\partial\pi}{\partial k}\right)^2 \delta k^2 \\ &= \left[\frac{\partial P_w}{\partial u} p + P_w \frac{\partial p}{\partial u}\right]^2 \delta u^2 + \left[P_w \frac{\partial p}{\partial c}\right]^2 \delta c^2 + \left[P_w \frac{\partial p}{\partial k}\right]^2 \delta k^2\end{aligned}\quad (5.4)$$

Algunas *FDP* utilizada en la evaluación del recurso son sólo función de dos parámetros, la velocidad del viento u y un factor de forma c . Para el desarrollo de esta función consideraremos solo *FDP* de dos variables, por lo tanto, la expresión de la propagación de error para éste caso específico (5.4) toma la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\delta\pi^2 &= \left(\frac{\partial\pi}{\partial u}\right)^2 \delta u^2 + \left(\frac{\partial\pi}{\partial c}\right)^2 \delta c^2 \\ &= \left[\frac{\partial P_w}{\partial u} p + P_w \frac{\partial p}{\partial u}\right]^2 \delta u^2 + \left[P_w \frac{\partial p}{\partial c}\right]^2 \delta c^2\end{aligned}\quad (5.5)$$

En la ecuación (5.5) observamos dos funciones conocidas la *CPA* representada por P_w y la *FDP* o $p(u)$, sin embargo, se incluyen dos nuevos elementos de dispersión en la expresión de propagación, uno corresponde a la velocidad del viento δu y el segundo está asociado al parámetro que define la función probabilística δc .

En la ecuación (5.5), el parámetro asociado a la dispersión de las velocidades del viento se representa por δu ; para calcularlo, tomamos en cuenta que cada velocidad del viento medida tiene asociada una incertidumbre que proviene del proceso de la medición e_u , el cual tiene valores entre el uno y diez por ciento. Estos valores de incertidumbre corresponden a la calidad de la medición requerida por el estándar internacional con anemómetros de primera clase y las tradicionales estaciones meteorológicas respectivamente. Para la propagación del error, se asocia el concepto de dispersión dado por la expresión (5.5) a la incertidumbre asociada a la medición de la velocidad del viento, de tal forma que δu contribuye con información importante sobre la calidad de la medición y por lo tanto sobre la calidad del aparato que se utiliza con dicho fin. La inclusión de este parámetro da un criterio de la influencia de la velocidad asociada a la velocidad del viento sobre la incertidumbre en la estimación de la potencia de generación posible. Este criterio nunca ha sido incluido en el proceso de la evaluación de recurso eólico. Dicha propagación se puede calcular dado que los datos experimentales utilizados no poseen tratamiento estadístico previo y preservan su dispersión. De tal forma que, δu se define en la ecuación (5.6) como sigue:

$$\delta u_i = e_u u_i, \quad e_u \in \{1\% \dots 10\%}\quad (5.6)$$

donde i es la velocidad del viento registrada al segundo i -ésimo del conjunto de datos.

Hasta este punto, se han presentado los elementos de la ecuación (5.5) y detallado δu_i en la siguiente sub-sección se identificarán específicamente las características del modelo estadístico que será utilizado para representar las condiciones de viento del lugar.

Rayleigh FDP

Una de las FDP más usadas en la evaluación del recurso eólico es la distribución de Rayleigh [64]. Ésta es la distribución de frecuencias más sencillas para ajustar a un conjunto de datos ya que requiere sólo del conocimiento de la velocidad media de la muestra \bar{u} para calcular el parámetro que la define [60]. En este caso la FDP, $p(u)$ y la función acumulada de frecuencias relativas $F(u)$ están dadas por:

$$p(u) = 2cu \exp(-cu^2), \quad (5.7)$$

$$F(u) = 1 - \exp[-cu^2] \quad (5.8)$$

donde

$$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \quad (5.9)$$

$$c = \frac{\pi}{4\bar{u}^2}$$

Como se mencionó anteriormente, el modelo estadístico usado para representar las condiciones de viento del lugar puede ser una función de dos o tres parámetros. Para calcular el error correspondiente para una función de dos parámetros, \bar{u} y c , como la FDP Rayleigh, el último elemento de la suma en la ecuación (5.4) es igual a cero porque $k = 0$ en el modelo probabilístico.

Además, la selección del modelo estadístico permite calcular δc que representa la dispersión del parámetro de ajuste que determina a su vez la forma de la función, en la medida que el parámetro c tiene asociado un función bien definida (5.10). Para el desarrollo del cálculo propagamos la incertidumbre asociada al error en la medición e_u a través del cálculo de las velocidades promediadas definida por la ecuación (5.10) usando (5.1) para este caso específico, lo cual resulta en la expresión (5.10).

$$\delta c = e_u \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i^2 \quad (5.10)$$

La ecuación (5.10) contribuye con información extra sobre la FDP ajustada a la expresión de propagación general, la cual no solo involucra una FDP sino también considera la influencia de la calidad del instrumento de medición en términos de la función probabilística empleada.

Como último elemento teórico necesario es la curva de potencia del aerogenerador *CPA* la cual debe satisfacer ciertas condiciones, como por ejemplo tener al menos una primer derivada. La construcción teórica de dicha función se aborda en la siguiente sección.

Curvas de potencia de *ABP*

En la sección anterior se presentaron los elementos teóricos necesarios para desarrollar la propagación del error en la evaluación del recurso eólico. Aquí presentamos el último de ellos la *CPA* representada por P_w en la ecuación (4.5). Como se mencionó en la introducción de este capítulo, este elemento ha sido identificado como una fuente de incertidumbre en la evaluación de recurso [31, 28].

La función P_w debe satisfacer algunas características para el cálculo de las incertidumbres. Debe ser diferenciable, por lo menos, la primer derivada debe existir. Las demás características de la función están definidas por algunas características técnicas del aerogenerador como las velocidades de: arranque, corte, de máxima y mínima potencia ; por lo tanto estas velocidades deben estar definidas en la curva. Por otro lado, en la literatura es difícil encontrar curvas de potencia con funciones bien comportadas, es más, los valores que las representan comúnmente son valores discretos. Para satisfacer las condiciones previamente mencionadas se propone al conjunto de valores discretos mediante el método de interpolación de Lagrange. Este método genera un polinomio que satisface las condiciones necesarias de la derivada. Además, provee gran flexibilidad para seleccionar los puntos donde el polinomio debe estar definido y que además represente las velocidades que caracterizan a toda curva de potencia de un aerogenerador. Finalmente, es posible calcular la correlación entre polinomio propuesto y los datos discretos que representan originalmente las curvas de potencia para así determinar el mejor ajuste entre estos.

