

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



“Determinación cuantitativa de la contribución de la energía minieólica en la mitigación de las emisiones de CO₂ en Mexicali Baja California”

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA

JUAN ALBERTO BURGOS PEÑALOZA

DIRECTOR DE TESIS

DR. ALEJANDRO ADOLFO LAMBERT ARISTA

CODIRECTORA DE TESIS

DRA. EDNA ALICIA CORTÉS RODRÍGUEZ

Mexicali, Baja California

junio 2018

Dedicatoria

A mis abuelos que en paz descansen, Juan Burgos, Leticia Mejía y Walter Peñaloza. Siempre estaban para motivarme y les alegraba escuchar sobre mis estudios.

A mis padres por su motivación y apoyo incondicional durante toda mi vida. Gracias por todo su amor, sus palabras de aliento y siempre estar al pendiente de mí.

A mi novia y amigos por su apoyo y consejos en todo momento.

Y una dedicación especial a mi querido amigo Javier Salomón Aceves Gastélum, estudiante de cine con un gran futuro por delante. Por todos los momentos que pasamos juntos sin tener oportunidad de despedirnos, descansa en paz.

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma de Baja California por la formación académica recibida durante estos años, en especial al Instituto de Ingeniería por prestarme un espacio para el desarrollo de este trabajo.

A mi director de tesis: Dr. Alejandro A. Lambert Arista por su tiempo, amistad, paciencia y apoyo incondicional en la culminación de este trabajo. Gracias por su enseñanza, consejos y formación en el mundo de la investigación.

A mi codirectora de tesis: Dra. Edna A. Cortés Rodríguez por su motivación, paciencia, dedicación, amistad, consejos y sobre todo un apoyo incondicional en toda mi formación académica. Gracias por todo, jamás terminaré de agradecerle todo lo que ha hecho por mí.

A mis sinodales: Dr. Onofre Rafael García Cueto, Dra. Marlene Zamora Machado y Dr. Héctor E. Campbell Ramírez, gracias por sus consejos y apoyo durante la elaboración de este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo económico para el desarrollo de esta investigación, sin su apoyo no hubiera sido posible.

Contenido

Índice de tablas	6
Índice de figuras.....	7
Resumen.....	8
I. Introducción.....	9
1.1 Planteamiento del problema.....	9
1.2 Objetivos	12
1.2.1 General.....	12
1.2.2 Específicos.....	12
1.3 Justificación.....	12
1.4 Antecedentes	14
II. Marco referencial	14
2.1 Panorama mundial de las energías renovables.....	15
2.2 Energía eólica y minieólica.....	15
2.3 Métodos estadísticos para estimar el potencial eólico	17
2.3.1 Distribución de Weibull.....	17
2.4 ENV1: Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por la producción y uso de energía, per cápita y por unidad de PIB	19
III. Marco jurídico para el aprovechamiento de la energía eólica	20
3.1 Contexto internacional	20
3.1.1 Protocolo de Kioto.....	20
3.1.2 Acuerdo de París.....	22
3.2 Nacional	23
3.2.1 Plan Nacional de Desarrollo (PND) y Planes estratégicos	23
3.2.2 Leyes y Reglamentos.....	24

IV. Descripción de la localidad de estudio	26
4.1 Ubicación geográfica y clima.....	26
4.1.1 Descripción del recurso eólico	26
4.2 Actividades socioeconómicas	27
4.3 Consumo energético en el sector residencial	27
V. Metodología	29
5.1 Series de tiempo	29
5.2 Distribuciones de Weibull de las Series de Tiempo Analizadas	30
5.3 Aerogeneradores de Baja Potencia.....	30
5.3.1 Enair E30 PRO	30
5.3.2 Enair E70 PRO	31
5.3.3 Enair E200L.....	33
5.4 Estimación de Energía Minieólica Generada y Reducción de CO ₂	34
5.5 Proyección de la mitigación de emisiones de CO ₂ por el uso de la minieólica	35
VI. Resultados.....	37
6.1 Parámetros Estadísticos de las Series de Tiempo.....	37
6.2 Distribuciones de Probabilidad de Weibull.....	39
6.3 Estimación de Energía Generada y Reducción de CO ₂	41
6.4 Proyección de la mitigación de emisiones de CO ₂ por el uso de la minieólica	43
6.5 Contribución de la minieólica	46
VII. Conclusiones	48
Referencias.....	49

Índice de tablas

Tabla 1. Instrumentos de la política mexicana para el fomento de energías renovables.....	24
Tabla 2. Marco legal en México aplicable a las energías renovables.	25
Tabla 3. Características técnicas del ABP Enair E30 Pro.....	31
Tabla 4. Características técnicas del ABP Enair E70 PRO	32
Tabla 5. Características técnicas del ABP Enair E200L.....	33
Tabla 6. Velocidad media y desviación estándar mensual (Año 2014)..	37
Tabla 7. Velocidad media y desviación estándar mensual (Año 2015)	38
Tabla 8. Velocidad media y desviación estándar anual y bianual	38
Tabla 9. Velocidad media y desviación estándar mensual de la serie 1 minutal.	39
Tabla 10. Velocidad promedio y desviación estándar mensual de la serie 60 minutal	39
Tabla 11. Parámetros estadísticos de viento para calcular la distribución de Weibull Fuente	39
Tabla 12. Parámetros estadísticos de viento de la serie 1 minutal.....	40
Tabla 13. Parámetros estadísticos de viento en el intervalo de 60 min..	40
Tabla 14. Generación de energía para cada ABP (Periodo 2014-2015)..	41
Tabla 15. Comparación de energía generada mensualmente para ABP entre intervalos de 1 y 60 minutos.....	42
Tabla 16. Estimación de energía generada para cada periodo y CO ₂ equivalente para datos horarios	42
Tabla 17. Estimación de energía generada para el mes de enero y tCO ₂ e/mensual	43
Tabla 18. Proyección de energía, CO ₂ e y cantidad de ABP necesarios para datos horarios	47
Tabla 19. Proyección de energía, CO ₂ e y cantidad de ABP necesarios para datos de mayor densidad	47

Índice de figuras

Figura 1. Población de Mexicali de 1990 a 2015.....	28
Figura 2. Consumo energía eléctrica en Mexicali de 1990 a 2015.....	28
Figura 3. Curva de potencia del ABP Enair E30 PRO.	31
Figura 4. Curva de potencia del ABP Enair E70 PRO	32
Figura 5. Curva de potencia del ABP Enair E200L.....	34
Figura 6. Población y consumo de energía en Mexicali (1990-2015).	36
Figura 7. Distribución de Weibull para las series de datos horarios.....	40
Figura 8. Distribución de Weibull para las series uno-minutal y sesenta-minutal	41
Figura 9. Ajuste logarítmico de población y consumo de energía en Mexicali (1990-2030).....	44
Figura 10. Ajuste lineal de población y consumo de energía en Mexicali (1990-2030)	44
Figura 11. Ajuste potencial de población y consumo de energía en Mexicali (1990-2030)	45
Figura 12. MtCO ₂ emitidos al ambiente por la proyección de energía (1990-2030).....	46

Resumen

En las últimas décadas las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) se han incrementado significativamente, debido principalmente a la generación de energía a base de combustibles fósiles y a la alta demanda energética en las actividades de los diferentes sectores de la sociedad. En este sentido, las Energías Renovables (ER) representan una alternativa para mitigar los problemas mencionados, ya que son fuentes de energía con bajo nivel de emisiones de carbono. El presente trabajo se centra en determinar cuantitativamente la contribución de la energía minieólica en la mitigación de las emisiones de CO_2 en Mexicali, B. C. Esta fuente se caracteriza por el aprovechamiento del recurso eólico mediante el uso de aerogeneradores de potencia inferior a los 100 kW y con un área de barrido menor a 200 m². Para llevar a cabo este estudio, se utilizaron series de datos horarios de velocidad de viento de los años 2014 y 2015 registrados por la estación meteorológica del Instituto de Ingeniería de la UABC. Se les calcularon valores promedio y desviaciones estándar y, con éstos, los parámetros de forma y escala de las funciones de probabilidad de Weibull correspondientes. Se seleccionaron Aerogeneradores de Baja Potencia (ABP) con una velocidad de arranque menor a la velocidad promedio obtenida, y a partir de los parámetros estadísticos calculados y la curva de potencia de los ABP, se estimó la energía eléctrica anual generada. Por último, se determinó la cantidad de CO_2 que se deja de emitir al ambiente al utilizar la minieólica. Por otra parte, al utilizar series de tiempo de mayor densidad (datos de viento cada 0.5, 1, 5 y 10 minutos), los resultados preliminares indican que la energía estimada aumenta conforme la frecuencia de los datos es mayor, lo que muestra la importancia de considerar la variabilidad a corto plazo (segundos a minutos, respectivamente) de la velocidad del viento. Con este trabajo se espera proponer una herramienta de análisis para justificar a la minieólica como una opción de generación de energía en la ciudad de Mexicali y una estrategia sustentable para la reducción de emisiones de CO_2 .

I. Introducción

El incremento en las concentraciones de CO₂ en la atmósfera registrado en las últimas décadas, es consecuencia, entre otras causas, del aumento en el consumo de combustibles fósiles para generación de energía eléctrica (González, M., 2009). Debido a esto, se registra el aumento de la temperatura promedio del planeta y, por lo tanto, alteraciones en los patrones meteorológicos. Por tal motivo, se buscan estrategias para contrarrestar dicha problemática, entre las cuales, las fuentes renovables de energía representan una opción de mitigación de las emisiones CO₂, fundamentalmente debido a su baja emisión de carbono. En este capítulo, se expone de manera general la problemática en torno al aumento de CO₂ atmosférico, el potencial de mitigación de la energía eólica, así como los objetivos, justificación y antecedentes de la presente investigación.

1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad uno de los mayores desafíos de la humanidad son las alteraciones en los patrones de los eventos climatológicos, los cuales cada vez son más comunes y de mayor intensidad (IPCC, 2014). Estos eventos extremos se asocian con el aumento en las concentraciones de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) y, principalmente, con la del dióxido de carbono (CO₂). En los últimos 200 años este gas ha tenido un aumento significativo comparado con los otros GEI y se estima que al inicio del periodo señalado la concentración de CO₂ atmosférico se situaba en los 280 ppm (0.028% de la composición global de la atmósfera). Actualmente, dicha concentración ha sobrepasado los 400 ppm (más de un 30% en sólo 200 años), estimación que sitúa los valores actuales como los más altos de los últimos 650,000 años y quizás superior a la concentración registrada hace 20 millones de años (IPCC, 2014).

El incremento del CO₂ se asocia con diferentes actividades antropogénicas en donde el hombre, en busca de satisfacer sus necesidades energéticas deteriora el medio ambiente. Como se mencionó, la generación más alta de emisiones de CO₂ provienen de la producción de electricidad (IEA, 2016), las cuales *“están incorporando nuevos flujos de carbono en el ciclo biológico con una influencia significativa en el ciclo global del carbono, transfiriendo más CO₂ a la atmósfera del que es posible remover naturalmente a través de la sedimentación del carbono, causando así un aumento de las concentraciones atmosféricas de CO₂ en un corto periodo de tiempo (cientos de años)”*(Pérez. G).

Por tal motivo, se busca limitar las emisiones provenientes de actividades antropogénicas y para ello se requiere tomar medidas eficaces que contribuyan en una reducción significativa que permita satisfacer las necesidades energéticas actuales, sin perjudicar a las generaciones futuras. A nivel mundial, una de las opciones más viables para contribuir con la reducción de emisiones es el uso de las Energías Renovables (ER), las cuales han crecido rápidamente en los últimos años, acompañadas de fuertes reducciones de costos para la energía solar fotovoltaica y la energía eólica en particular (SENER, 2016). Estas dos fuentes de ER se han abaratado en el mercado y son las que en los últimos años han aumentado en potencia instalada. En el año 2015 la generación de energía eólica generó una cantidad de 838 TWh, mientras que la energía solar alcanzó una generación de 247 TWh (IEA, 2017). Con ello la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) espera que la generación de electricidad proveniente de fuentes renovables aumente en más de un tercio para 2022 (IEA, 2016).

En particular, la energía eólica ha tenido el mayor crecimiento entre las fuentes renovables en la última década, principalmente por la instalación de un importante número de parques eólicos de aerogeneradores instalados en todo el mundo. En 2015, la energía eólica fue la principal fuente de nueva capacidad generadora de electricidad en Europa y Estados Unidos, y la segunda más importante en China. A nivel mundial, la capacidad instalada se incrementó en 63 GW, sumando un total aproximado de 433 GW, lo cual constituyó un récord de crecimiento (REN21, 2016). Por tal motivo, diversas compañías privadas invirtieron en energía eólica como una fuente de energía confiable y de bajo costo, atraídas por la estabilidad de sus rendimientos (REN21, 2016).

