



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

**Facultad de Ingeniería Mecánica**

**Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica**

Tesis:

**“Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, utilizando WRF”**

Para obtener el grado de:

**Maestra en Ciencias en Ingeniería Mecánica**

Presenta:

**Itzagueri García Rodríguez**

Asesor:

**Dr. Erasmo Cadenas Calderón**

Co-asesor:

**Dr. Luis Béjar Gómez**

Morelia, Michoacán, mayo de 2022.

# Agradecimientos

Mi profundo agradecimiento a mi Asesor el Dr. Erasmo Cadenas Calderón que con su paciencia y enseñanzas compartidas me guio durante este tiempo de aprendizaje.

A mi Comité Evaluador por sus consejos y aportaciones para la mejora del desarrollo de este proyecto.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada que fue mi sustento durante este tiempo de desarrollo profesional.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica que me ha abierto sus puertas para mi crecimiento laboral y profesional.

A mi querida Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo destacada a nivel nacional e internacional por su trayectoria y calidad educativa de la cual me siento orgullosa.

# Dedicatorias

A mis amados padres quienes me han acompañado a lo largo de mi vida dándome su apoyo y amor incondicional.

A mis queridos hermanos que siempre me han deseado lo mejor para mi vida y mi desarrollo profesional.

De manera muy especial a mi hermosa y amada familia, esposo e hijos, quienes tuvieron comprensión y paciencia en todo momento, y que fueron mi motivación para comenzar y concluir tan maravilloso proyecto.

Agradezco a Dios por la serenidad que me da en momentos difíciles, la sabiduría en momentos de duda y el valor para seguir adelante hasta alcanzar mis metas.

# Resumen

Las mejoras en nivel de vida y el desarrollo de las sociedades industrializadas ha traído consigo un deterioro del planeta ocasionando el desequilibrio de los ecosistemas con diversas formas de contaminación y problemas ambientales. La quema de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica es una de las tantas formas de contaminación al medio ambiente, para ello algunos países han firmado acuerdos como el Protocolo de Kioto o el Acuerdo de París estableciendo medidas para alcanzar objetivos que coadyuven al cuidado del planeta. Derivado de estos acuerdos México generó algunas reformas con lo que permitió la entrada de particulares para la generación de energía eléctrica, una de ellas por medio de energías renovables como el viento. Estas nuevas tecnologías trajeron consigo problemáticas para la inyección de energía al Sistema Eléctrico Nacional por la alta variabilidad de estas formas de generación, en consecuencia, se establecieron reglamentos para los participantes como generadores en el Mercado Eléctrico Mayorista haciéndolos cumplir con requerimientos como el pronóstico de generación. Al día de hoy se propone hacer una reforma que permita una transición energética paulatina y ordenada. Por ello el desarrollo de investigaciones que promuevan y ayuden a la penetración de las energías renovables variables al Sistema Eléctrico Nacional son de suma importancia dada la alta problemática que representa que estas energías renovables en especial la solar y la eólica sean pronosticadas. En este proyecto de investigación se configuró un modelo de pronóstico a corto plazo con Weather Research and Forecasting (WRF) para un parque eólico propuesto en Tepuxtepec en el municipio de Contepec Michoacán para contar con una herramienta para el pronóstico de generación, dada la gran necesidad de una transición energética que no afecte al Sistema Eléctrico en nuestro país.

**Palabras clave**—Energías Renovables Variables, Modelación numérica, Predicción a corto plazo, Velocidad del Viento, WRF.

# Abstract

Improvements in living standards and the development of industrialized societies have brought with them a deterioration of the planet, causing the imbalance of ecosystems with various forms of pollution and environmental problems. The burning of fossil fuels for the generation of electricity is one of many forms of environmental pollution, for this some countries have signed agreements such as the Kyoto Protocol or the Paris Agreement establishing measures to achieve objectives that contribute to the care of the planet environment. As a result of these agreements, Mexico generated some reforms that allowed the entry of individuals for the generation of electrical energy, one of them through renewable energies such as wind. These new technologies brought with them problems for the injection of energy into the National Electric System due to the high variability of these forms of generation, consequently, regulations were established for the participants as generators in the Wholesale Electricity Market, making them comply with requirements such as the generation forecast. Today, it is proposed to make a reform that allows a gradual and orderly energy transition. For this reason, the development of research that promotes and helps the penetration of variable renewable energies into the National Electric System is of the utmost importance given the high problem that these renewable energies, especially solar and wind, are predicted. In this research project, a short-term forecast model was configured with Weather Research and Forecasting (WRF) for a proposed wind farm in Tepuxtepec in the municipality of Contepec Michoacán to have one more tool for generation forecasting, given the great need for an energy transition that does not affect the Electric System in our country.