Ante la escasez en la literatura de funciones que cumplan con las características antes mencionadas se utiliza un catálogo de 28 *ABP* con valores discretos disponibles en el proyecto *RETScreen* [79]. Todas las curvas de potencia son conjuntos de valores naturales discretos definidos entre el 0 y los 18[m/s]. Para determinar la función P_w que represente cada conjunto de datos, varias combinaciones fueron probadas, para determinar el mejor ajuste entre las distintas combinaciones de puntos y las funciones propuestas se utilizó el criterio basado en el coeficiente de correlación de Pearson. Este coeficiente determina el mejor ajuste cuando el valor calculado para la correlación es lo más cercano a uno.

El ajuste de interpolación de Lagrange, define que si contamos con N valores discretos, un polinomio de grado $N - 1$ puede encontrar que la función cruzará todos los puntos [80] y está definida según la expresión (5.11)

$$f(x) = \sum_{i=1}^N f(x_i) P_i^L(x) \quad (5.11)$$

#	Modelo de <i>ABP</i>	Curvas de potencia ajustadas por Lagrange $P_w(u)$
1	AWP3.6(Grid tie) 3.6m 1.6kW	$-1.486 \times 10^{-6} x^5 + 2.594 \times 10^{-4} x^4 - \dots$ $-9.477 \times 10^{-3} x^3 + 1.137 \times 10^{-1} x^2 - \dots$ $\dots - 3.339 \times 10^{-1} x + 2.847 \times 10^{-1}$
2	Ampair 600-230 1.7m	$-7.121 \times 10^{-8} x^7 + 4.686 \times 10^{-6} x^6 - \dots$ $\dots - 1.278 \times 10^{-4} x^5 + 1.908 \times 10^{-3} x^4 - \dots$ $\dots - 1.726 \times 10^{-2} x^3 + 9.369 \times 10^{-2} x^2 - \dots$ $\dots - 2.366 \times 10^{-1} x + 2.097 \times 10^{-1}$
3	Bergey BWCXL1 2.5m 1kW	$-5.538 \times 10^{-7} x^7 + 3.533 \times 10^{-5} x^6 - \dots$ $\dots - 8.695 \times 10^{-4} x^5 + 1.04 \times 10^{-2} x^4 - \dots$ $\dots - 6.406 \times 10^{-2} x^3 + 2.108 \times 10^{-1} x^2 \dots$ $\dots - 2.923 \times 10^{-1} x + 1.359 \times 10^{-1}$

Tabla 5.1: Tres curvas de potencia ajustadas por el método de interpolación de Lagrange, en la columna uno se asigna un número para identificarla en los resultados que se presentarán adelante, en la columna 2 se muestra el nombre del modelo del *ABP*, la columna 3 presenta el polinomio ajustado.

donde $f(x_i)$ son los valores conocidos de la función y $f(x)$ es el valor que se interpola. El polinomio de Lagrange P_i^L es el polinomio de orden $N - 1$ que vale 1 cuando $x = x_i$ y 0 para todo $x_{j \neq i}$:

$$P_i^L = \frac{\prod_{j \neq i} (x - x_j)}{\prod_{j \neq i} (x_i - x_j)} \quad (5.12)$$

La ecuación (5.12) representa el polinomio interpolado por el método de Lagrange, que es el último elemento necesario para desarrollar el cálculo de la propagación de incertidumbre, de tal forma que el polinomio interpolado será la curva de potencia $P_i^L = P_w$, en la siguiente sección se presenta y discuten los resultados obtenidos.

5.3. Error en la evaluación del recurso eólico

En las secciones anteriores se presentaron todos los elementos teóricos necesarios para desarrollar la propagación de incertidumbres en la evaluación del recurso eólico. En esta sección, se presenta en primer lugar el catálogo de los 28 *ABP* usados como P_w . A continuación se desarrollan y grafican los resultados de las evaluaciones del recurso eólico para finalmente mostrar los error de las evaluaciones calculadas. La tabla 5.1 presenta los primeros tres polinomios usados como curvas de potencia del banco de *ABP*.

En el apéndice A se presenta la tabla A.1 que contiene el catálogo completo de curvas de potencia del aerogenerador, para facilitar la presentación de resultados se numeraron consecutivamente y están ubicados en la columna 1 de la tabla 5.1. En la figura 5.4 se presentan los

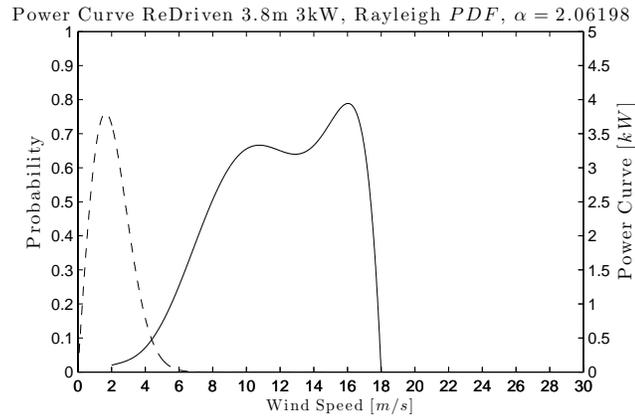


Figura 5.1: La curva punteada representa la *FDP* Rayleigh con parámetro $\alpha = 2.06198$. En línea sólida el polinomio ajustado por el método de Lagrange y que es usado como curva de potencia del aerogenerador #18, el cual corresponde a ReDriven con potencia nominal de 3 kW y un área de barrido de 3.8m.

coeficientes de correlación de Pearson de todos los polinomios ajustados, en ella observamos que en todos los casos son mayores a 0.93 lo cual indica que los datos discretos y los polinomios ajustados se encuentran altamente correlacionados.

Como ejemplo de las funciones generadas como *CPA*, la figura 5.1 presenta el polinomio seleccionado para el aerogenerador *ReDriven 3.8m* representado por una línea sólida y la *FDP* Rayleigh con parámetro $c = 2.06198$ ajustado al conjunto de datos y es representado por una línea punteada. Como puede observarse P_w está bien definida en las velocidades de arranque y además es una curva suave, es decir, todas las condiciones antes definidas se cumplen.

A continuación se presentan las evaluaciones del recurso eólico calculados a partir de la ecuación (5.1) y el tiempo de operación, en la figura 5.2. Las evaluaciones se presentan en orden ascendente.