Por otro lado, en el caso concreto de la minieólica, o de generación de baja potencia, esta fuente empieza a contribuir con mayor fuerza y, según los expertos, se espera que alcance niveles de capacidad instalada comparables a la de los grandes aerogeneradores (APPA, 2009). A pesar de que el recurso energético es el mismo que en las grandes instalaciones eólicas, las instalaciones minieólicas tienen características propias tales como: capacidad de aportar energía de forma distribuida, funcionamiento con vientos moderados, aprovechamiento de pequeños emplazamientos integración en entornos urbanos, semi-urbanos, industriales y agrícolas, especialmente asociada a la generación de energía próxima a los puntos de consumo (APPA, 2009). Por otra parte, esta tecnología va avanzando considerablemente en superar los contratiempos que limitaban su expansión a zonas rurales y aisladas, tales como ruido, vibraciones y turbulencias,

por lo que, a raíz de estos avances, esta tecnología ha despertado un gran interés, siendo considerada como una fuente energética de generación con gran potencial de desarrollo (APPA, 2009). Como dato importante al respecto, cabe mencionar que el mercado mundial de Aerogeneradores de Baja Potencia (ABP) alcanzó en el 2015, 830 MW de capacidad instalada, con una tasa de crecimiento del 10.9%, en comparación con el 10.4% en el año anterior (WWEA, 2016).

En México, la mayor parte de la producción de electricidad se realiza a partir de hidrocarburos, la capacidad total instalada para generación de energía es de 74,046 MW (Rodríguez L. et al, 2017), del cual el 70.91% (52, 504.41 MW) son provenientes de combustibles fósiles, 25.37% (18, 786 MW) corresponden a fuentes renovables y 3.72 % (2, 755.72 MW) se consideran otras fuentes limpias (Rodríguez L. et al, 2017). De ese 25.37% de fuentes renovables solo 5.32% (3, 942.22 MW) corresponde a la potencia instalada de energía eólica (Rodríguez L. et al, 2017). El 61% de las emisiones de CO₂ provienen del sector energético y México se encuentra en treceavo lugar como país emisor a nivel mundial (REVE, 2012).

En el ámbito local, Mexicali, B.C., es una ciudad que demanda grandes cantidades de energía eléctrica especialmente en épocas de verano, debido a las altas temperaturas que se presentan en la localidad. Del 100% de la energía eléctrica que se consume en Baja California, el 49% corresponde a Mexicali (Muñoz, G., Díaz, E., Campbel, H., & Quintero, M., 2012). Los principales consumidores son el sector industrial y el residencial, este último ha tenido un crecimiento en las últimas décadas lo que a la par genera una mayor demanda de energía para satisfacer las necesidades del hogar, específicamente en verano con el uso necesario de aire acondicionado. De esta manera el aumento de la demanda energética genera un incremento proporcional en las emisiones de CO₂ local, debido a la generación por fuentes convencionales.

1.2 Objetivos

Por lo anteriormente expuesto, para abordar el problema planteado a partir del uso de ER, específicamente de la minieólica como alternativa para la reducción de las emisiones de CO₂ en la localidad, la presente investigación se plantea los siguientes objetivos:

1.2.1 General

Determinar la cantidad de CO₂ que se deja de emitir al ambiente a corto, mediano y largo plazo por la utilización de la energía minieólica en la ciudad de Mexicali B.C.

1.2.2 Específicos

- Estimar el potencial eólico de Mexicali, B.C., a partir de datos de viento de la estación del Instituto Ingeniería UABC.
- Determinar el tipo de tecnología minieólica (aerogenerador de baja potencia) más apropiado a partir de los parámetros estadísticos y potencial eólico.
- Seleccionar el indicador o indicadores para estimar la reducción de emisiones de CO₂ mediante el uso de la minieólica.
- Realizar proyecciones a corto, mediano y largo plazo, para determinar la contribución ambiental de la energía minieólica en la reducción de emisiones de CO₂.

1.3 Justificación

La influencia antropogénica en el aumento de CO₂ es evidente, lo cual ha sido demostrado con estudios, simulaciones y registro de alteraciones extremas de los patrones climatológicos (IPCC, 2014). En base a dicha problemática se han establecido compromisos internacionales, estableciendo objetivos ambiciosos ante la necesidad de reducir las emisiones CO₂ y fomentar el uso de las energías renovables. Entre estos acuerdos, se puede resaltar el Protocolo de Kyoto impulsado por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), adoptado el 11 de diciembre de 1997 en Kyoto, Japón. Este protocolo constituye el primer compromiso de este tipo donde los países participantes se comprometieron a reducir emisiones y cuidar el medio ambiente (Naciones Unidas, 1998). En años recientes, a finales de 2015, en la Cumbre Mundial sobre el Clima celebrada en París, se alcanzó un nuevo acuerdo que sustituiría al de Kyoto y cuyo objetivo primordial es conseguir que el aumento de la temperatura

del planeta se mantenga por debajo de 2°C, e incluso por debajo de 1.5°C, respecto de la era preindustrial (Naciones unidas, 2015). El acuerdo no especifica metas obligatorias a cada país, como lo hace el protocolo de Kioto, pero los expertos del IPCC estiman que es necesario reducir las emisiones globales entre 40% y 70% para el año 2050, con el fin de poder limitar el incremento de temperatura promedio del planeta (IPCC, 2014). Entre los países participantes se encuentra México, el cual se comprometió a reducir 22% de sus emisiones de GEI para 2030 y el 50% para 2050 (INECC, 2016). Para México y el mundo, una de las principales opciones para contribuir con la reducción de emisiones es el uso de las energías renovables y, entre las más utilizadas destacan la energía eólica y solar, ya que como se mencionó en otro momento, estas dos fuentes de generación han crecido en los últimos años gracias a la disminución de costos y aumento de su capacidad instalada; por ejemplo, la energía eólica generó una cantidad de 838 TWh, mientras que la energía solar alcanzó una generación de 247 TWh en 2015 (IEA, 2017).

El recurso eólico en México es una de las fuentes con mayor potencial, según datos oficiales se estima cercano a 71,000 MW, lo que equivale a cubrir más de tres veces la demanda de energía eléctrica del sector residencial en 2010 y se calcula que con una planeación adecuada e incentivos económicos atractivos, en el 2024 es posible lograr una generación de alrededor de 11,000 MW exclusivamente con energía eólica, lo que significaría una contribución de entre el 26 y el 28% a la generación nacional, abonando de manera significativa al cumplimiento del 35% de la meta establecida para ese mismo año (ProMéxico, 2014).

En cuestión sobre tecnología eólica México cuenta con una capacidad instalada de 3.07 GW de con lo cual generó 6, 426 GWh (María, A., & Christian, K., 2016). Por su parte, la minieólica en México es una tecnología de la cual no se tienen datos registrados sobre la potencia instalada actualmente.

La importancia de este estudio radica en determinar la contribución cuantitativa de la energía minieólica en la mitigación de las emisiones de CO₂ en Mexicali, B. C., a partir de estudios sobre el recurso eólico que nos permita tener una estimación de la energía que podríamos obtener. En este sentido, se busca justificar a este tipo de ER, como una alternativa de generación que contribuya en la reducción de emisiones de CO₂ en la localidad y permita que México cumpla los compromisos establecidos internacionalmente.

El Ingeniero en Energías renovables (IER) es un profesionalista que se dedica al estudio, diagnóstico y planeación de recursos energéticos, evaluación de los recursos energéticos existentes en las distintas zonas geográficas del país, evaluación el impacto ambiental en la generación, seleccionar e implementar tecnologías y procesos acordes a la disponibilidad del recurso energético mediante el análisis, diseño e implementación de tecnologías para la generación de energía que promueva el desarrollo sustentable. Por otra parte, el IER es de suma importancia en la transición de combustibles fósiles a Energías Renovables (ER) debido a que se necesitan más estudios que le den mayor seguridad a la cantidad de energía que se puede obtener de este tipo de fuentes.

1.4 Antecedentes

En esta sección se abordan los antecedentes de trabajos enfocados a la generación de energía minieólica. La energía eólica o minieólica no es un recurso nuevo, ha sido utilizado por el hombre con anterioridad en diferentes aplicaciones. Para el aprovechamiento de la energía eólica el ser humano ha ideado variados artefactos a lo largo de toda la historia (barcos, molinos para moler grano, extraer agua, etc.) y en la actualidad se utiliza para generación de energía eléctrica.

Para obtener energía eléctrica mediante fuentes eólicas es muy importante la evaluación del recurso eólico en cualquier área, para ello se debe tener el conocimiento de la distribución de frecuencias en que suceden las distintas velocidades de viento, donde uno de los métodos más utilizados son las distribuciones de probabilidad, de las cuales destaca la distribución de Weibull como la distribución estadística por excelencia para describir el comportamiento de las velocidades de viento (Prats, D. A., García, R. A., & García, F. G., 2010). Las ventajas de utilizar la distribución de Weibull comparado con otras funciones de densidad de probabilidad son permitir estimaciones satisfactorias de la asimetría de la distribución de densidad de probabilidad, otra de las ventajas es que la función de Weibull para la distribución de velocidad de viento tiene un factor de forma en la que la distribución de la velocidad al cubo también sigue la función de Weibull (Rico, J., 2013).

II. Marco referencial

Con la finalidad de proporcionar un marco de referencia al trabajo de investigación, en este capítulo se desarrollaron los conceptos utilizados en el planteamiento del problema. Tal es el caso de los fundamentos de la energía eólica y minieólica, así como de los métodos estadísticos para estimar el potencial eólico, particularmente de la distribución de Weibull. De igual manera, se incluye lo concerniente al cálculo de las emisiones de CO₂ y del indicador utilizado para su evaluación.

2.1 Panorama mundial de las energías renovables

A nivel internacional las ER se han convertido en una herramienta de gran utilidad para combatir las problemáticas ambientales, tales como el aumento excesivo de CO₂, debido a que la generación de energía por fuentes renovables tiene una menor o nula emisión de dicho gas. Existe una creciente conciencia en todo el mundo de que este tipo de fuentes de generación y la eficiencia energética son fundamentales, no sólo para hacer frente al cambio climático, sino también para el desarrollo económico y el acceso a la energía de los miles de millones de personas que aún viven sin servicios de energía (REN21, 2016). Durante la última década, y particularmente en los últimos años, los avances tecnológicos, el crecimiento global de la capacidad instalada, y la rápida reducción de costos, se deben en gran parte al apoyo de las políticas públicas que atrajeron una inversión significativa e impulsaron aún más la baja de precios en este tipo de fuentes de energía (REN21, 2016).

2.2 Energía eólica y minieólica

El viento es el movimiento de las masas de aire, las cuales circulan desde zonas de alta presión atmosférica a zonas de menor presión. Tales diferencias son ocasionadas por el calentamiento no homogéneo de la superficie terrestre al incidir la radiación solar. La circulación de las masas de aire se debe a la acción resultante de las fuerzas de rozamiento, de presión, gravitacional y de rotación de la Tierra, que inducen dos tipos de circulación en la atmósfera: circulación planetaria debida a la incidencia de los rayos solares sobre la Tierra y a la rotación de ésta, la cual varía según la zona y la época del año. Y circulación a pequeña escala la cual es determinada por la orografía, como las montañas y la presencia del mar. En términos generales, se puede considerar que las variables que definen el régimen de vientos en un punto determinado son: situación geográfica,

características climáticas, estructura topográfica, irregularidades del terreno, altura sobre el nivel del suelo (Santana, 2011).

La energía que contiene el viento es su propia energía cinética, y la energía cinética de cualquier masa de aire en movimiento, es igual a la mitad de la masa, m , del aire multiplicado por su velocidad, al cuadrado. Fórmula de la energía cinética:

$$E. \text{ cinética} = \frac{1}{2} m V^2$$

Donde:

m = Masa en kg

V = Velocidad en m/s

En base a lo anterior, la energía eólica es utilizada principalmente para producir energía eléctrica mediante diferentes tipos de aerogeneradores. Un aerogenerador obtiene su potencia de entrada convirtiendo la fuerza del viento en energía mecánica actuando sobre las palas del rotor. La cantidad de energía transferida al rotor por el viento depende de la densidad del aire, del área de barrido del rotor y de la velocidad del viento. La velocidad del viento es muy importante para la cantidad de energía que un aerogenerador puede transformar en electricidad: la cantidad de energía que posee el viento varía con el cubo de la velocidad del viento (DWIA, 2003). La potencia se define como la rapidez con la cual la energía es empleada o convertida, y puede expresarse como energía por unidad de tiempo (DWIA, 2003). La unidad de potencia es el watt (W), que es igual a un joule por segundo; es decir, $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$. La potencia del viento se calcula mediante la fórmula:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \text{ (W)}$$

Donde:

ρ =densidad del aire (1.2 kg/m^3)

A =área del rotor eólico (m^2)

V =velocidad del viento (m/s)

Por otro lado, la energía minieólica se define como la energía eólica que se puede extraer a partir de aerogeneradores pequeños o de baja potencia. La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, por sus siglas en inglés) ha definido la baja potencia para el tipo de aerogeneradores que tienen un

área de barrido menor o igual a 200 m² (IEC-61400-2) lo que corresponde a aerogeneradores de hasta 100 kW de potencia.