## Índice General

Agradecimientos .....	i
Dedicatorias .....	ii
Resumen .....	iii
Abstract.....	iv
Índice de Tablas.....	ix
Índice de Figuras .....	x
Glosario.....	xiii
Nomenclatura .....	xvii
1. Introducción.....	1
1.1 Estado del arte .....	3
1.2 Planteamiento del problema.....	4
1.3 Justificación .....	6
1.4 Hipótesis.....	7
1.5 Objetivos.....	7
1.5.1 Objetivo General .....	7
1.5.2 Objetivos Específicos .....	7
2. Energía Eólica .....	9
2.1 Energía Eólica en el Mundo.....	9
2.2 Energía Eólica en México .....	10
2.3 Inclusión de Energías Renovables .....	11

2.4	Energía Eólica .....	12
2.5	Conceptos generales relacionados con los patrones de circulación atmosféricos 13	
2.6	Energía cinética del viento .....	14
2.6.1	Aparatos de Medición de la Velocidad del Viento .....	15
2.6.1.1	Anemómetros de copa.....	15
2.6.1.2	Anemómetros de hélice.....	16
2.7	Efecto del terreno en las características del viento .....	16
2.7.1	Clasificación del terreno.....	17
2.7.2	Variaciones de la velocidad del viento con la altura .....	17
2.7.3	Ley del Perfil Logarítmico .....	18
2.7.4	Ley Exponencial de Hellmann.....	19
2.7.5	Valores de $\beta$ y $z_0$ para distintos terrenos .....	19
2.8	Potencial Eólico.....	20
2.8.1	Densidad y presión atmosférica .....	21
2.9	Aerogeneradores .....	21
2.9.1	Rotores de Eje Vertical.....	23
2.9.2	Rotores de Eje Horizontal .....	24
2.10	Parques Eólicos: generalidades .....	25
2.10.1	Aerogeneradores y la producción de energía eléctrica .....	26
3.	Pronóstico de Generación Eólica .....	28
3.1.	Introducción de las ERv al Sistema Eléctrico Nacional .....	28

3.1.1	Pronóstico de la Potencia Eólica .....	29
3.2	Clasificación según horizonte de Pronóstico.....	29
3.3	Tipos de pronósticos según su metodología .....	30
3.3.1	Pronóstico de persistencia .....	30
3.3.2	Pronóstico Análogo.....	31
3.3.3	Modelo numérico de predicción meteorológica.....	31
3.3.4	Pronóstico físico .....	33
3.3.5	Pronóstico estadístico .....	33
3.3.6	Pronóstico de energía usando Dinámica de Fluidos Computacional .....	34
3.4	Tipos de pronósticos según el agente que los genera .....	34
3.5	Error de pronóstico .....	35
3.5.1	Error medio absoluto (MAE).....	35
3.5.2	Raíz cuadrada del error cuadrado medio (RMSE).....	35
3.6	Intervalos de Predicción.....	36
4.	El Modelo WRF; PCP en Tepuxtepec, Michoacán.....	38
4.1	Predicción Numérica del Tiempo .....	38
4.2	Modelos de Mesoescala.....	38
4.3	Modelo WRF .....	39
4.3.1	WPS.....	41
4.3.2	Solucionador WRF-ARW .....	42
4.3.3	ARWpost.....	42
4.3.4	GrADS.....	43

4.4	Sitio de estudio y sus características.....	43
4.4.1	Características del terreno .....	44
4.4.2	Registro de Velocidades de Viento del lugar.....	44
4.5	Periodo y fechas de simulación.....	46
4.6	Configuración del Modelo (WRF).....	47
4.6.1	Opciones Físicas .....	49
5.	Resultados .....	51
5.1	Modelo para el cálculo de la velocidad el viento.....	51
5.2	Velocidades del viento.....	53
5.3	Estimación del Potencial Eólico.....	54
6.	Conclusiones y Recomendaciones.....	80
6.1	Conclusiones .....	80
6.2	Recomendaciones .....	81
	Apéndice 1.....	82
	Apéndice 2.....	84
	Publicaciones .....	86
	Cartel para Congreso .....	86
	Artículo para Academia Journals.....	88
	Referencias .....	95

## Índice de Tablas

<b>Tabla 2.1. Valores de <math>\beta</math> y <math>z_0</math> para distintos terrenos.....</b>	<b>20</b>
<b>Tabla 3.1. Clasificación del Pronóstico según su Horizonte.....</b>	<b>30</b>
<b>Tabla 4.1. Fechas seleccionadas para las corridas.....</b>	<b>48</b>
<b>Tabla 4.2. Configuración del Modelo WRF.....</b>	<b>50</b>
<b>Tabla 5.1. Medidas estadísticas del error de pronóstico de los Modelos.....</b>	<b>53</b>
<b>Tabla 5.6. Especificaciones Técnicas del Aerogenerador Siemens.....</b>	<b>54</b>

## Índice de Figuras

Figura 2.1. Rankin de Países por potencia Terrestre Acumulada (2020).....	13
Figura 2.2. Mapa de Parques Eólicos Instalados en México hasta 2021.....	14
Figura 2.3. Capacidad total instalada de energía eólica en México en 2020.....	15
Figura 2.4. Circulación Atmosférica General.....	17
Figura 2.5. Efecto de la fuerza de Coriolis en la Circulación Atmosférica General.....	18
Figura 2.6. Capa Límite Atmosférica.....	22
Figura 2.7. Aerogenerador de Eje Vertical tipo Darrieus.....	28
Figura 2.8. Góndola de una turbina de eje horizontal con algunos de sus componentes.....	29
Figura 3.1 Diagrama de Bloques del Proceso del Pronóstico de Persistencia.....	34
Figura 3.2. Diagrama de Bloques del Proceso del Pronóstico de Análogo.....	35
Figura 3.3. Imagen de representación de tres Dominios para el Modelo WRF.....	36
Figura 3.4. Diagrama de Bloques del Proceso del Pronóstico Físico.....	37
Figura 3.5. Intervalos de Predicción para el Pronóstico de Potencia.....	40
Figura 4.1. Diagrama de flujo del modelo ARW.....	43
Figura 4.2. Diagrama de flujo condensado del modelo WRF utilizado para la investigación.....	44
Figura 4.3. Imagen de los resultados obtenidos por WFR visualizados en GrADS.....	46
Figura 4.4. Foto del sitio propuesto para el emplazamiento Eólico en Tepuxtepec.....	47
Figura 4.5. Estación Meteorológica Automática Tepuxtepec.....	48
Figura 4.6. Estación Meteorológica Automática Presa de Tepuxtepec.....	49
Figura 4.7. Dominio de la Simulación.....	51