De la figura 5.2 se observa que la selección del *ABP* apropiado es un paso fundamental en la evaluación de recurso eólico [27], aunque todas las turbinas son apropiadas para la explotación del recurso a escala doméstica, se observa una diferencia de 300kWh entre las evaluaciones más alta y baja para aerogeneradores que operan a distintos regímenes de viento, las cuales corresponden a *Samprey Wren ABP* con 1m de diámetro y una potencia nominal de 0.3kW y un *ABP Travers* con 3.6m de diámetro y una potencia nominal de 3kW. Dicha diferencia en la producción de energía estimada puede deberse a las potencias nominales y áreas de barrido, no obstante, es fundamental para la evaluación tecno-económica tener clara la demanda a abastecer para evaluar un *ABP* con apropiadas dimensiones y potencia y así evitar gastos innecesarios en dispositivos de mayor potencia.

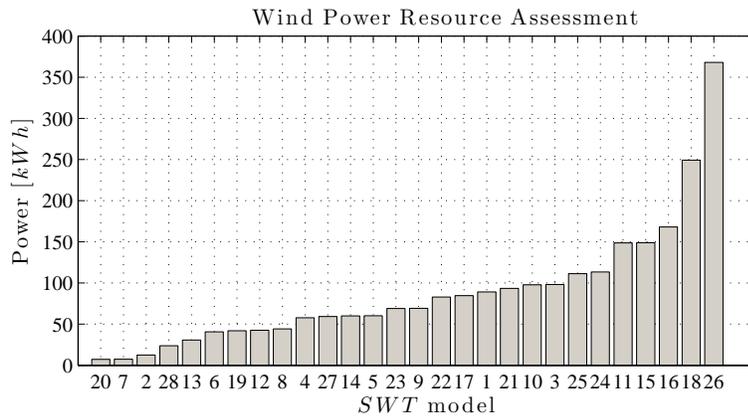


Figura 5.2: Aquí se presentan las estimaciones del recurso eólico para los 28 aerogeneradores de baja potencia utilizados en el estudio. Aunque todos los aerogeneradores están clasificados como aerogeneradores de baja potencia los resultados de la potencia producida varía ampliamente. La diferencia entre la potencia producida entre el más alto y el más bajo es alrededor de 350 kWh lo cual indica que el seleccionar un *ABP* adecuado es un factor clave en los estudios de factibilidad tecno-económica.

Finalmente se presentan los errores propagados en la evaluación del recurso eólico, los resultados que se presentan se calcularon utilizando la ecuación (5.5) y la ecuación de propagación de la suma de todos los $\delta\pi(u)$. La figura 5.3 muestra el error relativo del el cálculo para todas las curvas de potencia, todas la *FDP* y un error asociado al instrumento de medición del 10% que se traduce en un error en la potencia eléctrica que tiende al 5%. Aunque este error no es muy común entre los instrumentos de medición se presenta dado que ofrece un punto máximo de referencia. Los errores en las velocidades del viento con errores del 5 y 2 por ciento resultan en errores de la estimación potencia eléctrica que tienden al 2.5 y 1 por ciento respectivamente.

El error propagado está compuesto por los siguientes elementos: una curva de potencia de un aerogenerador, los parámetros que definen la *FDP* y la información de la dispersión de las velocidades de viento dadas por la incertidumbre de instrumento de medición. Se observa que en la propagación de errores presentada la única función que cambia es la curva de potencia del aerogenerador, de tal forma que sería fácil concluir que la expresión usada para la propagación toma únicamente en consideración la calidad del ajuste del polinomio utilizado. Para mostrar que la propagación de error calculada no solo es función del ajuste se presentan las figuras 5.3 y 5.4 que muestran que el error entre las potencias calculadas no tiene el mismo comportamiento que los parámetros que determinan en mejor ajuste, esto significa, que la calidad del ajuste no es el único que es tomado en cuenta para la propagación de error aquí propuesta.

En el capítulo anterior [81] se muestra que el tiempo promedio en la evaluación del recurso

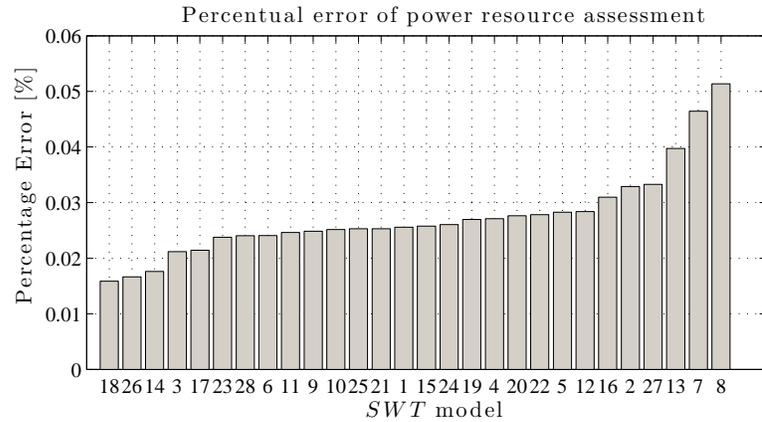


Figura 5.3: En esta figura se presentan los errores asociados a la potencia estimada en la evaluación del recurso calculada para cada aerogenerador de baja potencia usado en el estudio. Dichos errores corresponden a un error en la medición del 10 %

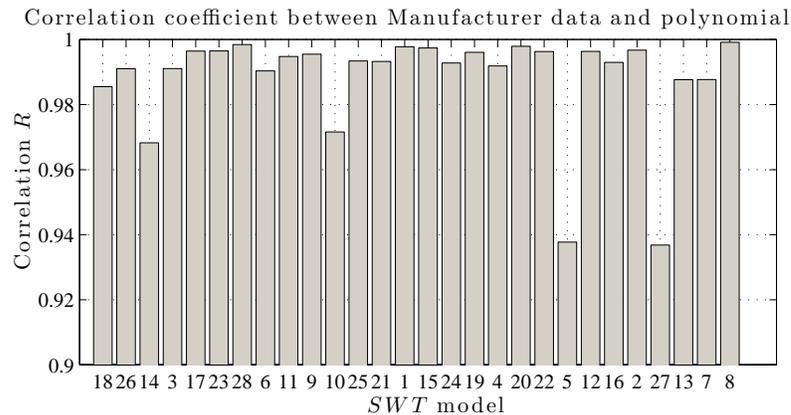


Figura 5.4: En esta gráfica se presentan los coeficientes de correlación de Pearson entre los valores discretos de la curva de potencia y las funciones ajustadas. El orden como se presentan los valores de los coeficientes ABP es el mismo que en la figura 3, las diferentes tendencias entre figuras significan que las potencias calculadas no responde únicamente a la calidad del ajuste del polinomio dado por la correlación.

eólico tiene una influencia importante en la potencia calculada, mientras menor sea el tiempo promedio mayor sera la evaluación del recurso. Por ejemplo, la diferencia entre evaluaciones del recurso basadas en tiempos promedio de uno y diez minutos es cercano al 16%. Y tienen un error en el cálculo en la evaluación del recurso del 2%, por lo tanto los resultados aquí presentados muestran que las diferencias entre os cálculos de energía son significativos al encontrarse fuera del intervalo de error.