2.3 Métodos estadísticos para estimar el potencial eólico

La velocidad del viento cambia continuamente, por ello es necesario describirlo de forma estadística. Es muy importante describir la variación de las velocidades del viento para optimizar el diseño de los aerogeneradores y minimizar los costos de generación de energía (Genc, A., Erisoglu, M., Pekgor, A., Oturanc, G., Hepbasli, A., & Ulgen, K., 2005). Hay varias funciones que se pueden utilizar para describir la frecuencia de la distribución de velocidades del viento, las más utilizadas son las funciones de Weibull y Rayleigh. La variación de viento para un sitio típico se describe generalmente usando la distribución llamada Weibull, esta distribución se considera como la mejor distribución para el montaje de los datos de velocidad del viento, no sólo debido a su mayor flexibilidad y simplicidad si no también debido a su valor más alto de confianza en el ajuste a los datos experimentales (Datta, D., & Datta, D., 2013). El requisito básico para su análisis es conocer el valor de la velocidad media del viento y la varianza de la velocidad del viento (Datta, D., & Datta, D., 2013).

2.3.1 Distribución de Weibull

La distribución de probabilidad de Weibull es utilizada con frecuencia en la caracterización de viento en regiones con potencial eólico, debido a que describe de forma confiable el comportamiento del viento en la mayoría de las regiones. La distribución se caracteriza por dos parámetros: el de forma (k) y el de escala (c), el primero define cuán dispersa se encuentra la distribución mientras que el segundo define la forma de la distribución (Serrano Rico, J. C., 2013). Existen varios métodos para determinar los parámetros k y c, entre los más populares se encuentra el método de máxima probabilidad, mínimos cuadrados, máxima probabilidad modificada y método de momentos (Genc, A., Erisoglu, M., Pekgor, A., Oturanc, G., Hepbasli, A., & Ulgen, K., 2005). El que se utiliza en este trabajo se conoce como el método empírico (Indhumathy, D., Sessaiah, C. V., & Sukkiramathi, K., 2014). Las ecuaciones 2-4 presentan las expresiones del método empírico para calcular los parámetros de forma (k) y el parámetro de escala (c).

A continuación, se presentan las ecuaciones para calcular la distribución de Weibull:

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

Donde:

k = parámetro de forma

c = parámetro de escala

$\bar{v}$ = Velocidad

$$k = (\sigma/\bar{v})^{-1.086} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

$\bar{v}$ = velocidad media

$$c \cong \frac{\bar{v}}{C_0 + C_1 X + C_2 X^2 + C_3 X^3 + C_4 X^4} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

$\bar{v}$ = velocidad media

$$C_0 = 0.886259184149$$

$$C_1 = 0.00852888014766$$

$$C_2 = 0.0257748943765$$

$$C_3 = 0.002117760028167$$

$$C_4 = 0.000664358428$$

$$x = 4(1 + 1/k) - 6 \quad (\text{Ecuación 4})$$

Debido a la variabilidad del viento no se obtendrá información relevante si no un análisis estadístico, por ello es conveniente establecer un modelo de las frecuencias de las velocidades del viento que venga descrito por una función matemática continua y no ayude a comprender lo que está pasando con los datos de viento.

2.4 ENV1: Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por la producción y uso de energía, per cápita y por unidad de PIB

Este indicador ambiental se encarga de medir las emisiones totales de GEI procedentes de la producción y uso de energía. Las emisiones de estos gases procedentes de actividades relacionadas con la energía, por unidad de energía y electricidad producida son convertidas a CO₂e utilizando los Potenciales de Calentamiento Mundial (PCM) para 100 años, facilitados en el segundo informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre los Cambios Climáticos, IPCC por sus siglas en inglés (Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas, 2008). Por ejemplo, el PCM del metano es de 21, lo que significa que el impacto del calentamiento global de 1 kg de metano es 21 veces mayor que el de 1 kg de CO₂.

III. Marco jurídico para el aprovechamiento de la energía eólica

México cuenta con una disponibilidad de diversas fuentes de energía, tanto de tipo fósil, como renovables. La mayoría de la energía se genera a partir de fuentes fósiles o convencionales, con las que al mismo tiempo se emiten altas cantidades de contaminantes a la atmósfera.

Ante la necesidad de reducir dichas emisiones, México se ha comprometido internacionalmente con la firma de tratados, que promueven la utilización de fuentes alternas de energía que ayuden a la mitigación de emisiones y contribuyan al desarrollo sustentable. De igual manera, con la implementación de políticas ambientales de carácter nacional se espera que el desarrollo de las energías renovables en México contribuya a futuro con un mayor porcentaje de participación de generación y, en consecuencia, en la disminución de las emisiones provenientes de combustibles fósiles.

3.1 Contexto internacional

El 2015 fue un año importante para el desarrollo de las energías renovables a nivel mundial, ya que en muchos países se dio un considerable incremento de la capacidad instalada con fuentes renovables (REN, 2016). Según cifras de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, por sus siglas en ingles), a nivel mundial la capacidad instalada con energías renovables en 2015 fue de 503.8 GW. Las regiones con mayor participación son Asia con el 39.7% y Europa con 25.1% del total mundial, mientras que la región con menor participación es Centroamérica y el Caribe con 0.6%. En cuanto al tipo de tecnología, la energía hidráulica concentró el 61.5% del total de capacidad mundial, seguido de la energía eólica con 21.2%, energía solar con 11.4%, 5.2% bioenergía y el restante 0.7% se atribuye a tecnologías geotérmica y marina (SENER, 2016).

3.1.1 Protocolo de Kioto

El Protocolo de Kioto es un acuerdo internacional establecido en 1992 e impulsado por CMNUCC. Se adoptó el 11 de diciembre de 1997 en Kioto Japón, teniendo por objetivo que los países comprometidos redujeran al menos un 5% de las emisiones contaminantes entre 2008 y 2012, tomando como referencia los niveles de 1990 (Naciones Unidas, 1998). Dicho protocolo, se enfocaba en la reducción de las emisiones de seis gases causantes del calentamiento global: Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄) y Óxido Nitroso (N₂O), además de tres gases industriales fluorados: Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC) y Hexafluoruro de

azufre (SF6). Por ejemplo, si la concentración de estos gases en el año 1990 alcanzó el 100%, al término del año 2012 debería ser al menos del 95%. Es preciso señalar que esto no significaba que cada país debía reducir sus emisiones de gases regulados en un 5% como mínimo, sino que este era un porcentaje a nivel global. Por consiguiente, cada país obligado por el protocolo tendría sus propios porcentajes de reducción de emisiones (Naciones Unidas, 1998).

El principal objetivo del acuerdo fue el de estabilizar las concentraciones de los GEI en la atmósfera, a un nivel que no implicara una interferencia peligrosa con el sistema climático y que permitiera un desarrollo sustentable. Por ello se buscó regular las actividades relacionadas con la generación, transformación y consumo de energía, las cuales representan el 80% de las emisiones de CO₂ a escala mundial (Naciones Unidas, 1998).

Para su entrada en vigor se establecieron dos requisitos indispensables: el primero, que el número de países que lo ratificaran fuera de un mínimo de 55; y el segundo, que las emisiones de los países que lo ratificaran superaran el 55% de las emisiones totales de los incluidos en el Anexo Uno del documento de 1990. De esta manera, el protocolo entró en vigor el 16 de febrero de 2005, incluyendo a 164 países que generaban el 61.6% de las emisiones del planeta. Cabe señalar que cuatro países no firmaron el protocolo: Kazajistán, Croacia, Australia y Estados Unidos, por lo cual sus emisiones no estarían reguladas por el acuerdo. Este último país firmó el protocolo pero no lo ratificó, por lo que su adhesión solo fue simbólica hasta el año 2001 en que se retiró del mismo, aduciendo compartir su idea de reducir las emisiones, pero considerando que su aplicación era ineficiente e injusta al involucrar sólo a los países industrializados y excluir de las restricciones a algunos países en vías de desarrollo, considerados emisores a gran escala de gases como China e India en particular, lo que perjudicaría gravemente la economía estadounidense (Naciones Unidas, 1998).

En un inicio México no participó en la firma del Protocolo de Kioto debido a que era un país que se encontraba en desarrollo. Por ello fue hasta 1997 donde México firmó este Protocolo y lo ratificó en 2000 como país No Anexo I. Para los países en desarrollo (países No Anexo I), el Protocolo no estableció metas cuantificables de reducción de emisiones, pero sí compromisos como la elaboración de inventarios nacionales de emisiones, comunicaciones nacionales, así como estudios de mitigación y adaptación al cambio climático.

Al no alcanzarse los resultados esperados, durante la 18ª Reunión de las Partes (COP 18) de la CMNUCC, llevada a cabo en Doha, Qatar en 2012, se ratificó con un segundo periodo de vigencia, del 1º de enero de 2013 hasta el 31 de diciembre de 2020. Al paso del tiempo han ocurrido otras cumbres ya celebradas en Bali (India) en 2007, en Poznan (Polonia) en 2008 en Copenhague (Dinamarca) en 2009, la Cumbre celebrada a finales de noviembre de 2010 en Cancún (México) y la Cumbre de Doha (Qatar) conocida como Enmienda de Doha al Protocolo de Kioto en 2012. (Naciones Unidas, 2016).

3.1.2 Acuerdo de París

Durante la 21ª Conferencia de las Partes (COP 21) en París de la CMNUCC, realizada en diciembre del 2015, 195 países acordaron, tal como se enumera en el Artículo 2, el objetivo de *“reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, en el contexto del desarrollo sostenible y de los esfuerzos por erradicar la pobreza”* (Naciones Unidas, 2016). Para lograr lo anterior, los países anunciaron compromisos de reducción de emisiones globales entre 40% y 70% hasta el 2050. Para lo cual, en base al propio texto del instrumento internacional, se determinan tres acciones concretas:

“a) Mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento a 1,5 °C con respecto a los niveles mencionados, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático;

b) Aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático y promover la resiliencia al clima y un desarrollo con bajas emisiones de GEI, de un modo que no comprometa la producción de alimentos;

c) Elevar las corrientes financieras a un nivel compatible con una trayectoria que conduzca a un desarrollo resiliente al clima y con bajas emisiones de GEI.” (Naciones Unidas, 2016).

El acuerdo fue abierto para firma el 22 de abril de 2016 para celebrar el Día de la Tierra y entró en vigor el 4 de noviembre del mismo año. El año siguiente, el 1º de junio de 2017, Estados Unidos anunció la retirada del acuerdo. Sin embargo, a la salida de Estados Unidos el resto de los países reiteraron sus compromisos. Entre estos se encuentra México, el cual se comprometió a reducir 22 % de sus emisiones de GEI para 2030 y el 50% para 2050 (INECC, 2016). Para ello,

se requiere instrumentos precisos como: acelerar del uso de las energías renovables e incrementar los mecanismos de eficiencia energética.

3.2 Nacional

En los últimos años, se ha buscado el desarrollo de la sustentabilidad energética con el fin de incluir al medio ambiente como uno de los elementos de competencia que contribuyan al desarrollo económico y social de la población (SENER, 2016). Para cumplir con las metas internacionales establecidas en materia de generación de energías limpias y de reducción de emisiones, se estableció en la Ley General de Cambio Climático (2012) que el 35% de la generación eléctrica provenga de energías limpias para el año 2030 (SENER, 2016). En México, al cierre de 2015 la capacidad instalada de generación mediante energías renovables se incrementó 6.6% respecto al periodo 2014, llegando a los 17,140.4 MW, lo cual representó el 25.2% de la capacidad de generación total. La mayor parte de la capacidad en operación renovable continúa siendo hidroeléctrica, que en suma con la energía eólica representan el 80% de la capacidad instalada en energías limpias en el país. Entre 2005 y 2015, la energía eólica ha presentado la mayor expansión en capacidad instalada con el 104.7% anual. Sin embargo, la energía hidráulica presenta la mayor concentración en la participación total de capacidad instalada con fuentes renovables, pero ha mantenido un ritmo de crecimiento de 1.7% anual (SENER, 2016).

3.2.1 Plan Nacional de Desarrollo (PND) y Planes estratégicos

Para llevar a cabo la transición energética se requiere un conjunto de instrumentos de política nacional en materia de obligaciones de energías renovables y aprovechamiento sustentable de la energía. Esto con la finalidad de fomentar una mayor participación de las energías renovables en la planeación, diversificando la matriz energética y reducir la dependencia del país de los combustibles fósiles como fuente primaria de energía (Sener, 2016). Tal situación, se requiere de un paquete de acciones, estrategias, programas, lineamientos y normas que permitan un sector energético basado en tecnologías limpias, energéticamente eficientes y que promueve la productividad, el desarrollo sustentable y la equidad social en el país (Sener, 2016). El PND plantea 5 metas nacionales de desarrollo para México: Un México en Paz que garantice el avance de la democracia, la gobernabilidad y la seguridad de su población, un México Incluyente para garantizar los derechos sociales de todos los mexicanos, un México con educación de calidad para

garantizar un desarrollo integral de todos los mexicanos y así contar con un capital humano preparado, un México próspero que promueva el crecimiento sostenido de la productividad en un clima de estabilidad económica y mediante la generación de igualdad de oportunidades y un México con responsabilidad global que sea una fuerza positiva y propositiva en el mundo, una nación al servicio de las mejores causas de la humanidad (PND 2013-2018, 2013).