Figura 4.8. Configuración de inicio para WPS.....	51
Figura 5.1. Series de las velocidades de viento de los datos de la estación y los Modelos.....	55
Figura 5.2. Curva de Potencia del Aerogenerador Siemen-swt-2.3-113.....	55
Figura 5.3. Generación de energía eólica 26-mar-2019.....	58
Figura 5.4. Generación de energía eólica 27-mar-2019.....	58
Figura 5.5. Generación de energía eólica 9-abr-2019.....	58
Figura 5.6. Generación de energía eólica 10-abr-2019.....	58
Figura 5.7. Generación de energía eólica 8-may-2019.....	59
Figura 5.8. Generación de energía eólica 9-may-2019.....	59
Figura 5.9. Generación de energía eólica 28-jun-2019.....	59
Figura 5.10. Generación de energía eólica 29-jun-2019.....	59
Figura 5.11. Generación de energía eólica 5-jul-2019.....	60
Figura 5.12. Generación de energía eólica 6-jul-2019.....	60
Figura 5.13. Generación de energía eólica 19-ago-2019.....	60
Figura 5.14. Generación de energía eólica 20-ago-2019.....	60
Figura 5.15. Generación de energía eólica 20-sep-2019.....	61
Figura 5.16. Generación de energía eólica 21-sep-2019.....	61
Figura 5.17. Generación de energía eólica 15-oct-2019.....	61
Figura 5.18. Generación de energía eólica 16-oct-2019.....	61
Figura 5.19. Generación de energía eólica 7-nov-2019.....	62
Figura 5.20. Generación de energía eólica 8-nov-2019.....	62
Figura 5.21. Generación de energía eólica 6-dic-2019.....	62
Figura 5.22. Generación de energía eólica 7-dic-2019.....	62
Figura 5.23. Generación de energía eólica 18-ene-2020.....	63
Figura 5.24. Generación de energía eólica 19-ene-2020.....	63
Figura 5.25. Generación de energía eólica 4-feb-2020.....	63

**Figura 5.26. Generación de energía eólica 5-feb-2020.....63**

## Glosario

**Capacidad instalada de energía eólica.** Máxima potencia de las centrales eólicas en Megawatts.

**Centro Nacional de Energía (CENACE).** El CENACE es un Organismo Público Descentralizado de la Administración Pública Federal, con personalidad jurídica y patrimonio propios, cuyo Decreto de creación se publicó el 28 de agosto de 2014 en el DOF; tiene por objeto ejercer el Control Operativo del Sistema Eléctrico Nacional; la operación del Mercado Eléctrico Mayorista y garantizar el acceso abierto y no indebidamente discriminatorio a la Red Nacional de Transmisión y a las Redes Generales de Distribución.

**Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR).** Es un centro de investigación y desarrollo de Estados Unidos, los estudios en los que se centra la NCAR son la meteorología y climatología, química atmosférica, interacciones solares-terrestres e impactos ambientales y sociales.

**Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP).** Institución encargada de la orientación, pronósticos, advertencias y análisis sobre el agua y el clima a nivel nacional y mundial para los socios y comunidades de usuarios externos. Estos centros forman parte del Servicio Meteorológico Nacional de los Estados Unidos.

**Curva de Potencia de un Aerogenerador.** La curva de potencia de un aerogenerador es un gráfico que indica cuál será la potencia eléctrica disponible en el aerogenerador a diferentes velocidades del viento. Las curvas de potencia están basadas en medidas realizadas en zonas de baja intensidad de turbulencias, y con el viento viniendo directamente hacia la parte delantera de la turbina.

**Datos Meteorológicos de Reanálisis.** Los datos de reanálisis meteorológicos se producen a partir de la combinación de datos de medición, observación, simulación y aplicando técnicas de asimilación de datos, para obtener la descripción más realista de las ocurrencias climáticas. Estos conjuntos de datos sólo están disponibles para períodos históricos.

**Dominio.** Superficie sobre el plano horizontal de la tierra seleccionada para su estudio y simulación en el modelo WRF.

**Energías Renovables Variables (ERv).** Son las energía solar y eólica denominadas ERv por su alta variabilidad.

**Fuerzas de Coriolis.** El Efecto Coriolis también llamada Fuerza de Coriolis es la desviación de un objeto cuando se mueve en línea recta sobre un sistema que está moviéndose en rotación o giro. Es un fenómeno que afecta a los patrones climáticos, el viento no se desplaza en línea recta de norte a sur sino que, con el movimiento, las masas de aire giran hacia la derecha en el Hemisferio Norte y hacia la izquierda en el Hemisferio Sur.

**Límite de Betz.** Es la ley que dice que sólo puede convertirse menos de  $16/27$  (el 59 %) de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador.