El Estándar Internacional IEC-61400 [55] provee algunos elementos en su anexo D y E para desarrollar una estimación de la incertidumbre en el desempeño de los aerogeneradores y la posible producción anual. El estándar tiene el propósito de proveer una metodología uniforme que asegure consistencia, precisión y reproducibilidad en la caracterización del desempeño del aerogenerador. Dicho cálculo requiere elementos específicos de condiciones experimentales igualmente específicas. Sin embargo, este cálculo tienen algunas limitantes, en primer lugar asume que: *un tiempo promedio de 10 minutos tanto para monitoreo del aerogenerador como para la evaluación del recurso son fenómenos completamente explicados mutuamente*. En segundo lugar, la propagación del error propuesta en esta tesis provee una perspectiva teórica posible de calcular en la temprana etapa de le evaluación del recurso.

Aplicación en los estudios de factibilidad tecno-económica

En la pasada sección, se presentan las bases matemáticas para la propagación de los errores así como los resultados en las evaluaciones del recurso. Estos son elementos que contribuyen en la determinación de la factibilidad tecno-económica del proyecto de generación eléctrica. En esta parte del trabajo presentaremos la gran utilidad de los conceptos desarrollados y su potencial impacto en dichos estudios.

Un criterio común en el mercado eléctrico mexicano respecto a los estudios de factibilidad tecno-económica es el cálculo del Costo Nivelado de Producción, *CNP* que está dado por la ecuación (5.13)

$$PLC = \frac{\sum_{t=-N}^{-1} I_t(1+j)^{-t}}{\sum_{t=0}^{n-1} EP(1+j)^{-t}} \quad (5.13)$$

donde I_t es la inversión en el año t , EP es la energía anual a producir, N el tiempo de construcción, n la vida económica del proyecto j la tasa de descuento.

Una aplicación útil para propagar el error en la estimación de la energía generada, es la posibilidad de ofrecer un criterio extra utilizando los resultados aquí presentados en los estudios de factibilidad.

Como se demostró en las secciones anteriores, la principal ventaja de utilizar en las evaluaciones del recurso velocidades de viento sin tratamiento estadístico previo, es la posibilidad de estimar el error de EP . Esta energía es calculada al integrar la ecuación (5.3) para todo tiempo medido, su error asociado δEP se calcula usando (5.5) de tal forma que EP puede ser expresada como $EP \pm \delta EP$.

Por lo tanto, el cálculo de PLC ahora provee un intervalo del costo dado por (5.14)

$$PLC_{\{High,Low\}} = \frac{\sum_{t=-N}^{-1} I_t(1+j)^{-t}}{\sum_{t=0}^{n-1} EP \pm \delta EP(1+j)^{-t}} \quad (5.14)$$

lo cual es un elemento extra que genera un sentido de la variabilidad del costo y por lo tanto contribuye en aumentar la confiabilidad de los estudios de factibilidad tecno-económica.

Conclusiones

En comparación con los grandes aerogeneradores, las aplicaciones con *ABP* responden a diferentes necesidades, diseño, características técnicas y energía a abastecer son los principales elementos que establecen una línea clara entre estas aplicaciones, por lo tanto, usar el mismo paradigma en la evaluación del recurso puede conducir a resultados poco confiables. En el capítulo 3 se presenta un nuevo elemento que contribuye a generar un paradigma diferente en la evaluación del recurso acorde a las aplicaciones de *ABP*.

Se afirma que la selección del tiempo promedio debe corresponder al tiempo de respuesta dinámico del *ABP*, por lo tanto, se sugiere que este importante parámetro del aerogenerador aparezca en las especificaciones técnicas del aparato.

En común encontrar en la literatura relacionada a la evaluación del recurso eólico estudios basados en datos existentes de estaciones meteorológicas que usan tiempos promedio para el ensamble de media hora hasta una hora, la conclusión de este tipo de estudios es el rechazo del sitio como abastecedor de energía para aplicaciones a gran escala. Como se discutió en el capítulo 3 se recomienda tomar en consideración un tiempo de promedio adecuado así como el tiempo de respuesta dinámico del dispositivo.

La evaluación del recurso es una etapa crucial en cualquier proyecto renovable de energía, por lo tanto es muy importante cualquier esfuerzo que contribuya a reducir o detectar las fuentes de incertidumbre envueltas en el proceso teórico. En el capítulo 4 se presenta una expresión general así como una metodología para desarrollar el cálculo del error en la evaluación del recurso eólico, el cual toma en consideración tres fuentes de incertidumbre presentes en el proceso: la relacionada a la medición de la velocidad del viento, la calidad del ajuste de la función de densidad de probabilidad y la curva de potencia del aerogenerador.

Dadas las características de las curvas de potencias disponibles en la literatura, se genera

un catálogo de 28 curvas de potencia representadas por polinomios obtenidos a partir de una interpolación de Lagrange para el cálculo del recurso eólico, estas curvas de potencia son bien comportadas y definidas en las velocidades características de los aerogeneradores, lo cual indica que el método empleado es adecuado.

Uno de los más importantes resultados es la posibilidad de obtener una relación cuantitativa entre el error asociado a la medición de la velocidad de viento y el error en la estimación de la potencia posible de producir. Proceso nunca antes abordado, esto se debe a que el uso de ensamble de promedios como técnica de muestreo limita la capacidad de ofrecer un análisis de la dispersión de las velocidades de viento únicamente al las desviaciones estándar asociadas al promedio, lo cual puede estar basado en una hipótesis equivocada al suponer que las velocidades a lo largo del tiempo pueden ser representadas como fenómenos normalmente distribuidos.