En relación con las Estrategias, éstas funcionan como un instrumento de planeación de la política nacional energética que promueven tanto la utilización de energías renovables, como la eficiencia energética (Sener, 2016). Dichos instrumentos de planeación están sujetos a un proceso de mejora continua que involucra la evaluación de resultados parciales y la identificación de barreras para el logro de sus objetivos (SENER 2016). México tiene como meta incrementar el uso de las ER con un 37.5% para 2030 y 50% para el 2050, una meta muy ambiciosa y que se espera sea lograda con ayuda de las políticas ambientales establecidas. Esta meta fue establecida en la Ley General de Cambio Climático, la cual se espera alcanzar con ayuda de las estrategias establecidas.

<i>Plan</i>	<i>Estrategias</i>	<i>Programa</i>
<i>Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018</i>	Estrategia Nacional de Energía (ENE) 2013-2018	Programa Sectorial de Energía 2013-2018
	Estrategia Nacional de Cambio Climático 2013	Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (PRONASE) 2014-2018
	Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios 2014	Programa Especial de la Transición Energética (PETE) 2017-2018

Tabla 1.Instrumentos de la política mexicana para el fomento de energías renovables.
Fuente: Sener, 2016.

3.2.2 Leyes y Reglamentos

Para llevar a cabo el proceso de transición energética y dar cumplimiento a los objetivos, la se apoya de estrategias, programas, medidas y políticas públicas que permitan lograr el incremento de las energías limpias y alcanzar las metas establecidas. La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en su Artículo 4º, define el acceso a la salud, a un medio ambiente sano, agua,

y vivienda digna como derechos fundamentales para los mexicanos. En los artículos 25 y 26 de la Constitución se establece que corresponde al Estado la rectoría del desarrollo nacional para garantizar que éste sea integral y sustentable, para lo cual el Estado planeará y orientará la actividad económica nacional. Para dar cumplimiento a dicho mandato, la Constitución emana una serie de Leyes que permiten la promoción de las Energías Renovables en la planeación del sector energético, como se pueden apreciar en la figura 3. Por otra parte, de acuerdo con la Ley General de Cambio Climático, México tiene como meta aspiracional reducir la emisión de los CyGEI en un 30% para el 2020 respecto a la línea base y en un 50% para el 2050 respecto a las emitidas en el 2000.

<i>Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos</i>	<i>Leyes</i>	<i>Reglamentos</i>
<i>Artículo 4</i>	Ley de la Industria Eléctrica DOF: 11/08/2014	Reglamento de la Ley de la Industria Eléctrica
<i>Artículo 25</i>	Ley de Transición de Energética DOF: 24/12/2015	El Reglamento de la Ley de Transición Energética
<i>Artículo 28</i>	Ley General de Cambio Climático DOF 19-01-2018	Reglamento de la Ley General de Cambio Climático

Tabla 2.Marco legal en México aplicable a las energías renovables.
Fuente: Sener, 2016.

IV. Descripción de la localidad de estudio

La localidad de estudio corresponde a la ciudad de Mexicali, B.C.; por ello, en este apartado se presenta una descripción que incluye: ubicación geográfica y clima, descripción del recurso eólico, actividades socioeconómicas y consumo eléctrico del sector residencial. Lo anterior, con el fin de proporcionar información de la localidad y de interés para la investigación.

4.1 Ubicación geográfica y clima

Mexicali se encuentra localizada en las coordenadas 32° 39' 48" de latitud norte y 115°28'04" de longitud oeste. Cuenta con una altitud máxima de -8 metros sobre el nivel del mar. La ciudad colinda al norte y al este con Estados Unidos de América; al este con el estado de Sonora y el Golfo de California; al sur con el Golfo de California y el municipio de Ensenada; al oeste con los municipios de Ensenada y Tecate (INEGI, 2009).

El clima de Mexicali está clasificado como desértico cálido (Bwh) (García, E., 2004). Las temperaturas promedio son: 3°C la mínima y 47°C la máxima.

4.1.1 Descripción del recurso eólico

Mexicali cuenta con un potencial eólico de 43 W/m² y una velocidad media de 3.2 m/s² y los vientos dominantes provienen del noroeste (Zamora, M., 2011). El régimen de vientos que afecta a Mexicali, en general, tiene un comportamiento estacional; desde principios de otoño y hasta mediados de primavera prevalece un flujo de aire marítimo modificado del noroeste. El área de la ciudad se considera de baja intensidad (menor a 4 m/s), y comportamiento de viento errático (con una tendencia del noroeste al suroeste). Este flujo está asociado con el campo de la alta presión del Pacífico noroeste, que en esta temporada tiene su máximo desplazamiento hacia el sur. Este flujo del noroeste se ve reforzado cuando un sistema frontal atraviesa la región, ya que se intensifica el gradiente de presión que acompaña a estos sistemas frontales (ProAire México 2011-2020, 2011).

4.2 Actividades socioeconómicas

En Mexicali se desarrollan actividades socioeconómicas de las cuales sobresalen agricultura, ganadería, industria y comercio. El desarrollo de Mexicali fue impulsado inicialmente por la actividad agrícola. En el Valle de Mexicali se practica la agricultura de riego, con una superficie bruta de 340 horas. Los principales cultivos en el municipio son: trigo, cebada, algodón, alfalfa, avena, ajonjolí, cártamo, sorgo (Gobierno del estado de Baja California, 2015). En el Valle, alrededor del distrito de riego núm. 14 del río Colorado, se diferentes especies pecuarias, ocupando el primer lugar los bovinos de engorda y lecheros, criados en corral y en praderas artificiales (Gobierno del estado de Baja California, 2015).

En Mexicali existe una industria muy diversificada, ocupando el primer lugar la de productos alimenticios donde se cuentan con pasteurizadoras de lácteos, embotelladoras, molinos de trigo, tortillerías y empacadoras de carne, entre las más importantes. La industria maquiladora está altamente desarrollada, siendo Mexicali el pionero en México en esta rama industrial, inicialmente con la costura; actualmente operan aproximadamente 190 plantas maquiladoras con 55,857 personas empleadas en un ambiente de trabajo no sindicalizado y de baja rotación (Gobierno del estado de Baja California, 2015). La industria de transformación y la maquiladora ha sido principalmente en el ramo de alimentos, automotriz, metal, mecánica, envases de vidrio, electrónica, plástico y textil. Otras industrias no menos importantes son la fabricación y ensamblaje de artículos eléctricos y electrónicos, tractocamiones, remolques de carga, maquiladoras de juguetes (Gobierno del Estado de Baja California, 2015).

Por otro lado, la industria eléctrica se ha desarrollado, entre otras cosas, gracias a las características geológicas de la localidad.; Mexicali cuenta con una planta geo termoeléctrica con un potencial suficiente para abastecer a todo el estado y además exportar este energético. La industria es uno de los renglones más dinámicos de la economía de la región, Mexicali es reconocida como un importante centro de producción compartida (Gobierno del estado de Baja California, 2015).

4.3 Consumo energético en el sector residencial

En los últimos años Mexicali ha tenido un aumento significativo de consumo de energía debido al aumento de población que se ha tenido en la ciudad, basados en datos de la INEGI y con información de anuarios de venta de energía de BC, en 1990 había 601, 938 mil habitantes y se contaba con un consumo de energía de 1533.27 GWh. Actualmente en el último conteo en 2015

había 1,025,740 mil habitantes (CONAPO, 2017) y un consumo de energía eléctrica de 4736.29 GWh. En pocas palabras y como se puede apreciar se ha tenido un gran aumento en energía eléctrica por casi tres veces al valor de 1990 y el doble de población en la ciudad de Mexicali para el año 2015.

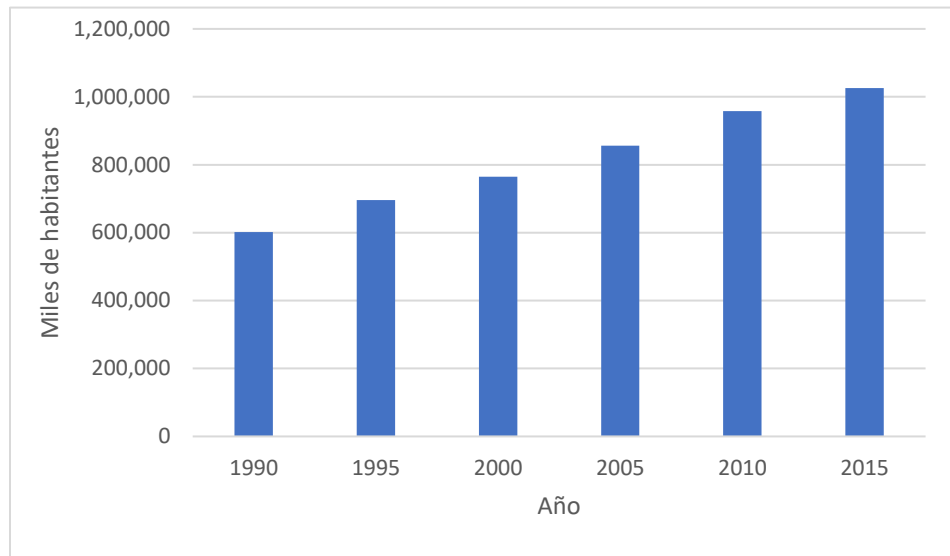


Figura 1. Población de Mexicali de 1990 a 2015.
Fuente: CONAPO, 2017.

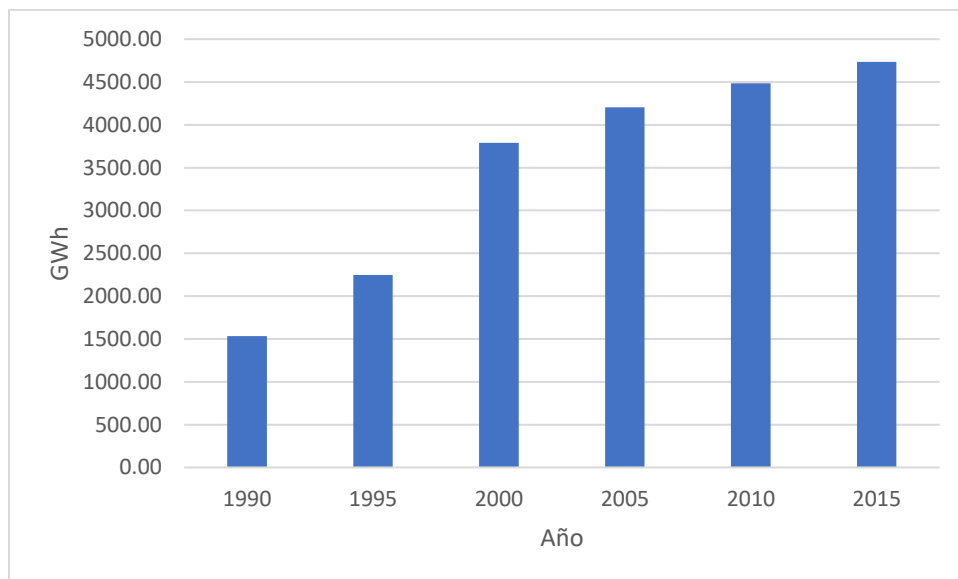


Figura 2. Consumo energía eléctrica en Mexicali de 1990 a 2015.
Fuente: CFE, 2016.

V. Metodología

En este capítulo se presenta la descripción del proceso metodológico para la resolución del planteamiento del problema. En la primera sección se describen las series de tiempo de velocidad de viento utilizadas, haciendo énfasis en las diferencias entre ellas, y se calculan los parámetros estadísticos de media y desviación estándar. En la segunda sección se describe el desarrollo para encontrar las distribuciones de Weibull de cada una de las series de tiempo. Los aerogeneradores de baja potencia (ABP) seleccionados para determinar el potencial energético se presentan en la tercera sección, incluyendo información técnica de cada uno de ellos. Por último, en la cuarta sección se presenta la metodología para estimar la energía que se puede generar con el uso de los aerogeneradores, además se calcula la cantidad de CO₂ que deja de emitirse a la atmósfera por el uso de la energía minieólica y se hacen proyecciones hacia los años 2020, 2025 2030 para determinar cómo puede contribuir la minieólica a la mitigación de las emisiones de CO₂.

5.1 Series de tiempo

Se analizaron dos tipos de series de tiempo de velocidad de viento registradas en la estación meteorológica del Instituto de Ingeniería de la UABC, en la ciudad de Mexicali, Baja California. El primer tipo de serie consiste en dos años (2014 y 2015) de datos horarios registrados, a una altura de 19 metros sobre el nivel de suelo, con un anemómetro bidireccional de propela marca Young modelo 05101 que mide la velocidad horizontal del viento y su dirección. El anemómetro está programado para registrar el viento con una frecuencia de 1 Hz y enviar al sistema de adquisición de datos el valor promedio de cada hora. El segundo tipo de serie consiste en 4 meses de datos registrados con una frecuencia de muestreo de 10 Hz (un dato cada décima de segundo), lo que representa una serie de mayor densidad de datos que considera la variabilidad a corto plazo (segundos a minutos) de la velocidad del viento. Esta segunda serie fue muestreada durante los meses de noviembre y diciembre de 2016 y enero y febrero de 2017 con un anemómetro sónico tridimensional CSAT3 Campbell Scientific, que registra las tres componentes ortogonales (u,v,w) de la velocidad del viento, así como la temperatura del aire. Cada una de las series es almacenada en un sistema de adquisición de datos y extraída periódicamente para su posterior análisis de calidad y procesamiento.