La ley de Betz fue formulada por primera vez por el físico alemán Albert Betz en 1919. Su libro "Wind-Energie", publicado en 1926, proporciona buena parte del conocimiento que en ese momento se tenía sobre energía eólica y aerogeneradores.

**Mercado Eléctrico Mayorista (MEM).** El MEM es un mercado operado por el CENACE en el que los participantes podrán vender y comprar energía eléctrica, Potencia,

Certificados de Energías Limpias, Servicios Conexos, y cualquier otro Producto Asociado que se requiera para el funcionamiento del Sistema Eléctrico Nacional.

**Mesoescala.** La mesoescala en Meteorología es el estudio de sistemas del tiempo atmosférico más pequeños que la escala sinóptica meteorológica, pero más grandes que la microescala y la escala de tormenta de los sistemas de nubes cúmulos. Sus dimensiones horizontales generalmente oscilan de cerca de 9 km a varios centenares de km. Ejemplos de sistemas de mesoescala meteorológica son las brisas de mar, complejos mesoescalas convectivos, etc. La mesoescala meteorológica se divide en estas subclases (Orlanski, 1975):

**Meso-gamma 2-20 km (3 a 30 minutos);** La mayoría de las tormentas, los cúmulos grandes, tornados muy grandes (al filo de la microescala, también conocida como escala de tormenta).

**Meso-beta 20-200 km (30 minutos a 6 horas);** Campos de vientos locales, vientos de montaña, brisas de tierra/mar, complejos convectivos de mesoescala (CCM), tormentas grandes.

**Meso-alfa frentes de 200-2000 km (6 horas a 2 días);** Corrientes en chorro, huracanes pequeños, anticiclones débiles, sistemas convectivos en mesoescala (MCS), ciclones tropicales al filo de la escala sinóptica.

**Nido.** Superficie menor dentro del dominio principal de la simulación.

**Perfil Vertical de la Velocidad del Viento.** Es la representación de la velocidad del viento que tiende a incrementarse a medida que asciende, en la que la superficie terrestre ejerce una acción de fricción o de retardo sobre la velocidad el viento.

**Predicción Numérica del Tiempo (PNT).** Son modelos físico-matemáticos que se utilizan para predecir el estado futuro de la atmósfera partiendo del estado actual, se estiman por medio de las observaciones atmosféricas y un proceso conocido como asimilación de datos.

## Nomenclatura

- A** Área de barrido del rotor.
- $\beta$  Exponente que representa una forma de medida del rozamiento superficial encontrado por el viento en la ley Exponencial de Hellmann.
- CA** La corriente alterna (CA) es un tipo de corriente eléctrica que cambia a lo largo del tiempo. La variación puede ser en intensidad de corriente o en sentido a intervalos regulares.
- CC** La corriente continua se refiere al flujo continuo de carga eléctrica a través de un conductor entre dos puntos de distinto potencial y carga eléctrica, que no cambia de sentido con el tiempo.
- $e_t$  Error de pronóstico.
- H** Altura de la velocidad a estimar en la ley del Perfil Logarítmico del Viento y la ley Exponencial de Hellmann.
- Ho** Altura de la velocidad conocida en la ley del Perfil Logarítmico del Viento y la ley Exponencial de Hellmann.
- $\dot{m}$  Caudal másico del aire.
- mbar** Unidades de medida de la Presión atmosférica, abreviatura de milibares.
- MW** Megawatts.
- $\rho$  Densidad en  $\text{kg/m}^3$ .
- p** Presión en kPa.
- P** Potencia en MW.
- R** Constante universal de los gases ideales.
- T** Temperatura en grados Kelvin.
- $u_0$  Velocidad no perturbada del viento.

- V** Velocidad del viento a estimar en la ley del Perfil Logarítmico del Viento y la ley Exponencial de Hellmann.
- Vo** Velocidad conocida en la ley del Perfil Logarítmico del Viento y la ley Exponencial de Hellmann.
- W** Watts
- z<sub>0</sub>** Coeficiente de rugosidad del terreno utilizado en la ley del Perfil Logarítmico.
- z** Coeficiente que determina el ancho y la probabilidad de la predicción en la fórmula de Intervalos de Predicción.
- z** Elevación en metros en la fórmula del cálculo de presión.
- %** Porcentaje.

# Capítulo 1

## 1. Introducción

Para 2020, la capacidad acumulada de energía eólica instalada en el mundo fue de casi 743 GW, mostrando un crecimiento del 53% con respecto a 2019, instalando más de 93 GW de energía en el último año. China con el mercado más grande de energía eólica instalada, tiene una capacidad de más de 237 GW, seguida de Estados Unidos con 96.4 GW y Alemania con 59.3 GW, que la posiciona como el país con capacidad de energía eólica instalada más alta de Europa [1].

La India, España, Reino Unido, Francia, Canadá y Brasil se encuentran también dentro de la lista de los diez principales países del mundo con capacidad instalada de energía eólica. En América Latina Brasil, México, Argentina, Chile y Colombia se considera que serán los principales contribuyentes del aumento en la capacidad de energía eólica instalada. Para 2021, se espera que la capacidad de generación de energía eólica instalada acumulada en el mundo, alcance los 817 GW según el Consejo Global de Energía Eólica [1].