Aunque todos los aerogeneradores utilizados en las evaluaciones del recurso están diseñadas para aplicaciones domésticas, el hecho de seleccionar un aerogenerador no apropiado para las condiciones de viento puede afectar considerablemente los resultados de la evaluación ya que ante las mismas condiciones los desempeños son diferentes, por lo tanto es importante desarrollar metodologías confiables que generen curvas de potencia confiables que representen un comportamiento real en la potencia a generar.

Es posible de calcular la propagación del error de la velocidad del viento en términos de la estimación de la potencia a generar, debido a que las velocidad de viento utilizadas no provienen de tratamiento estadístico previo, característica importante dado que la técnica de muestreo utilizada para estos fines no preserva la información de la dispersión de la serie temporal. Además, la contribución de este trabajo es la capacidad de ofrecer una metodología para el cálculo del error en la estimación de la potencia eléctrica en la etapa temprana de la evaluación del recurso. Además, los resultados presentados en el capítulo 4 proveen un estimado de la calidad de la medición con la finalidad de obtener estimaciones del recurso confiables, dado que hace posible establecer un límite del error en el instrumento de medición, abriendo la posibilidad de monitoreo a instrumentos de menor costo.

Finalmente, en el desarrollo de este trabajo se presenta una aplicación útil del error en el cálculo de la energía producida en el campo de los estudios de factibilidad tecno-económica. Esta aplicación hace posible generar un intervalo en el cálculo del costo nivelado de generación eléctrica, criterio complementario que contribuye en incrementar la confiabilidad de los mismos.



Bibliografía

- [1] Malte Meinshausen, Nicolai Meinshausen, William Hare, Sarah C B Raper, Katja Frieler, Reto Knutti, David J Frame, and Myles R Allen. Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C. *Nature*, 458(7242):1158–1162, April 2009.
- [2] Gumersindo Cué Aguilar. SECTOR ELÉCTRICO. pages 1–227, December 2010.
- [3] International Energy Agency. *Technology Roadmap Wind energy*. Energy Technology Perspectives.
- [4] SENER. Prospectiva de Energías Renovables 2013-2027. *sener.gob.mx*.
- [5] Q Hernandez-Escobedo, F Manzano-Agugliaro, and A Zapata-Sierra. The wind power of Mexico. *Renew Sust Energ Rev*, 14(9):2830–2840, 2010.
- [6] SENER. Balance Nacional de Energía 2012. *sener.gob.mx*.
- [7] Mazharul Islam, David S K Ting, and Amir Fartaj. Assessment of the small-capacity straight-bladed VAWT for sustainable development of Canada. *International Journal of Environmental Studies*, 64:489–500, 2007.
- [8] Martin Rohden, Andreas Sorge, Marc Timme, and Dirk Witthaut. Self-Organized Synchronization in Decentralized Power Grids. *Phys Rev Lett*, 109(6):064–101, August 2012.
- [9] WWEA. Small Wind World Report. Technical report, March 2013.
- [10] S J Ross, M P McHenry, and J Whale. The impact of state feed-in tariffs and federal tradable quota support policies on grid-connected small wind turbine installed capacity in Australia. *Renewable Energy*, 46:141–147, 2012.
- [11] A Ghezloun, N Oucher, and S Chergui. Energy policy in the context of sustainable development: Case of Algeria and Tunisia. In *Energy Procedia*, pages 53–60. 2012.

- [12] Gobierno Federal México SENER. Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018. pages 1–123, April 2014.
- [13] J Leary, A While, and R Howell. Locally manufactured wind power technology for sustainable rural electrification. *Energy Policy*, 43(0):173–183, April 2012.
- [14] D R Drew, J F Barlow, and T T Cockerill. Estimating the potential yield of small wind turbines in urban areas: A case study for Greater London, UK. *Jnl. of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 115:104–111, 2013.
- [15] E. Audierne, J. Elizondo, L. Bergami, H. Ibarra, and O. Probst. Analysis of the furling behavior of small wind turbines. *Appl. Energy*, 87(7):2278–2292, 2010.
- [16] K. Ameku, B.M. Nagai, and J.N. Roy. Design of a 3 kW wind turbine generator with thin airfoil blades. *Experimental Thermal Fluid Science*, 32(8):1723–1730, 2008.
- [17] O Ozgener. A small wind turbine system (SWTS) application and its performance analysis. *Energy Convers and Manag*, 47(11-12):1326–1337, Jul 2006.
- [18] O Ozgener. A review of blade structures of SWTSs in the Aegean region and performance analysis. *Renew Sust Energy Rev*, 9(1):85–99, 2005.
- [19] A K Wright and D H Wood. The starting and low wind speed behaviour of a small horizontal axis wind turbine. *J. Wind Eng Ind Aerodyn*, 92(14-15):1265–1279, 2004.
- [20] A Dragomirescu. Performance assessment of a small wind turbine with crossflow runner by numerical simulations. *Renew Energy*, 36(3):957–965, Mar 2011.
- [21] R. Billinton, Bagen, and Y. Cui. Reliability evaluation of small stand-alone wind energy conversion systems using a time series simulation model. *Iee Proceedings-generation Transmission and Distribution*, 150(1):96–100, January 2003.
- [22] Z. Simic, M.B. Vrhovcak, and D. Sljivac. Small Wind Turbine Power Curve Comparison. *Africon*, 1 and 2:IEEE, 2009.
- [23] E.K. Akpınar and S. Akpınar. An assessment of wind turbine characteristics and wind energy characteristics for electricity production. *Energy Sources Part A-recovery Utilization Environmental Effects*, 28(10):941–953, 2006.
- [24] Shikha Singh, T S Bhatti, and D P Kothari. A Review of Wind-Resource-Assessment Technology. *Journal of Energy Engineering*, 132(1):8–14, April 2006.
- [25] M R Islam, R Saidur, and N A Rahim. Assessment of wind energy potentiality at Kudat and Labuan, Malaysia using Weibull distribution function. *Energy*, 36(2):985–992, Feb 2011.
- [26] Y Cancino-Solorzano, A J Gutierrez-Trashorras, and J Xiberta-Bernat. Analytical methods for wind persistence: Their application in assessing the best site for a wind farm in the State of Veracruz, Mexico. *Renew Energy*, 35(12):2844–2852, 2010.