En la serie de datos horarios, se calculó el promedio y la desviación estándar de la velocidad del viento en forma mensual, anual y bianual. Por otra parte, para la serie de tiempo de mayor

densidad, primero se calculó la magnitud de la velocidad por medio de la ecuación

$$V = |\vec{V}| = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$$

A partir de esta nueva serie de magnitudes de velocidad, se construyeron cuatro series de tiempo de valores de velocidad promediadas en intervalos de tiempo de 1, 5, 10 y 60 minutos. En cada una de estas cuatro series se calcularon la velocidad media y la desviación estándar mensuales.

5.2 Distribuciones de Weibull de las Series de Tiempo Analizadas

En la sección 2.3 se presentaron las ecuaciones a partir de las cuales se determinan las funciones de densidad de probabilidad (fdp) de Weibull (Ecuación 2.3-1) que describen el comportamiento del viento, en la zona de estudio, de acuerdo a cada serie de tiempo analizada. A partir de los parámetros estadísticos calculados en la sección anterior (media y desviación estándar) para cada serie de tiempo, se calculan los parámetros de forma (k) y escala (c) (ecuaciones 2.3-2 y 2.3-3, respectivamente) que caracterizan a las fdp de Weibull de las respectivas series de tiempo estudiadas.

5.3 Aerogeneradores de Baja Potencia

Los ABP que se utilizan en la estimación del potencial eólico fueron seleccionados considerando, únicamente, que su velocidad de arranque fuera menor que las velocidades promedio calculadas en la sección anterior. En las siguientes subsecciones se presentan las curvas de potencia, así como algunas características técnicas de cada uno de los aerogeneradores.

5.3.1 Enair E30 PRO

El aerogenerador de minieólica E30PRO, es el más pequeño de los aerogeneradores de la empresa Enair. Lo comercializan como un dispositivo diseñado para cubrir la demanda energética de cualquier vivienda habitual debido a que su eficiencia y diseño le permite generar energía con velocidades de viento bajas y a su vez soportar de forma eficiente la generación con fuertes vientos. En la siguiente tabla se presentan algunas características técnicas del aerogenerador, mientras que la gráfica de la Figura 3 representa la curva de potencia que, de acuerdo con la compañía, indica la potencia que entrega el aerogenerador a distintas velocidades.

Características técnicas

Número de palas	3
Potencia	3000W
Potencia nominal	1900W (Según IEC 61400-2)
Tensión	24 / 48 / 220V
Clase de viento	CLASS I - IEC 61400-2/NVN I - A
Diámetro	3.8 m
Área de barrido	11.34 m ²
Peso	125 kg
Velocidad de arranque	1.8 m/s
Velocidad nominal	11 m/s
Rango de generación eficiente	2 a 60 m/s

Tabla 3. Características técnicas del ABP Enair E30 Pro.

Fuente: Elaborado por el autor con datos de ficha técnica.

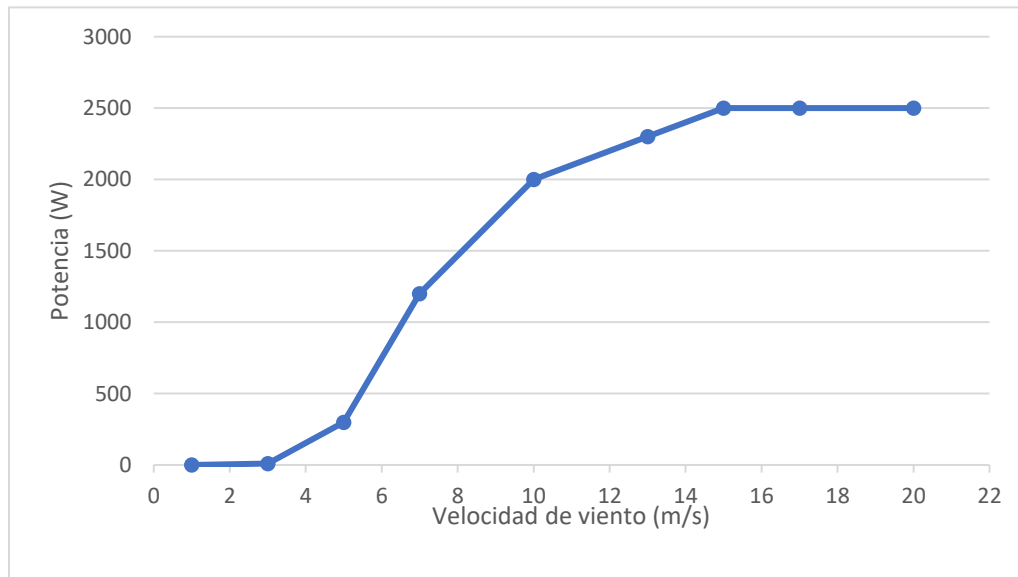


Figura 3. Curva de potencia del ABP Enair E30 PRO.

Fuente: Elaborado por el autor con datos de ficha técnica.

5.3.2 Enair E70 PRO

El aerogenerador de minieólica E70PRO, está diseñado para cubrir las demandas energéticas de cualquier vivienda habitual, gasolinera, granja o pequeño comercio. Su alta eficiencia nos permite generar energía con muy bajo viento y a su vez soportar de forma eficiente en generación fuertes vientos. En la siguiente tabla se presentan algunas características técnicas del aerogenerador,

mientras que la gráfica de la Figura 4 representa la curva de potencia que, de acuerdo con la compañía, indica la potencia que entrega el aerogenerador en distintas velocidades.

Características técnicas	
Número de palas	3
Potencia	5500W
Potencia nominal	4000W
Tensión	24 / 48 / 220V
Clase de viento	CLASS I - IEC 61400-2/NVN I - A
Diámetro	4.3 m
Área de barrido	14.5 m ²
Peso	165 kg
Velocidad de arranque	1.8 m/s
Velocidad nominal	11 m/s
Rango de generación eficiente	2 a 60 m/s

Tabla 4. Características técnicas del ABP Enair E70 PRO.
Fuente: Elaborado por el autor con datos de ficha técnica.

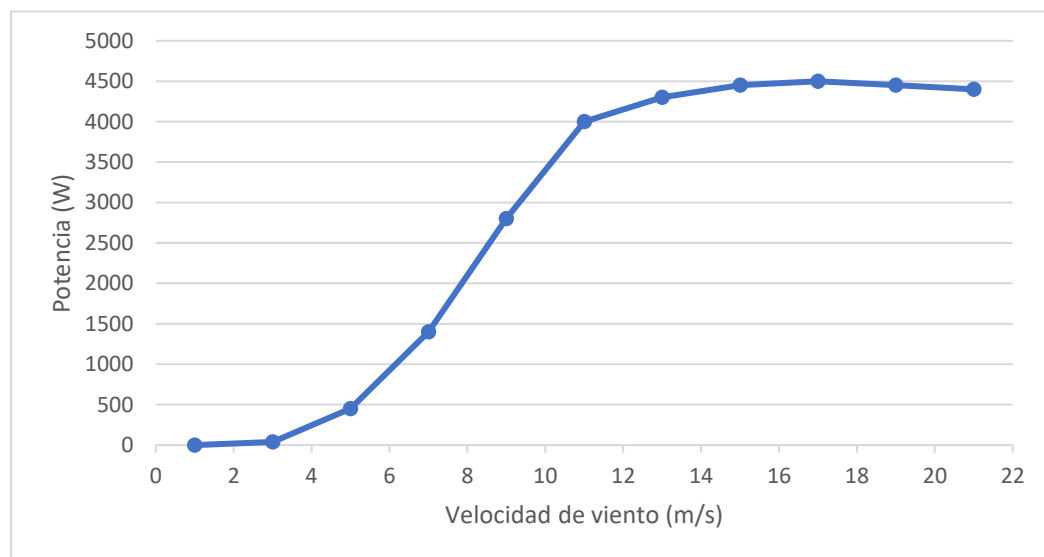


Figura 4. Curva de potencia del ABP Enair E70 PRO.
Fuente: Elaborado por el autor con datos de ficha técnica.

5.3.3 Enair E200L

El aerogenerador de minieólica E200L, está diseñado para cubrir las demandas energéticas de pequeñas industrias tales como granjas, invernaderos, bodegas, etc. La versión limitada del modelo E200, es una versión especial para adaptarse a la normativa de algunos países que requieren un máximo de potencia de 10 kW, en estos casos la configuración de la máquina a partir de los 9 m/s empieza a regular su potencia. Su eficiencia de generación y diseño nos permite abastecer instalaciones trifásicas de gran potencia con un alto rendimiento. En la siguiente tabla se presentan algunas características técnicas del aerogenerador, mientras que la gráfica de la Figura 5 representa la curva de potencia que, de acuerdo con la compañía, indica la potencia que entrega el aerogenerador en distintas velocidades.

<i>Características técnicas</i>	
<i>Número de palas</i>	3
<i>Potencia</i>	20kW
<i>Potencia nominal</i>	10kW, limitada por software
<i>Tensión</i>	500 v
<i>Clase de viento</i>	CLASS I - IEC 61400-2
<i>Diámetro</i>	9.8 m
<i>Área de barrido</i>	75.4 m
<i>Peso</i>	1000 kg
<i>Velocidad de arranque</i>	1.8 m/s
<i>Velocidad de corte</i>	30 m/s
<i>Rango de generación eficiente</i>	2 a 30 m/s

Tabla 5. Características técnicas del ABP Enair E200L.

Fuente: Elaborado por el autor con datos de ficha técnica.

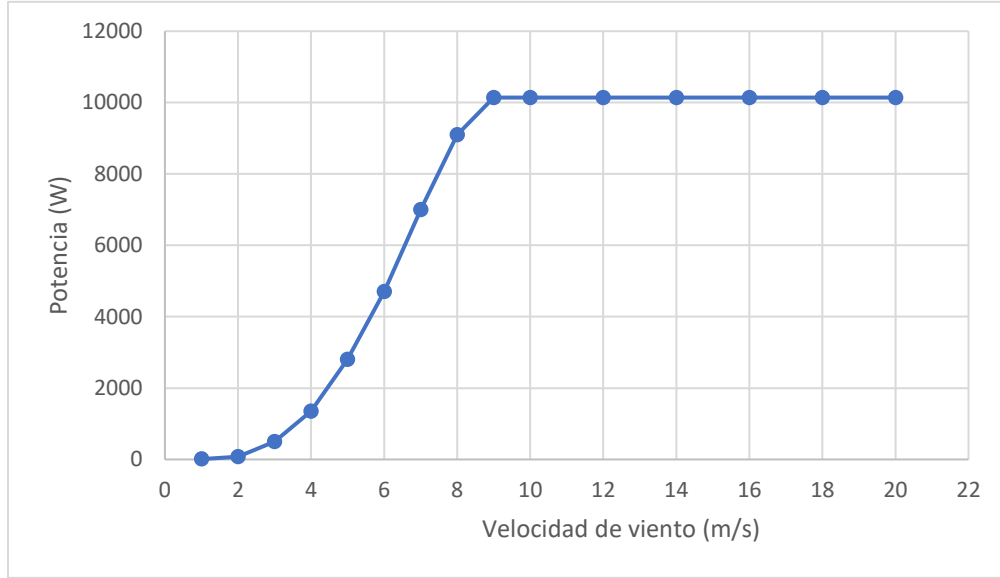


Figura 5. Curva de potencia del ABP Enair E200L.
Fuente: Elaborado por el autor con datos de ficha técnica.

5.4 Estimación de Energía Minieólica Generada y Reducción de CO₂

La estimación de la energía anual, que se podría generar usando los ABP indicados en la sección anterior, se calcula utilizando las fdp de Weibull y la curva de potencia de cada aerogenerador. Primeramente, se calcula la probabilidad de que la velocidad de viento se encuentre en el i -ésimo intervalo $[a,b]$, usando la ecuación

$$P(a < V_i < b) = \int_a^b f(V)dV = F(b) - F(a)$$

donde $f(V)$ es la fdp de Weibull (Ecuación 2.3-1), a y b son las cotas inferior y superior, respectivamente, de la i -ésima clase del histograma de frecuencias de velocidades, y la función $F(V)$ es la función de probabilidad acumulada dada por la ecuación

$$F(V) = \int_0^V f(x)dx$$

La probabilidad intervalar encontrada representa el porcentaje del tiempo, de la serie completa, en el que se presentaron velocidades V_i del viento. Este porcentaje se convierte a horas multiplicándolo por el número total de horas de la serie de tiempo. Por ejemplo, al multiplicar por

las 8760 horas de un año, entonces tendremos el número de horas (duración) en las que se presentaron vientos con velocidad V_i durante el año.

Como segundo paso, se utiliza la curva de potencia del aerogenerador para determinar la potencia que, de acuerdo con el fabricante, entrega el aerogenerador cuando el viento fluye a velocidad V_i . Enseguida se multiplican los dos valores anteriores, duración por potencia, para obtener la energía que el ABP estaría entregando cuando el viento se presente con velocidad V_i .