Actualmente, México tiene una capacidad total instalada de 86 GW, de los cuales aproximadamente 13 GW son centrales de Energías Renovables Variables (ERv). Del total de ERv, el 55% corresponde a energía eólica y el 45% a energía solar fotovoltaica [2]. La reforma energética de 2013 realizada en México, los compromisos contraídos por el país respecto del Acuerdo de París y el decrecimiento en el precio de las tecnologías para

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

aprovechar estos recursos, entre otros factores, han permitido un aumento significativo en la participación de las ERv para la generación de energía eléctrica en nuestro país.

En México, el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), es el operador independiente del sistema eléctrico mexicano que se encarga de la operación del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM), mercado horario en el que los parques eólicos tienen la responsabilidad de entregar el pronóstico de la potencia generada por cada unidad de generación de ERv para prever su participación en la generación de energía eléctrica [3].

Tepuxtepec, Michoacán, sitio de estudio para esta investigación, tiene un potencial eólico aprovechable en el que, de acuerdo con un estudio previo [30], tiene una velocidad promedio anual del viento de 5.7 m/s (a una altura de 99.5 metros) y es posible instalar una central eólica. Por lo anterior se plantea en este proyecto la conformación de un modelo de mesoescala destinado a pronosticar la velocidad del viento que permita tener una estimación de la potencia de un campo eólico en Tepuxtepec, Michoacán. El modelo se generará con el software de plataforma libre, denominado en inglés Weather Research and Forecasting (WRF).

Para esta investigación se generarán pronósticos mediante el uso de técnicas de mesoescala para pronosticar la velocidad del viento y estimar la potencia de un parque eólico en Tepuxtepec Michoacán.

El presente trabajo de investigación está estructurado en seis capítulos. El Capítulo 1 contiene la metodología y los objetivos a alcanzar, así como los argumentos para la realización de este proyecto.

En el Capítulo 2 se describe brevemente el desarrollo de la penetración de las ERv en el sector Eléctrico en el Mundo y en México, y se realiza una revisión teórica referente a la Energía Eólica y su aprovechamiento.

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

El Capítulo 3 da una breve introducción a los tipos de pronóstico y sus distintas técnicas, abordando con mayor profundidad el campo de investigación en el que se sitúa esta investigación.

En el Capítulo 4 se describe el software Weather Research and Forecasting (WRF) elegido para llevar a cabo la simulación numérica del tiempo; se da una descripción del funcionamiento del programa y sus características.

El Capítulo 5 detalla la construcción del modelo con las características correspondientes al sitio de estudio, fechas de simulación, la base de datos de Reanálisis; además de la información referente a los registros de velocidades de viento del lugar para comparación con los resultados de la simulación.

Finalmente, en el Capítulo 6 se hizo el análisis de los resultados obtenidos con la simulación de acuerdo a la elección de la muestra de los datos con respecto a las mediciones reales del sitio de estudio. En este Capítulo se hace la comparación de las series de tiempo obtenidas con las simulaciones y las de los datos reales, con la finalidad de hacer un análisis cualitativo; el análisis cuantitativo se hizo con las siguientes métricas de error: Error Medio Absoluto (MAE), Error Cuadrático Medio (MSE) y el Error Cuadrático Medio de la Raíz (RMSE), para evaluar la validez del pronóstico.

## **1.1 Estado del arte**

Haciendo una revisión del estado del arte se hace mención de algunas investigaciones recientes, en las que se han desarrollado un número considerable de modelos de predicción de mesoescala de la velocidad del viento utilizando el modelo WRF con distintas configuraciones del software y que permiten establecer de manera más precisa las condiciones del sitio de estudio, las cuales se describen a continuación|.

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

Roque *et al.* [4] empleando un modelo con WRF pronosticó la velocidad del viento con 30 horas de antelación, con 4 anidamientos, mostrando que los mejores valores pronosticados fueron para el dominio de 1 km de resolución, demostrando la habilidad de WRF para generar pronósticos de viento con alta resolución y confiables para el sitio de estudio.

Cong [5] explica que para mejorar los pronósticos, se han desarrollado diferentes métodos de predicción para ayudar a la integración de la energía eólica en la red. En su estudio se utilizó un método estadístico y un modelo de predicción numérica del tiempo (PNT), en este caso para los modelos WRF se realizaron análisis de distribuciones espaciales de seis características del viento y con el uso de métricas de error de pronóstico.

Businger [6] usó el modelo de Investigación y Pronóstico del tiempo WRF para simular la atmósfera de las Islas Hawaianas. En su estudio evaluó WRF para aplicaciones de energía eólica utilizando datos de observación de estaciones meteorológicas y parques eólicos y encontró que en algunos casos el modelo WRF puede indicar estimaciones de viento favorables para la generación de energía.

El-Samra [7] encontró en su estudio que el modelo WRF capturó la compleja variabilidad espacial y estacional que caracteriza el clima del área de estudio y estableció de manera adecuada las diferencias entre el año húmedo y el año caluroso. Los resultados que proporcionan muestran una medida cuantitativa de los errores potenciales para diversas variables hidrometeorológicas que dan idea de lo aceptable que es o no el Modelo.

Le Roux [8] estableció como los modelos de mesoescala como WRF se pueden utilizar para proporcionar un análisis de alta resolución del tiempo y el clima en regiones con terreno complejo, se encontró que uno de los principales problemas es la gran cantidad de tiempo de cálculo necesario para lograr una reducción de escala fina. Por lo que sugiere también el uso de métodos estadísticos.