-
- [27] O. Rodriguez-Hernandez, O.A. Jaramillo, J.A. Andaverde, and J.A. del Rio. Analysis about sampling, uncertainties and selection of a reliable probabilistic model of wind speed data used on resource assessment. *Renewable Energy*, In press, 2012.
- [28] J Whale, M P McHenry, and A Malla. Scheduling and conducting power performance testing of a small wind turbine. *Renewable Energy*, 55:55–61, July 2013.
- [29] Zdenko Simic and Vladimir Mikulicic. Small wind off-grid system optimization regarding wind turbine power curve. In *IEEE Africon*, pages 1065–1069. 2007.
- [30] Ali Mostafaeipour. Economic evaluation of small wind turbine utilization in Kerman, Iran. *Energy Conversion and Management*, 73(0):214–225, 2013.
- [31] F Trivellato, L Battisti, and G Miori. The ideal power curve of small wind turbines from field data. *J Wind Eng Ind Aerod*, June 2012.
- [32] S L Walker. Building mounted wind turbines and their suitability for the urban scale-A review of methods of estimating urban wind resource. *Energy Build*, 43(8):1852–1862, 2011.
- [33] Brian Fleck and Marc Huot. Comparative life-cycle assessment of a small wind turbine for residential off-grid use. *Renewable Energy*, 34:2688–2696, 2009.
- [34] J Driesen, K De Brabandere, R D’Hulst, and R Belmans. Small wind turbines in the built environment: Opportunities and grid-connection issues. In *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pages 1948–1949. 2005.
- [35] IPCC. Climate Change 2014. Technical report, Working Group III, April 2014.
- [36] L Ledo, P B Kosasih, and P Cooper. Roof mounting site analysis for micro-wind turbines. *Renewable Energy*, 36(5):1379–1391, 2011.
- [37] Alex Maurício Araújo, Daniel Arraes Alencar Valença, Aigbokhan Isaiah Asibor, and Pedro André Carvalho Rosas. An approach to simulate wind fields around an urban environment for wind energy application. *Environ. Fluid Mech.*, 13(1):33–50, November 2012.
- [38] J P Abraham, B D Plourde, G S Mowry, W J Minkowycz, and E M Sparrow. Summary of Savonius wind turbine development and future applications for small-scale power generation. *JOURNAL OF RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY*, 4(4):042703, 2012.
- [39] Muhammad Mahmood Aslam Bhutta, Nasir Hayat, Ahmed Uzair Farooq, Zain Ali, Sh Rehan Jamil, and Zahid Hussain. Vertical axis wind turbine – A review of various configurations and design techniques. *Renew Sust Energ Rev*, 16(4):1926–1939, May 2012.
- [40] Dursun Ayhan and Şafak Sağlam. A technical review of building-mounted wind power systems and a sample simulation model. *Renew Sust Energ Rev*, 16(1):1040–1049, January 2012.

- [41] S. Mertens, G. van Kuik, and G. van Bussel. Performance of an H-Darrieus in the skewed flow on a roof. *J. Solar Energy Engineering-transactions Asme*, 125(4):433–440, 2003.
- [42] J Elizondo, J Martinez, and O Probst. Experimental study of a small wind turbine for low- and medium-wind regimes. *Int J Energy Res*, 33(3):309–326, Mar 2009.
- [43] A Makkawi, A Celik, and T Muneer. Evaluation of micro-wind turbine aerodynamics, wind speed sampling interval and its spatial variation. *Building Services Engineering Research & Technology*, 30(1):7–14, Feb 2009.
- [44] Rui Gu, Jinglei Xu, and Yongbo Yang. The investigation of the small bionic wind turbine based on the seagull airfoil. In *Advanced Materials Research*, pages 3533–3539. 2012.
- [45] J J H Paulides, L Encica, J W Jansen, E A Lomonova, and D van Wijck. Small-scale Urban Venturi Wind Turbine: Direct-Drive Generator. In *2009 Ieee International Electric Machines & Drives Conference, Vols 1-3*, pages 1362–1367. 2009.
- [46] Sufang Zhang and Jianxun Qi. Small wind power in China: Current status and future potentials. *Renew Sust Energ Rev*, 15(5):2457–2460, June 2011.
- [47] Azahel Trevino, Lourdes Y Garcia, David Lara, Jose O Coronado, and Rabhi Abdelhamid. Methods engineering for designing a didactic low cost small wind turbine generator. In *2012 2nd International Conference on Communications, Computing and Control Applications*. 2012.
- [48] K R Ajao and I K Adegun. Development and Power Performance Test of a Small Three-Blade Horizontal-Axis Wind Turbine. *Heat Transfer Research*, 40:777–792, 2009.
- [49] M A Rahman. Advances of Interior Permanent Magnet (IPM) Wind Generators. In *Icems 2008: Proceedings of the 11th International Conference on Electrical Machines and Systems, Vols 1- 8*, pages 2228–2233. 2008.
- [50] A Olano, V Moreno, J Molina, and I Zubia. Design and construction of an Outer-Rotor PM Synchronous Generator for small Wind Turbines; comparing real results with those of FE model. In *Icem: 2008 International Conference on Electrical Machines, Vols 1- 4*, pages 882–887. 2009.
- [51] F Wang, L Bai, J Fletcher, J Whiteford, and D Cullen. The methodology for aerodynamic study on a small domestic wind turbine with scoop. *Jnl. of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 96:1–24, 2008.
- [52] J R Bumby and R Martin. Axial-flux permanent-magnet air-cored generator for small-scale wind turbines. *Iee Proceedings-Electric Power Applications*, 152:1065–1075, 2005.
- [53] Ronit K Singh and M Rafiuddin Ahmed. Blade design and performance testing of a small wind turbine rotor for low wind speed applications. *Renewable Energy*, 50:812–819, February 2013.