Este procedimiento se repite para cada uno de los n intervalos o clases en los que se tienen valores de velocidad de la serie de tiempo analizada. Finalmente, se obtiene la energía total generada (mensual o anual) realizando la suma de las energías generadas en cada intervalo de velocidad.

Por último, la estimación de CO_2 que no se emite a la atmósfera por el uso de ABP se realiza usando el factor de emisión de 0.454 toneladas de CO_2/MWh (SEMARNAT, 2015). Se multiplica la cantidad energía total generada y el resultado corresponde a la cantidad de CO_2 , expresado en toneladas, que dejan de emitirse a la atmósfera por el uso de la energía minieólica.

5.5 Proyección de la mitigación de emisiones de CO_2 por el uso de la minieólica

Para elaborar proyecciones a mediano plazo de la mitigación de emisiones de CO_2 por el uso de la aerogeneración de baja potencia, primeramente, se analizó el comportamiento del consumo de energía en función del tamaño de la población. Para esto se elaboró una gráfica de Energía consumida (GWh/año) contra número de habitantes/año a partir de datos de CFE (SENER, 2016) y CONAPO (CONAPO, 2017). Enseguida se realizó un ajuste de curvas y se seleccionó la que presentó el mayor coeficiente de correlación. A partir de la función de la curva seleccionada, se calculó la cantidad de energía que se estará consumiendo en los años 2020, 2025 y 2030.

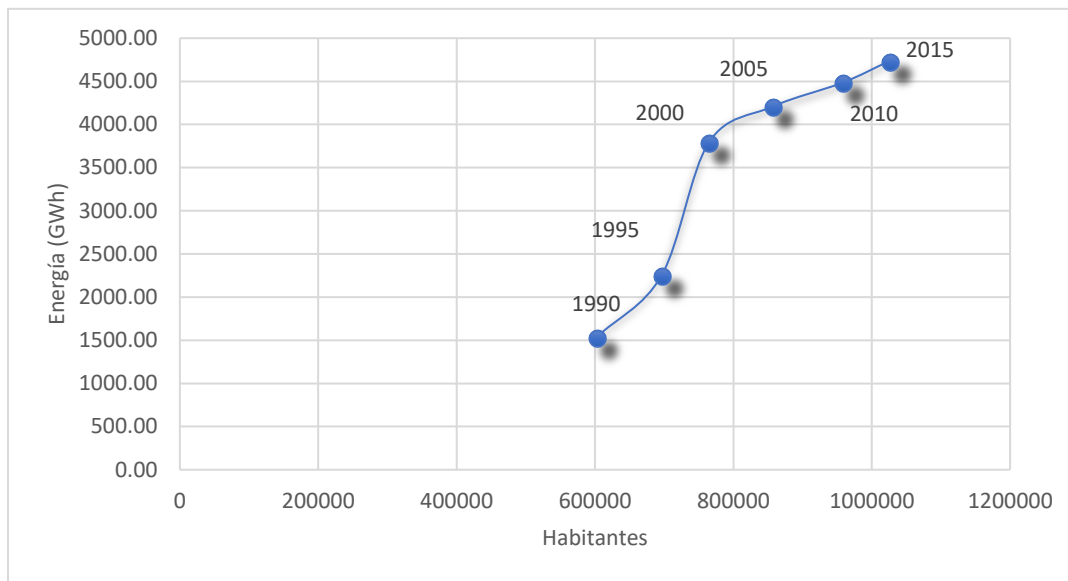


Figura 6. Población y consumo de energía en Mexicali (1990-2015).
Fuente: Elaborado por el autor con datos de CFE y CONAPO.

VI. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de acuerdo a la metodología desarrollada. En la sección 6.1 se presentan los parámetros estadísticos de las series de tiempo para los distintos periodos considerados. La sección 6.2 muestra las distribuciones de Weibull que corresponden a cada serie de tiempo, caracterizadas por sus correspondientes parámetros de forma y escala, mientras que en la sección 6.3 se reporta la estimación de la cantidad de energía generada por cada aerogenerador con las velocidades registradas en cada serie de tiempo, así como la cantidad de CO₂ que no se emite a la atmósfera como consecuencia del uso de esta energía renovable. Finalmente, en la sección 6.4 se presenta la contribución de la energía minieólica en la reducción de las emisiones de CO₂ a la atmósfera en la ciudad de Mexicali, basada en proyecciones de energía consumida y en los compromisos de México ratificados en la Reunión Cumbre de París en diciembre de 2015.

6.1 Parámetros Estadísticos de las Series de Tiempo

Los primeros resultados obtenidos fueron los parámetros estadísticos de velocidad media y desviación estándar del viento para cada mes (Tabla 6 y 7), esto con el fin de ver su comportamiento a través de cada año. Así mismo se obtuvo la velocidad media y la desviación estándar anual y bianual (Tabla 8), parámetros necesarios para obtener la distribución de Weibull.

<i>Mes</i>	$\bar{V}$ (m/s)	σ (m/s)
<i>Enero</i>	1.11	0.72
<i>Febrero</i>	1.66	1.23
<i>Marzo</i>	1.98	1.17
<i>Abril</i>	2.51	1.49
<i>Mayo</i>	2.47	1.42
<i>Junio</i>	2.33	1.38
<i>Julio</i>	2.86	1.62
<i>Agosto</i>	1.98	1.53
<i>Septiembre</i>	2.23	1.28
<i>Octubre</i>	1.46	0.67
<i>Noviembre</i>	1.70	1.02
<i>Diciembre</i>	1.48	0.79

Tabla 6. Velocidad media y desviación estándar mensual (Año 2014).
Fuente: Elaborado por el autor.

Mes	$\bar{V}$ (m/s)	σ (m/s)
Enero	1.33	0.62
Febrero	1.49	0.79
Marzo	1.87	0.87
Abril	2.26	1.15
Mayo	2.53	1.30
Junio	2.65	1.29
Julio	2.42	1.39
Agosto	2.41	1.24
Septiembre	2.09	1.27
Octubre	1.95	1.00
Noviembre	2.11	1.40
Diciembre	1.92	1.36

Tabla 7. Velocidad media y desviación estándar mensual (Año 2015).
Fuente: Elaborado por el autor.

Periodo	$\bar{V}$ (m/s)	σ (m/s)
2014	2.01	1.34
2015	2.09	1.23
2014-2015	2.05	1.28

Tabla 8. Velocidad media y desviación estándar anual y bianual.
Fuente: Elaborado por el autor.

De los valores anteriores se puede observar que la velocidad promedio es baja, aproximadamente 2 m/s, por lo que necesariamente se requiere utilizar ABP con una velocidad de arranque menor a este valor. Con respecto a la desviación estándar, ésta nos explica que podemos alcanzar velocidades importantes para generación de energía.

Como se explicó en la sección 5.1, en el caso de la serie de datos de mayor densidad solo se obtuvieron valores mensuales de velocidad media y desviación estándar para cada serie de tiempo n-minutal. En las Tablas 9 y 10 se presentan los valores de velocidad media y desviación estándar para las series uno-minutal y sesenta-minutal, respectivamente, de los 4 meses analizados. Se puede observar que los valores de velocidad media son exactamente los mismos en los correspondientes meses de cada serie. Sin embargo, los valores de la desviación estándar disminuyen para la serie sesenta-minutal como consecuencia del suavizado que se realiza al

promediar los datos en un intervalo de tiempo mayor (60 minutos) con respecto al promediado de cada minuto. En otras palabras, promediar en intervalos de tiempo cada vez mayores representa ir eliminando la variabilidad del fenómeno.

<i>Mes</i>	$\bar{V}$	σ
<i>Noviembre 2016</i>	1.75	1.22
<i>Diciembre 2016</i>	1.73	1.47
<i>Enero 2017</i>	2.1	1.56
<i>Febrero 2017</i>	2	1.41

Tabla 9. Velocidad media y desviación estándar mensual de la serie 1 minutal.

Fuente: Elaborado por el autor.

<i>Mes</i>	$\bar{V}$	σ
<i>Noviembre 2016</i>	1.75	1.1
<i>Diciembre 2016</i>	1.73	1.32
<i>Enero 2017</i>	2.1	1.41
<i>Febrero 2017</i>	2	1.26

Tabla 10. Velocidad promedio y desviación estándar mensual de la serie 60 minutal.

Fuente: Elaborado por el autor.

6.2 Distribuciones de Probabilidad de Weibull

Una vez obtenidos los valores de velocidad media y desviación estándar, se usaron las ecuaciones 2.3-2 y 2.3-3 para calcular los parámetros de forma (k) y escala (c), que caracterizan a las distribuciones de Weibull de cada serie de datos analizada. En la tabla 11 se muestran los parámetros estadísticos calculados para las series de datos horarios anual y bianual. Así mismo se presentan los parámetros estadísticos obtenidos para la serie de 1 minuto (Tabla 12) y la serie de 60 min (Tabla 13).

<i>Periodo</i>	$\bar{V}(m/s)$	σ	k	c
<i>2014</i>	2.01	1.34	1.56	2.23
<i>2015</i>	2.09	1.23	1.78	2.22
<i>2014-2015</i>	2.05	1.28	1.66	2.35

Tabla 11. Parámetros estadísticos de viento para calcular la distribución de Weibull

Fuente: Elaborado por el autor.

<i>1 min</i>				
<i>Mes</i>	$\bar{V}$	Σ	k	c
<i>Noviembre 2016</i>	1.75	1.22	1.48	1.96
<i>Diciembre 2016</i>	1.73	1.47	1.19	1.91
<i>Enero 2017</i>	2.1	1.56	1.38	2.37
<i>Febrero 2017</i>	2	1.41	1.46	2.25

Tabla 12. Parámetros estadísticos de viento de la serie 1 minutal.
Fuente: Elaborado por el autor.

<i>60 min</i>				
<i>Mes</i>	$\bar{V}$	σ	k	c
<i>Noviembre 2016</i>	1.75	1.1	1.66	1.91
<i>Diciembre 2016</i>	1.73	1.32	1.34	1.95
<i>Enero 2017</i>	2.1	1.41	1.54	2.34
<i>Febrero 2017</i>	2	1.26	1.65	2.19

Tabla 13. Parámetros estadísticos de viento en el intervalo de 60 min.
Fuente: Elaborado por el autor.

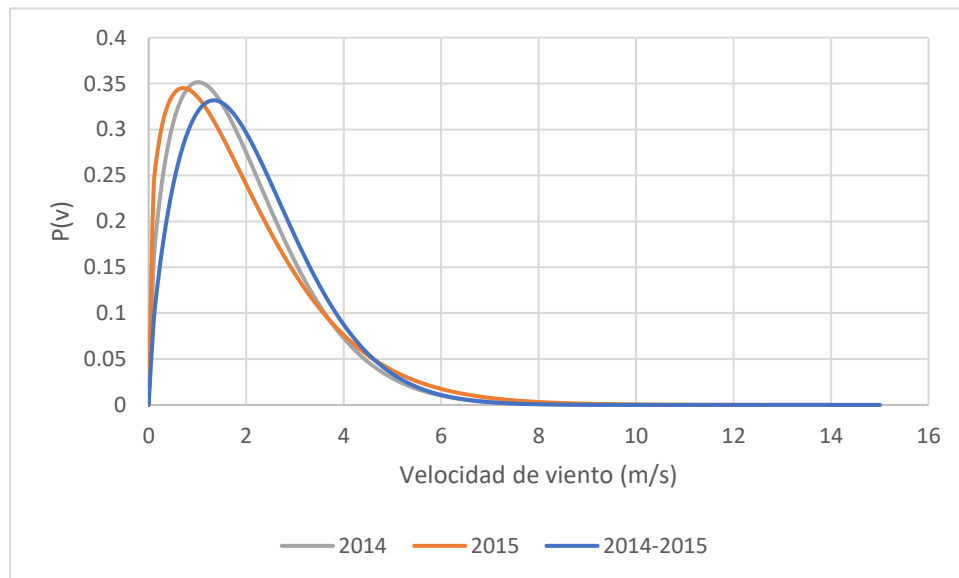


Figura 7. Distribución de Weibull para las series de datos horarios.
Fuente: Elaborado por el autor.