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

Zhenhua *et al.* [9] utilizaron en su investigación parámetros que mejoraron el pronóstico de la velocidad del viento a la altura de la turbina usando el modelo WRF, con lo que demostraron que son mejores los pronósticos hechos con parámetros óptimos seleccionados que con los predeterminados en las simulaciones de WRF.

Fernandez *et al.* [10] para este estudio se tomaron los datos de análisis de condiciones iniciales y de contorno del Sistema de Pronóstico Global de los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP-GFS) por considerarlos como uno de los conjuntos de datos más confiables y se compararon con datos del Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos a Medio Plazo (ECMWF), ambos fueron utilizados para la simulación, concluyendo que la mejor configuración depende de la ubicación y las condiciones meteorológicas para lo cual es necesario un análisis de sensibilidad para encontrar la combinación de parametrizaciones físicas que más se adecúen al lugar.

En la mayoría de los artículos mencionados se hace como principal observación que, para que el modelo WRF arroje resultados aceptables en las simulaciones es necesario hacer las configuraciones que se adecúen al sitio de estudio y las condiciones del clima del lugar. Establecen la resolución como un parámetro importante para la configuración del modelo. Por lo que se toma en cuenta para el desarrollo de esta investigación además de otras características que se considerarán durante el desarrollo.

## **1.2 Planteamiento del problema**

La reforma energética de 2013 realizada en México y los compromisos contraídos por el país respecto del Acuerdo de París, el cual contempla un crecimiento sostenido en la implementación de energías limpias (30% para el año 2021, 35% para 2024 y 50% al 2050), ha permitido que las ERv sean una fuente de generación eléctrica importante.

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

Actualmente, la generación con este tipo de energías en México alcanza una capacidad instalada de 86 GW, de las cuales aproximadamente 13 GW son centrales de ERv, y el 55% (aproximadamente 7 GW) de éstas, corresponde a energía eólica [2].

A partir de la implementación de la reforma en el año 2014, el CENACE (Centro Nacional de Control de Energía), exige a los concesionarios que entreguen el pronóstico de la potencia generada por cada unidad de generación de ERv, por lo que ha sido necesario que éstos implementen estrategias para generar modelos para pronosticar.

De acuerdo con la ley, es obligación para los concesionarios disponer de dos tipos de pronósticos, el primero, denominado intermitente-horario, que debe tener un horizonte temporal de siete días y es utilizado para planificar el despacho de energía a mediano plazo; el segundo, denominado intermitente-quinceminutal, el cual debe tener un horizonte de 2.5 horas, utilizado para el despacho de energía a corto plazo [12].

La alta desviación de los pronósticos que se entregan a los sistemas encargados del despacho de energía hacia la red eléctrica en México, ha limitado el aumento de la penetración de la energía eólica en el país. Lo anterior, probablemente se deba a la utilización de modelos para pronosticar obsoletos o poco actualizados (o la ausencia de los mismos), lo cual permite vislumbrar la posibilidad de formar recursos humanos, a través de las Universidades con estas capacidades y ahorrar el recurso financiero que los concesionarios pagan a empresas extranjeras, las cuales en la actualidad se encargan del pronóstico de la potencia de los parques eólicos en México.

Debido a la problemática establecida anteriormente, se plantea el presente proyecto, el cual consiste en la generación de un modelo para pronosticar la velocidad del viento, en Tepuxtepec, Michoacán, sitio en el que existe un potencial eólico aprovechable y de acuerdo con un estudio previo [30], es posible la instalación de una central eólica.

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

El modelo para pronosticar la velocidad del viento, se construirá con el software de plataforma libre, denominado en inglés Weather Research and Forecasting (WRF), el cual es un programa para modelado numérico de la atmósfera, sin embargo, debido al avance en las capacidades de cómputo solo es posible generar modelos con exactitud aceptable.

Finalmente, la velocidad pronosticada por el modelo se convertirá en potencia generada, utilizando la curva de potencia del aerogenerador.

### **1.3 Justificación**

La falta de confianza en los pronósticos provistos por las centrales generadoras ha causado incertidumbre en la operación de los sistemas de distribución. Por ello, los encargados de ambos sistemas han buscado alternativas para lidiar con este problema. Estas alternativas van desde mejorar su propio pronóstico centralizado, hasta contratar la provisión de servicio de pronósticos con un tercero (empresas extranjeras). Lo anterior debido a que en México hay poca investigación y desarrollo en el tema de pronóstico de ERv.

Sabemos que la energía eléctrica, que se puede generar aprovechando el recurso eólico, no puede ser almacenada en grandes cantidades, por lo cual la demanda se debe satisfacer casi de forma instantánea, he aquí la importancia de comprender la necesidad de poder prever la cantidad de viento, y a su vez el pronóstico de la potencia generada. Esta investigación aportará beneficios como demostrar la posibilidad de realizar en México modelos de calidad para pronosticar la velocidad del viento y la potencia generada por una central eólica, así como la formación de recursos humanos capacitados en el pronóstico, lo que redundará en grandes beneficios como coadyuvar en la independencia energética del país.