-
- [54] C Monroy Aceves, M P F Sutcliffe, M F Ashby, A A Skordos, and C Rodríguez Román. Design methodology for composite structures: A small low air-speed wind turbine blade case study. *Materials & Design*, 36:296–305, April 2012.
- [55] IEC. *IEC-61400-12-1: Wind turbines - Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines*. IEC, Geneva, Switzerland, 12 2005.
- [56] I van der Hoven. Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour. *J. of the Atmos Sci*, 14(2):160–164, 1957.
- [57] Y Wan. Primer on Wind Power for Utility Applications. *Technical Report NREL/TP-500-36230*, pages 1–45, January 2005.
- [58] Ray F Kamada and Torben Mikkelsen. Editorial: Trends in wind energy. *J of Renew and Sust Energy*, 3(5):050–401, 2011.
- [59] William David Lubitz. Impact of ambient turbulence on performance of a small wind turbine. *Renewable Energy*, 61:69–73, 2012.
- [60] James F Manwell, Jon G McGowan, and Anthony L Rogers. *Wind Energy Explained. Theory, Design and Application*. John Wiley & Sons Inc, February 2010.
- [61] Soon-Duck Kwon. Uncertainty analysis of wind energy potential assessment. *App Energy*, 87(3):856–865, 2010.
- [62] Oliver Probst and Diego Cardenas. State of the Art and Trends in Wind Resource Assessment. *ENERGIES*, 3(6):1087–1141, June 2010.
- [63] A Lackner, A L Rogers, and J F Manwell. Uncertainty analysis in MCP-Based wind resource assessment and energy production estimation. *J Sol Energ-T Asme*, pages 0310–06, 2008.
- [64] J A Carta, P Ramírez, and S Velázquez. A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis. *Renew Sust Energ Rev*, 13(5):933–955, June 2009.
- [65] JC Chadee. Wind speed distributions: a new catalogue of defined models. *Wind Engineering*, 2001.
- [66] OA Jaramillo and MA Borja. Wind speed analysis in La Ventosa, Mexico: a bimodal probability distribution case. *Renewable Energy*, 29(10):1613–1630, 2004.
- [67] Tian Pau Chang. Estimation of wind energy potential using different probability density functions. *APPLIED ENERGY*, 88(5):1848–1856, 2011.
- [68] Eugene C. Morgan, Matthew Lackner, Richard M. Vogel, and Laurie G. Baise. Probability distributions for offshore wind speeds. *Energy Conversion and Management*, 52(1):15–26, 2011.

- [69] AN Celik. On the distributional parameters used in assessment of the suitability of wind speed probability density functions. *Energy Conversion and Management*, 2004.
- [70] Jiang Wen, Yan Zheng, and Feng Donghan. A review on reliability assessment for wind power. *Renew Sust Energ Rev*, 13(9):2485–2494, December 2009.
- [71] S Jung, O Arda Vanli, and S D Kwon. Wind energy potential assessment considering the uncertainties due to limited data. *APPLIED ENERGY*, 2012.
- [72] LH Koopmans. *The Spectral Analysis of Time Series Academic Press*. New York, San Francisco, London, 1995.
- [73] Bergey wind power. <http://www.bergey.com/>. Accessed: 2012.
- [74] Earth tech energy systems. <http://www.earthtechenergysystems.com/>. Accessed: 2012.
- [75] True north power. <http://www.truenorthpower.com/>. Accessed: 2012.
- [76] F Boettcher, St Barth, and J Peinke. Small and large scale fluctuations in atmospheric wind speeds. *Stochastic Environmental Research Risk Assessment*, 21(3):299–308, 2007.
- [77] D. C. Baird. *Experimentation : an introduction to measurement theory and experiment design*. Englewood Cliffs, N.J. : Prentice Hall, 2nd ed edition, 1988. Includes index.
- [78] Philip Bevington and D Keith Robinson. *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 3rd edition, July 2002.
- [79] RETScreen. *Software tool that helps to determine the technical and financial viability of potential renewable energy, energy efficiency and cogeneration projects*. jun 2012.
- [80] Nikolaj Sergeevic. Bakhvalov. *Numerical methods : analysis, algebra, ordinary differential equations*. Mir Publishers, Moscow, 1977.
- [81] O Rodriguez-Hernandez, O A Jaramillo, and J A del Río. Breaking the ten minutes paradigm in small wind turbine resource assessment. *PREPRINT*, 2013.

APÉNDICE

A

Catálogo de curvas de potencia de *ABP*

Tabla A.1: Catálogo de las 28 curvas de potencia calculadas por interpolación de Lagrange al conjunto de valores discretos provistos por el proyecto RETscreen