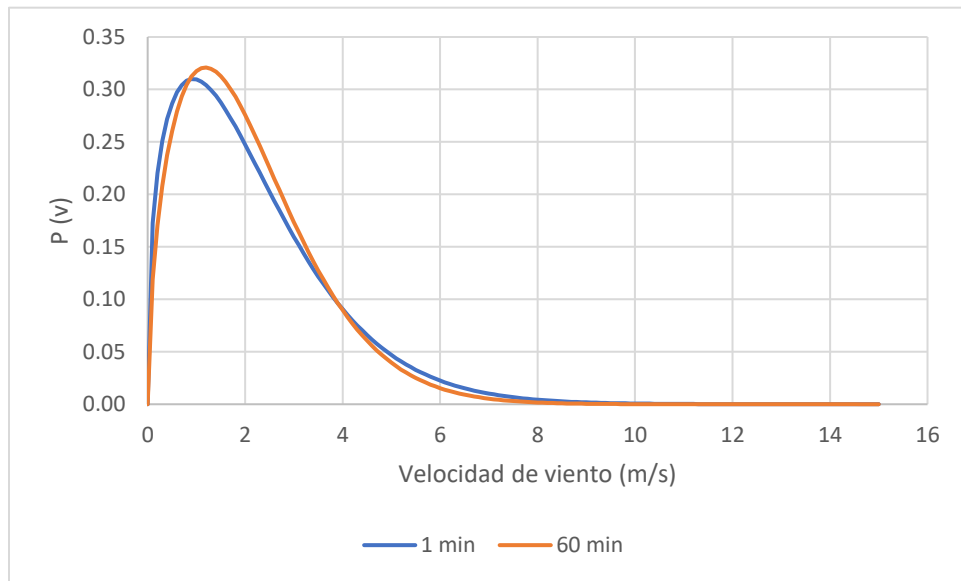


Figura 8. Distribución de Weibull para las series uno-minutal y sesenta-minutal.
Fuente: Elaborado por el autor.

6.3 Estimación de Energía Generada y Reducción de CO₂

Mediante los calculados mencionados en la metodología se obtuvieron los siguientes resultados que muestran la cantidad de energía estimada que podría ser generada por ABP para el periodo bianual, cabe recalcar que la energía mostrada en la tabla 14 es lo que se generaría por año. Por otra parte, se muestran las gráficas de distribución de Weibull para cada serie de datos, donde se puede apreciar la probabilidad de la velocidad de viento para la generación de energía.

<i>ABP</i>	<i>Energía generada (kWh/año)</i>
<i>Enair E30 (3 kW)</i>	1096
<i>Enair E70 (5 kW)</i>	1525
<i>Enair E200L (10 kW)</i>	3781

Tabla 14. Generación de energía para cada ABP (Periodo 2014-2015).
Fuente: Elaborado por el autor.

Para la serie de tiempo de mayor densidad el cálculo de energía obtenida fue mensual y solo se utilizaron el ABP de 3 y 5 kW (Tabla 15). En los resultados se muestra un comportamiento de disminución de energía conforme se aumenta el intervalo de tiempo, por lo que la mejor opción

para este caso sería utilizar los promedios a 1 minuto debido a que se obtiene una mayor cantidad de energía.

<i>Mes</i>	<i>ABP 3 kW</i>		<i>ABP 5 kW</i>	
	1 min	60 min	1 min	60 min
<i>Noviembre 2016</i>	70 kWh	64 kWh	97 kWh	90 kWh
<i>Diciembre 2016</i>	81 kWh	76 kWh	115 kWh	106 kWh
<i>Enero 2017</i>	105 kWh	95 kWh	147 kWh	135 kWh
<i>Febrero 2017</i>	83 kWh	75 kWh	116 kWh	105 kWh

Tabla 15. Comparación de energía generada mensualmente para ABP entre intervalos de 1 y 60 minutos.
Fuente: Elaborado por el autor.

Con el fin de lograr el objetivo planteado al inicio de esta tesis se obtuvieron los siguientes resultados que muestran la cantidad de energía disponible que podría ser generada por Aerogeneradores de Baja Potencia (ABP) y su equivalencia en cantidad de CO₂ no emitido al ambiente en la ciudad de Mexicali.

Con la cantidad de energía estimada para cada aerogenerador se determinó la cantidad de emisiones de CO₂e/anual que se deja de emitir al ambiente, como se muestra en la tabla 14.

<i>ABP</i>	<i>Energía generada (kWh/año)</i>	<i>tCO₂e/año</i>
<i>Enair E30 (3 kW)</i>	1,096	0.5
<i>Enair E70 (5 kW)</i>	1,525	0.7
<i>Enair e200L (10 kW)</i>	3,781	1.73

Tabla 16. Estimación de energía generada para cada periodo y CO₂ equivalente para datos horarios.
Fuente: Elaborado por el autor

En los datos de alta frecuencia el enfoque fue para el mes de enero y en el intervalo de tiempo de 1 minuto debido a que fue el mes e intervalo donde se obtuvo una mayor cantidad de energía. Con la energía estimada mensual se determinó la cantidad de emisiones de CO₂e/mensual que se dejaría de emitir al ambiente (Tabla 17).

Mes	ABP 3 kW		ABP 5 kW	
	Energía generada	tCO ₂ e	Energía generada	tCO ₂ e
Enero	105 kWh	0.05	147 kWh	0.07

Tabla 17. Estimación de energía generada para el mes de enero y tCO₂e/mensual.
Fuente: Elaborado por el autor.

6.4 Proyección de la mitigación de emisiones de CO₂ por el uso de la minieólica

En esta sección se muestran los resultados que presentan proyecciones de aumento en consumo de energía eléctrica, basadas en los consumos de energía eléctrica entre el periodo 1990 a 2015, la cantidad de población para el mismo periodo, así como el incremento población que se espera para los años 2020, 2025 y 2030 para la ciudad de Mexicali. Estas proyecciones son necesarias para obtener un estimado de CO₂e que se emitirá al ambiente por el aumento de energía.

En la figura 4 de la sección 5 se le hicieron tres de ajustes de curva con los cuales se generó una proyección de como aumenta la cantidad de energía conforme aumenta la cantidad de población. El primero es un ajuste logarítmico el cual depende de la fórmula $y = 6233\ln(x) - 81250$ y $R^2 = 0.9171$ (Figura 9) en el que las cantidades de consumo energía no tuvieron un gran incremento. En el ajuste lineal dado por la fórmula $y = 0.0076x - 2749.6$ y $R^2 = 0.8834$ (Figura 10), donde los consumos de energía aumentaron un poco más que el ajuste logarítmico. Por último, el ajuste potencial en el cual los resultados se obtienen con la formula $y = 9E - 10x^{2.1248}$ y $R^2 = 0.8761$ (Figura 11), en este ajuste de curva los consumos de energía reflejan un incremento significativo comparado con el ajuste logarítmico.

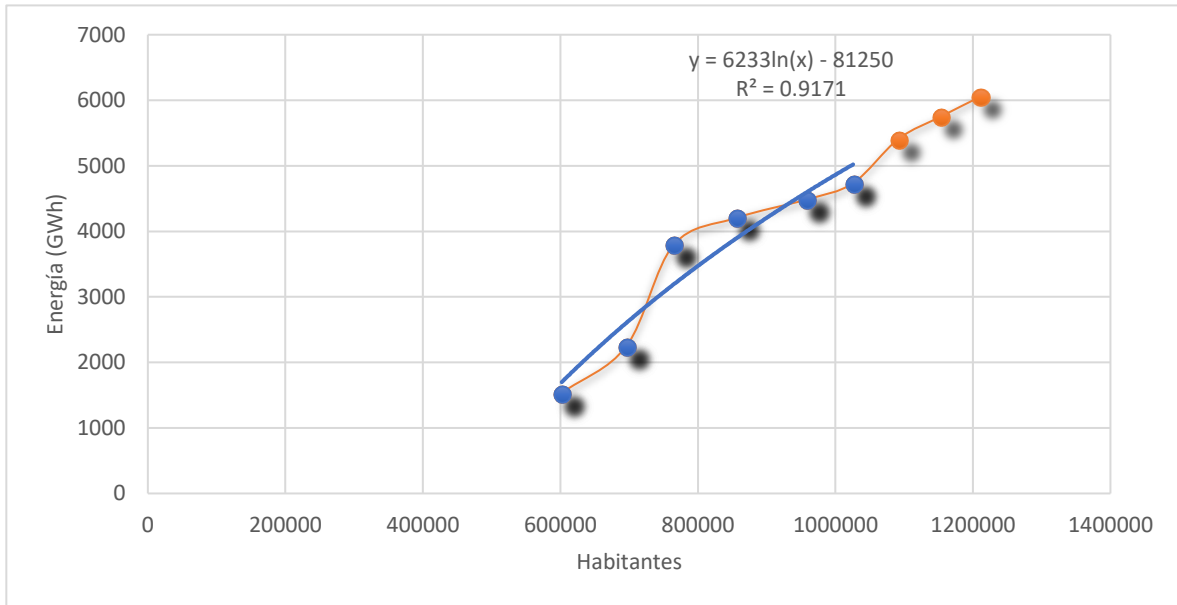


Figura 9. Ajuste logarítmico de población y consumo de energía en Mexicali (1990-2030).
Fuente: Elaborado por el autor con datos de CFE y CONAPO.

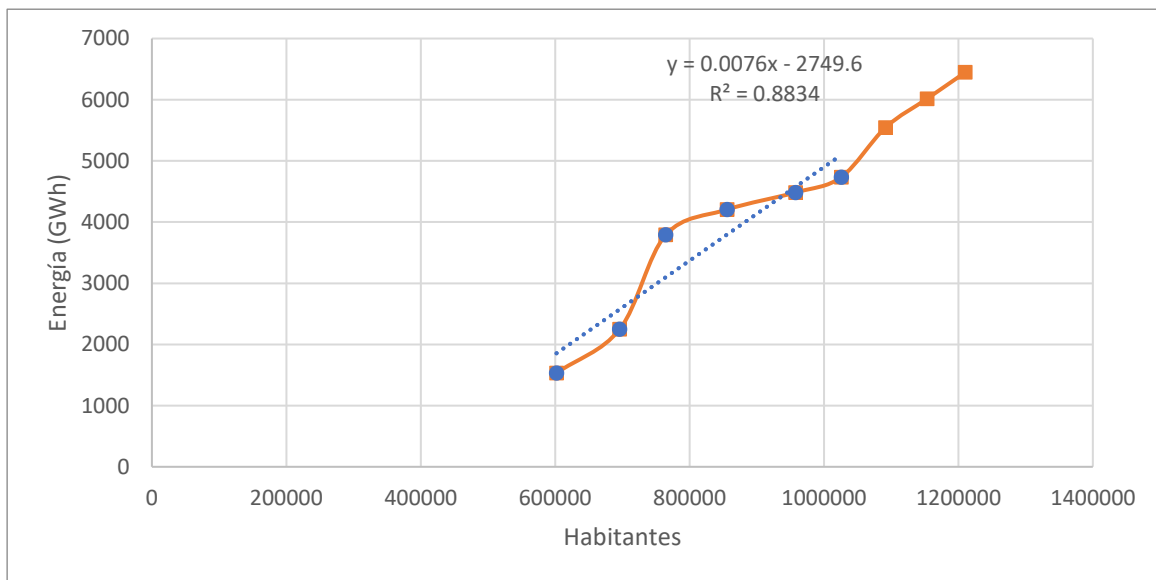


Figura 10. Ajuste lineal de población y consumo de energía en Mexicali (1990-2030).
Fuente: Elaborado por el autor con datos de CFE y CONAPO.

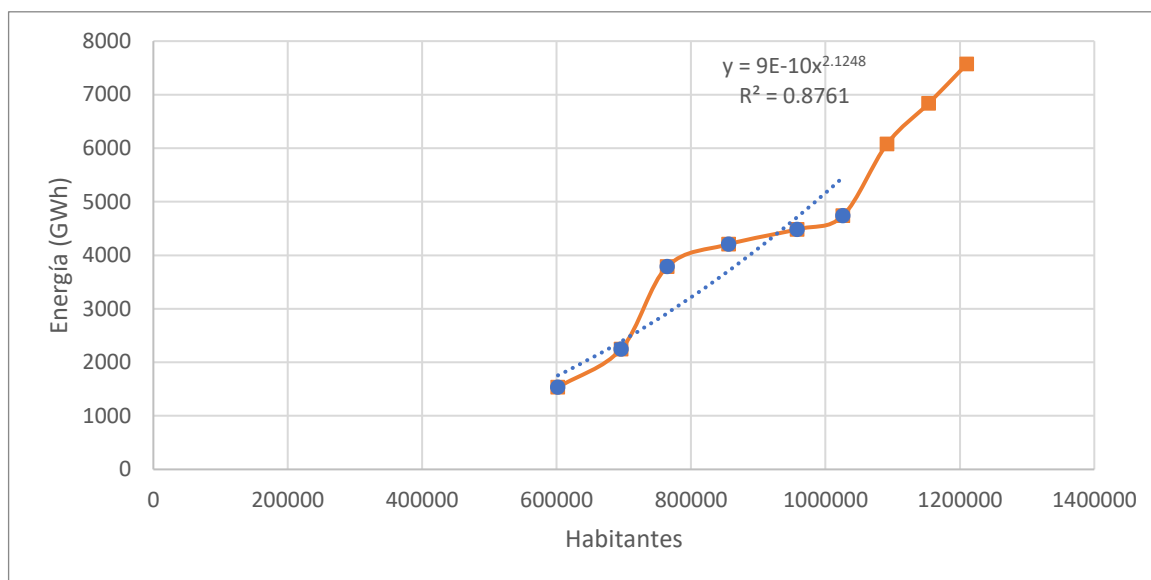


Figura 11. Ajuste potencial de población y consumo de energía en Mexicali (1990-2030).
Fuente: Elaborado por el autor con datos de CFE y CONAPO.