Gracias a que se cuenta con la infraestructura, se pueden generar modelos confiables que contribuirán a difundir el tema en México y Latinoamérica. Con este proyecto se verán

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

beneficiados: los concesionarios, al contar con otras alternativas para la contratación de la provisión de pronósticos, los estudiantes y profesores interesados en el tema, la Comisión Federal de Electricidad (CFE), que en México es la encargada de controlar, generar, transmitir, distribuir y comercializar energía eléctrica en todo el país, así como el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), que se encarga del control operativo del Sistema Eléctrico Nacional y del acceso a la red nacional de transmisión y a las redes generales de distribución. De lo antes mencionado se infiere que los usuarios de esta investigación son también los beneficiados con la misma, por lo que será de gran utilidad la realización del presente trabajo de investigación.

## **1.4 Hipótesis**

Es posible hacer el pronóstico acorto plazo de la potencia generada por un parque eólico en Tepuxtepec, Michoacán, combinando un modelo numérico de mesoescala generado con el software WRF y las curvas de potencia de la turbina eólica seleccionada.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo General**

Combinar un modelo numérico de mesoescala que pronostique la velocidad del viento con la curva de potencia de la turbina eólica seleccionada, con la finalidad de estimar la potencia de un campo eólico.

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

Realizar revisión Bibliográfica.

Buscar datos de reanálisis y mediciones reales de la velocidad del viento.

Explorar el software WRF para generar el modelo de mesoescala y hacer las simulaciones.

Validar los resultados del pronóstico de la velocidad del viento con los datos reales.

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

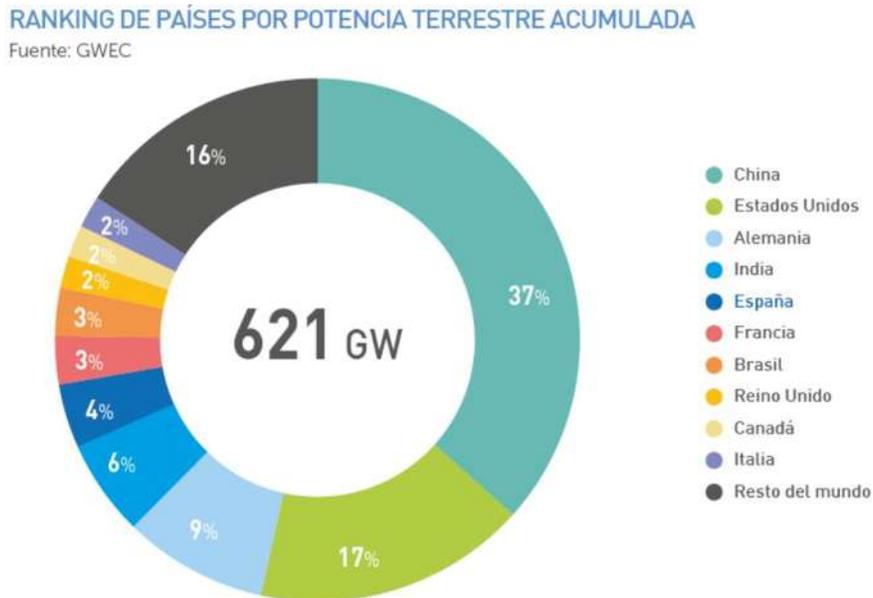
Calcular la Potencia y sus respectivos Intervalos de Predicción.

# Capítulo 2

## 2. Energía Eólica

### 2.1 Energía Eólica en el Mundo

La energía eólica instalada en el mundo creció un 53%, hasta situarse en 743 GW, según datos del Global Wind Energy Council en 2020 [1]. 2020 ha sido, hasta el momento, el mejor año de la historia para la industria eólica mundial con 93 GW de nueva capacidad instalada. China, Estados Unidos, Alemania, India y España son los primeros productores mundiales. En la figura 2.1 se muestra el ranking de países con mayor potencia terrestre acumulada en el mundo imagen tomada de la GWEC.



**Figura 2.1** Rankin de Países por potencia Terrestre Acumulada en 2020 [1].

## 2.2 Energía Eólica en México

Según información de la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE) con datos a marzo de 2021, hay 68 parques en operación en México situados en 14 estados [11], como se muestra en la figura 2.2.