#	ABP Modelo	Curvas de potencia ajustadas por Lagrange $p(u)$
1	AWP3.6(Grid tie) 3.6m 1.6kW	$-1.486(10^{-6})x^5 + 0.0002594x^4 - 0.009477x^3 + 0.1137x^2 - 0.3339x + 0.2847$
2	Ampair 600-230 1.7m	$-7.121(10^{-8})x^7 + 4.686(10^{-6})x^6 - 0.0001278x^5 + 0.001908x^4 - \dots$
3	Bergey BWCXL1 2.5m 1kW	$\dots - 0.01726x^3 + 0.09369x^2 - 0.2366x + 0.2097$ $-5.538(10^{-7})x^7 + 3.533(10^{-5})x^6 - 0.0008695x^5 + 0.0104x^4 - \dots$
4	Earth-Tech ET500 2.5m 500W	$\dots - 0.06406x^3 + 0.2108x^2 - 0.2923x + 0.1359$ $4.987(10^{-5})x^4 - 0.002477x^3 + 0.03419x^2 - 0.08519x + 0.05342$
5	Fortis Passaat 3.12m 1.4kW	$-2.112(10^{-9})x^9 + 2.372(10^{-7})x^8 - 1.138(10^{-5})x^7 + 0.0003048x^6 - \dots$
6	Future Energy FE1012U 1.8m 1kW	$\dots - 0.004981x^5 + 0.05097x^4 - 0.3226x^3 + 1.206x^2 - 2.298x + 1.679$ $1.292(10^{-9})x^9 - 1.666(10^{-7})x^8 + 8.34(10^{-6})x^7 - 0.0002183x^6 + \dots$
7	HEA Energy Ball V100 1.1m 0.6kW	$\dots + 0.00332x^5 - 0.0304x^4 + 0.1663x^3 - 0.5174x^2 + 0.8761x - 0.62$ $-5.84(10^{-10})x^{10} + 6.488(10^{-8})x^9 - 3.128(10^{-6})x^8 + 8.596(10^{-5})x^7 - 0.001487x^6 + \dots$
8	HEA Energy Ball V200 1.98m 2.5kW	$\dots + 0.01685x^5 - 0.1262x^4 + 0.6129x^3 - 1.831x^2 + 3.011x - 2.035$ $-4.185(10^{-9})x^{10} + 4.654(10^{-7})x^9 - 2.24(10^{-5})x^8 + 0.0006128x^7 - 0.01052x^6 + \dots$
9	Hummer 2.7m 0.5kW	$\dots + 0.118x^5 - 0.8741x^4 + 4.201x^3 - 12.46x^2 + 20.39x - 13.75$
10	Hummer 3.1m 1kW	$-2.967(10^{-5})x^4 + 0.0002452x^3 + 0.004572x^2 + 0.05426x - 0.1283$ $-8.495(10^{-7})x^7 + 5.728(10^{-5})x^6 - 0.001525x^5 + 0.02042x^4 - 0.1472x^3 + \dots$
11	Hummer 3.8m 2kW	$\dots + 0.581x^2 - 1.044x + 0.6613$ $-2.223(10^{-9})x^9 + 1.976(10^{-7})x^8 - 6.513(10^{-6})x^7 + 8.174 * (10^{-5})x^6 + 0.0003685x^5 - \dots$
12	Joliet Cyclone 1 2.7m 1kW	$\dots - 0.02228x^4 + 0.251x^3 - 1.224x^2 + 2.862x - 2.493$
13	Joliet Ultra X900 3m 1kW	$-1.746(10^{-5})x^4 - 0.000473x^3 + 0.01909x^2 - 0.05479x + 0.03619$
14	Kestrel e230 2.3m 0.8kW	$-9.524(10^{-6})x^4 - 0.0008222x^3 + 0.0239x^2 - 0.07544x + 0.05238$ $-1.406(10^{-7})x^7 + 7.58 * (10^{-6})x^6 - 0.0001435x^5 + 0.001034x^4 - 0.001278x^3 - \dots$
15	Kestrel 300i 3m 1kW	$\dots - 0.00466x^2 + 0.0314x - 0.02636$ $-6.97(10^{-12})x^{12} + 1.076(10^{-9})x^{11} - 7.351(10^{-8})x^{10} + 2.93(10^{-6})x^9 - 7.549(10^{-5})x^8 + \dots$
16	Kestrel 400i 4m 3kW	$\dots + 0.001318x^7 - 0.01587x^6 + 0.1321x^5 - 0.7472x^4 + 2.77x^3 - 6.254x^2 + 7.51x - 3.396$ $-1.289(10^{-8})x^9 + 1.509(10^{-6})x^8 - 7.491(10^{-5})x^7 + 0.002053x^6 - 0.03387x^5 + \dots$
17	Kingspan KW3 3.8m 2.5kW	$\dots + 0.3441x^4 - 2.125x^3 + 7.6x^2 - 13.96x + 9.966$ $-1.317(10^{-10})x^{10} + 1.967(10^{-8})x^9 - 1.264(10^{-6})x^8 + 4.575(10^{-5})x^7 - \dots$
18	ReDriven 3.8m 3kW	$\dots - 0.001027x^6 + 0.01481x^5 - 0.1375x^4 + 0.7969x^3 - 2.669x^2 + 4.692x - 3.297$ $-2.214(10^{-6})x^7 + 0.0001094x^6 - 0.00193x^5 + 0.01369x^4 - 0.02432x^3 - 0.06558x^2 + \dots$
19	Samprey Mistral 2m 1.15kW	$\dots + 0.3148x - 0.2368$ $-2.411(10^{-9})x^9 + 2.707(10^{-7})x^8 - 1.288(10^{-5})x^7 + 0.0003384x^6 - 0.005354x^5 + \dots$
20	Samprey Wren 1m 0.3kW	$\dots + 0.05224x^4 - 0.3102x^3 + 1.073x^2 - 1.897x + 1.299$ $-4.992(10^{-10})x^9 + 5.403(10^{-8})x^8 - 2.466(10^{-6})x^7 + 6.183(10^{-5})x^6 - 0.0009306x^5 + \dots$ $\dots + 0.008642x^4 - 0.04926x^3 + 0.1677x^2 - 0.2995x + 0.2099$

#	ABP Modelo	Curvas de potencia ajustadas por Lagrange $p(u)$
21	Samrey Merlin 3.5m 3kW	$-5.529(10^{-9})x^9 + 6.113(10^{-7})x^8 - 2.852(10^{-5})x^7 + 0.0007293x^6 - 0.01112x^5 + \dots$ $\dots + 0.1031x^4 - 0.5732x^3 + 1.842x^2 - 3.009x + 1.896$
22	Skystream 3.7m 1.9kW	$-8.027(10^{-10})x^9 + 4.651(10^{-8})x^8 + 2.47(10^{-7})x^7 - 8.491(10^{-5})x^6 + 0.002876x^5 - \dots$ $\dots - 0.04647x^4 + 0.4023x^3 - 1.808x^2 + 3.987x - 3.302$
23	Sonkyo Windspot 1.5kW 4.05m	$4.828(10^{-9})x^9 - 5.211(10^{-7})x^8 + 2.313(10^{-5})x^7 - 0.0005564x^6 + 0.008011x^5 - \dots$ $\dots - 0.07178x^4 + 0.3988x^3 - 1.298x^2 + 2.29x - 1.655$
24	Sonkyo Windspot 3.5kW 4.05m	$-1.756(10^{-6})x^7 + 0.0001152x^6 - 0.002987x^5 + 0.03904x^4 - \dots$ $\dots - 0.2769x^3 + 1.107x^2 - 2.167x + 1.585$
25	Travere 3.6m 3kW	$9.291(10^{-11})x^{10} - 1.445(10^{-8})x^9 + 9.521(10^{-7})x^8 - 3.462(10^{-5})x^7 + 0.0007579x^6 - \dots$ $\dots - 0.01022x^5 + 0.08345x^4 - 0.3939x^3 + 1.019x^2 - 1.179x + 0.3795$
26	Travere 6m 2.1kW	$2.548(10^{-12})x^{11} - 5.55(10^{-10})x^{10} + 5.045(10^{-8})x^9 - 2.549(10^{-6})x^8 + 7.962(10^{-5})x^7 - \dots$ $\dots - 0.001605x^6 + 0.02104x^5 - 0.1756x^4 + 0.8809x^3 - 2.392x^2 + 3.222x - 1.555$
27	Westwind 3.7m 3kW	$-3.94(10^{-8})x^9 + 3.585(10^{-6})x^8 - 0.0001393x^7 + 0.003019x^6 - 0.04x^5 + 0.3332x^4 - \dots$ $\dots - 1.729x^3 + 5.369x^2 - 8.936x + 6.0$
28	Zephyr Airdolphin 1.8m 1kW	$1.425(10^{-10})x^9 - 2.931(10^{-8})x^8 + 1.847(10^{-6})x^7 - 5.477(10^{-5})x^6 + 0.000877x^5 - \dots$ $\dots - 0.008035x^4 + 0.04305x^3 - 0.1238x^2 + 0.1922x - 0.1297$