En las proyecciones de consumo de energía se considera que la energía es generada mediante fuentes convencionales por lo que las cantidades de energía reflejadas para cada curva equivale a una cantidad de CO₂ emitida al ambiente (Figura 10). Como se puede en la figura 9 el ajuste potencial es el que proyecta un mayor consumo de energía por lo tanto sería la opción que menos contribuye con el ambiente, esto debido a que entre mayor sea el consumo de energía mayor son las emisiones de CO₂ al ambiente. En el caso del ajuste logarítmico y a pesar de que refleja un consumo mayor al consumo base, éste representa el menor consumo de energía comparando los tres ajustes y por la tanto la contribución de emisiones de CO₂ en el ambiente es menor. Así como se obtuvo la proyección de energía conforme al aumento de población en la figura 10 se presentan las emisiones para cada una de las curvas.

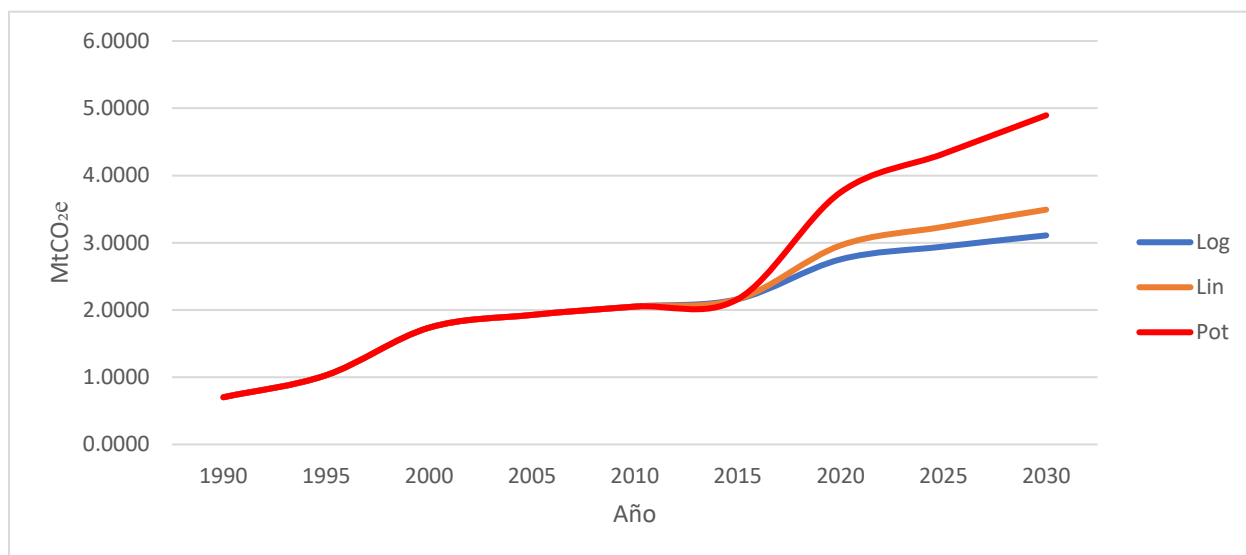


Figura 12. MtCO₂ emitidos al ambiente por la proyección de energía (1990-2030).
Fuente: Elaborado por el autor

6.5 Contribución de la minieólica

México se comprometió a reducir 20% sus emisiones de CO_{2e} para 2025 y 25% para el 2030. Los compromisos mencionados fueron utilizados en los resultados de esta investigación para representar la cantidad de ABP necesarios para cumplir con los porcentajes establecidos, cabe mencionar que los resultados son basados en las proyecciones de cantidad de energía y la emisión CO₂ para la proyección del ajuste logarítmico, así como la cantidad de CO₂ que no se dejaría de emitir al ambiente por utilizar la minieólica. Tanto para los datos horarios (Tabla 18) y los datos de alta frecuencia (Tabla 19) las cantidades de ABP son inmensas por lo que no sería recomendable dejar todo el cargo de mitigación a la minieólica, si no que sería una contribución entre varias herramientas que ayuden a reducir las emisiones.

<i>Proyección de Energía y CO₂e</i>				<i>Número de ABP</i>		
Año	Consumo de energía (GWh/año)	MtCO ₂ e/año	Compromiso de reducción de CO ₂ e en México	3 kW 1035 kWh (0.5tCO ₂)	5 kW 1525 kWh (0.7 tCO ₂)	10 kW 3781 kWh (1.73 tCO ₂)
2025	6424.95	2.94	20%(.588 MtCO ₂)	1,176,000	840,000	339,884
2030	6788.19	3.11	25%(.777 MtCO ₂)	1,554,000	1,110,000	449,133

Tabla 18. Proyección de energía, CO₂e y cantidad de ABP necesarios para datos horarios.

Fuente: Elaborado por el autor

<i>Proyección de Energía y CO₂e</i>				<i>Número de ABP</i>	
Año	Consumo de energía (GWh/mes)	tCO ₂ e/mes	Compromiso de reducción de CO ₂ e en México	3 kW 105 kWh (0.05tCO ₂)	5 kW 147 kWh (0.07 tCO ₂)
2025	535.41	245,217.78	20%(49,043.5 tCO ₂)	980,870	700,621
2030	565.68	259,218.84	25%(64,804.7 tCO ₂)	1,296,094	925,781

Tabla 19. Proyección de energía, CO₂e y cantidad de ABP necesarios para datos de mayor densidad.

Fuente: Elaborado por el autor

VII. Conclusiones

La metodología propuesta en este trabajo representa una herramienta de análisis para justificar a la aerogeneración de baja potencia como una opción de generación de energía en la ciudad de Mexicali, B.C., tanto por las características del viento, como por la demanda eléctrica de la localidad.

El uso de minieólica puede satisfacer parte de las necesidades energéticas y al mismo tiempo contribuir en la reducción de emisiones de CO₂. Por otra parte, debido a que los datos horarios representan el comportamiento promedio del viento cada hora, se puede aseverar que la energía calculada es una subestimación del valor real, lo cual conlleva a tener valores inexactos. Al considerar la variabilidad de la velocidad de viento a corto plazo, resultados preliminares indican que la energía estimada aumenta conforme la frecuencia de los datos es mayor, lo cual es de suma importancia al momento de calcular la cantidad de energía que se puede generar.

Por lo tanto, la minieólica puede ser una estrategia sustentable de generación de energía eléctrica y ser considerada como parte de las acciones para contribuir con la reducir de las emisiones de CO₂ en Mexicali y con ello ayudar a alcanzar los compromisos que México estableció.

Referencias

- Asociación de Empresas de Energías Renovables, APPA. (2009). ¿Qué es la energía minieólica? Recuperado de http://www.appa.es/12minieolica/12que_es.php
- Centros CONACYT. (2016). *Radiografía de la energía en Baja California*. Recuperado de <https://centrosconacyt.mx/objeto/energiabc/>
- CONAPO. (2017). Consejo Nacional de Población Proyecciones de la población 2010-2050. Recuperado October 13, 2017, from <http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones>
- Consejo Nacional de Población, CONAPO. (2017). Proyecciones de la población 2010-2050. Recuperado de <http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones>
- Danish Wind Industry Association. (2003). La potencia del viento. Recuperado de <http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpowerweb/es/tour/wres/enrspeed.htm>
- Datta, D., & Datta, D. (2013). Comparison of Weibull Distribution and Exponentiated Weibull Distribution Based Estimation of Mean and Variance of Wind Data. *International Journal of Energy, Information and Communications*, 4(4), 1–12.
- Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas, Iea, Eurostat, & Agencia Europea de Medio Ambiente. (2008). *Indicadores energéticos del desarrollo sostenible: directrices y metodologías*. Recuperado de https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1222s_web.pdf
- Enriqueta García. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. (Instituto de Geografía - UNAM, Ed.) (Quinta edición). México: Comisión Nacional para el Estudio de la Biodiversidad. Recuperado de http://www.igeograf.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/geo_siglo21/serie_lib/modific_al_sis.pdf
- Genc, A., Erisoglu, M., Pekgor, A., Oturanc, G., Hepbasli, A., & Ulgen, K. (2005). Estimation of wind power potential using weibull distribution. *Energy Sources*, 27(9), 809–822. <https://doi.org/10.1080/00908310490450647>
- Global Wind Energy Council. (2018). *Global Wind Statistics 2017*. Recuperado de http://gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2017_EN-003_FINAL.pdf
- Gobierno del estado de Baja California. (2015). Nuestro Estado -Mexicali. Recuperado de http://www.bajacalifornia.gob.mx/portal/nuestro_estado/municipios/mexicali/mexicali.jsp
- González, M. (2009). La generación eléctrica a partir de combustibles fósiles. *Divulgacion*, 2, 143–151.

- IEA. (2016). *World Energy Outlook 2016*. International Energy Agency: Paris, France.
Recuperado de
https://doi.org/http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEB_WorldEnergyOutlook2015ExecutiveSummaryEnglishFinal.pdf
- Indhumathy, D., Sessaiah, C. V, & Sukkiramathi, K. (2014). Estimation of Weibull Parameters for Wind speed calculation at Kanyakumari in India. *International Journal of Innovative Research in Science*, 3(1), 8340–8345. Recuperado de
http://www.ijirset.com/upload/2014/january/33_Estimation.pdf
- International Energy Agency. (2017). *Key world energy statistics*.
- IPCC. (2014). Cambio Climático 2014: Informe de síntesis / Resumen para responsables de políticas. Cambio Climático 2001: Informe de Síntesis, 2–38. Recuperado de
https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM_es.pdf
- Maria, A., & Christian, K. (2016). *World Energy Resources Wind | 2016*. World Energy Council. Retrieved from https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources_Wind_2016.pdf
- Maria, A., & Christian, K. (2016). *World Energy Resources Wind | 2016*. World Energy Council. Retrieved from https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources_Wind_2016.pdf
- Muñoz, G., Diaz, E., Campbell, H., & Quintero, M. (2012). *Baja California: Perfil Energético 2010-2020 Propuesta y Análisis de Indicadores Energéticos para el Desarrollo de Prospectivas Estatales* (Primera ed). Mexicali, Baja California.
- Naciones Unidas. (1998). Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Protocolo de Kioto, 61702, 20. Recuperado de
<http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- Pérez G. (n.d.). Influencia humana en el ciclo del carbono. Recuperado de
https://www.ciclodelfcarbono.com/influencia_humana_en_el_ciclo_del_carbono
- Pitteloud, J.-D., & Gsänger, S. (2017) *Small Wind World Report Summary*. Recuperado de
http://www.wwindea.org/wp-content/uploads/filebase/small_wind_/SWWR2017-SUMMARY.pdf
- Prats, D. A., García, R. A., & García, F. G. (2010). Coste del kWh eólico generado en Cuba, a partir de datos de viento de una región de buenos potenciales eólicos Cost of the kW h generated with wind energy in Cuba, analyzing the data of wind of a region of good potentials. *Ingeniería Mecánica*, 13(3), 38–45.

- Red de políticas en energía renovable para el siglo 21, REN21 (2016). Energías renovables 2016, reporte de la situación mundial. Recuperado de http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_KeyFindings_SPANISH.pdf
- República, G. de la. (2015). *Compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático para el periodo 2020-2030*. Recuperado de http://www.senado.gob.mx/comisiones/cambio_climatico/reu/docs/presentacion_290415.pdf
- Rico, J. (2013). Comparación de métodos para determinar los parámetros de Weibull para la generación de energía eólica. *Scientia et Technica*. Recuperado de <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/7823>
- Rodríguez, L. B., Arcos, E. V., Álvarez, L. A. M., Aguilar, J. S. R., Bueno, M. A. R., Álvarez, S. G., ... González, F. C. (2017). Reporte de Avance de Energías Limpias Primer Semestre 2017. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/279723/Informe_Renovables_2017_1112_2017.pdf
- Secretaría de Energía, SENER. (2016). Prospectiva de Energías Renovables 2016-2030. *Diario Oficial de La Federación*, 1, 156. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62954/Prospectiva_de_Energias_Renovables_2012-2026.pdf
- Secretaría de Energía. SENER. (2016). Estadísticas del Sector Eléctrico e Indicadores de CFE | Gobierno | gob.mx. Recuperado de <https://www.gob.mx/sener/acciones-y-programas/estadisticas-del-sector-electrico-e-indicadores-de-cfe>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT. (2017). Registro Nacional de Emisiones (RENE) | Gobierno | gob.mx. Recuperado de <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/registro-nacional-de-emisiones-rene>
- Semarnat (2015). *Aviso para el reporte del Registro Nacional de Emisiones*.
- Serrano Rico, J. C. (2013). Comparación de métodos para determinar los parámetros de Weibull para la generación de energía eólica. *Scientia et Technica*, 18(2), 315–320. Recuperado de <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/7823>
- UNFCCC. Conferencia de las partes (COP21, 2015). Paris Climate Change Conference- November 2015, COP 21. *Adoption of the Paris Agreement. Proposal by the President.*, 21932(December), 32. <https://doi.org/FC/CC/CP/2015/L.9/Rev.1>
- Zamora, M. (2011). *Elaboración de un sistema de información geográfica del potencial eólico en Baja California*. (Tesis de maestría). Instituto de Ingeniería UABC, Mexicali Baja California.