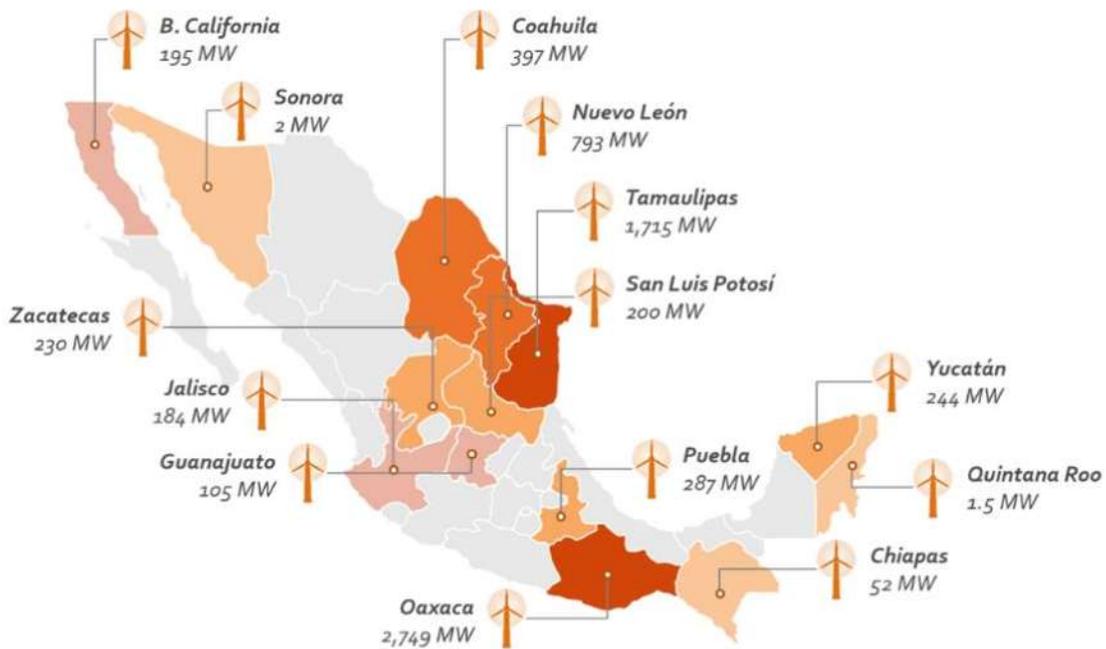


Figura 2.2 Mapa de Parques Eólicos Instalados en México hasta 2021 [11].

“Durante la presentación del Foro México Windpower 2020, se informó que en 2019 se incorporaron a la capacidad instalada más de mil 279 MW, por lo que ya se alcanzó un total de 6,237 MW que ahora pueden ser generados con tecnología eólica, y que representan el ocho por ciento del total nacional.

Dicha cantidad de energía ya representa un incremento de 27.5% en comparación al cierre de 2018. Los proyectos eólicos generadores se encuentran presentes en 14 estados de la República, como es el caso de Oaxaca, Nuevo León, Coahuila, Tamaulipas, Yucatán, Jalisco, San Luis Potosí, Zacatecas, entre otros.



Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

contaminación atmosférica, han despertado un interés cada vez mayor por encontrar nuevas fuentes de energía, las energías renovables.

Cuando se habla de sostenibilidad se hace sólo con referencia exclusivamente a la existencia de depósitos de combustibles fósiles, sin considerar la sostenibilidad desde el punto de vista medioambiental. Por lo tanto, no es seguro que las necesidades energéticas mundiales puedan satisfacerse a partir de la mera combustión de recursos fósiles, dadas las emisiones de gas invernadero y otros contaminantes que van asociadas a dicho proceso, a no ser que se encuentren procesos eficaces de eliminación del CO<sub>2</sub>. Las denominadas energías renovables pueden contribuir a resolver el deterioro del medio ambiente, y al menos parcialmente, las dificultades de abastecimiento que al parecer se presentarán inevitablemente en un futuro no tan lejano [14].

## **2.4 Energía Eólica**

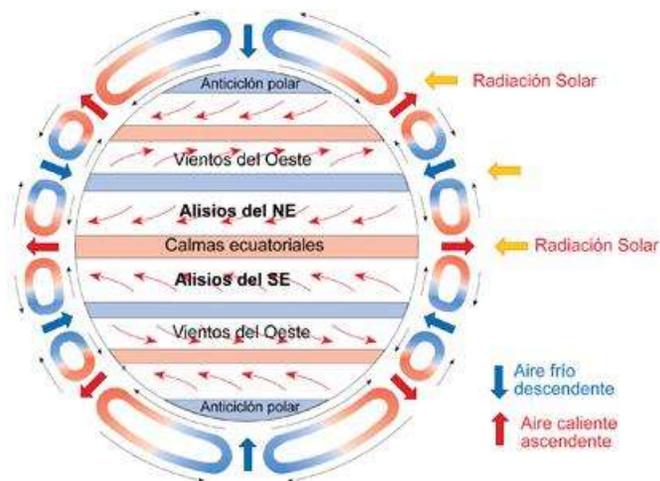
Para el aprovechamiento de la energía eólica se han desarrollado a lo largo de la historia diferentes sistemas tecnológicos. Durante siglos, la aplicación clásica de la energía capturada por las máquinas eólicas ha sido la molienda de grano y el bombeo de agua. Sin embargo, en la actualidad, la aplicación más generalizada de la energía contenida en el viento es la producción de electricidad mediante aerogeneradores que se diseñan, construyen y operan con las tecnologías más avanzadas aprovechando el conocimiento de múltiples disciplinas.

En el sector eléctrico, la generación de electricidad a partir de energía solar fotovoltaica y eólica, también conocidas como energías renovables variables, se ha expandido rápidamente como solución a los problemas ambientales actuales.

## 2.5 Conceptos generales relacionados con los patrones de circulación atmosféricos

Los vientos son movimientos del aire, o corrientes convectivas, que se originan por el calentamiento diferencial producido en distintos puntos geográficos que reciben cantidades distintas de radiación solar, en la figura 2.4 se muestra este calentamiento diferencial en la superficie de la tierra y la circulación atmosférica general.

En los lugares en que se alcanzan mayores temperaturas, debido a que reciben mayor cantidad de radiación, el aire en contacto con la tierra o el mar se calienta más, y, en consecuencia, se expande, su densidad disminuye y se eleva dejando un vacío que es ocupado por masas de aire más frío. Este aire frío proviene de zonas que reciben menor cantidad de radiación solar y alcanzan menores temperaturas, por lo que el aire en contacto con ellas se expande menos y, al tener mayor densidad, se traslada a través de las capas bajas de la atmósfera hasta ocupar el lugar dejado por el aire caliente que asciende [15].

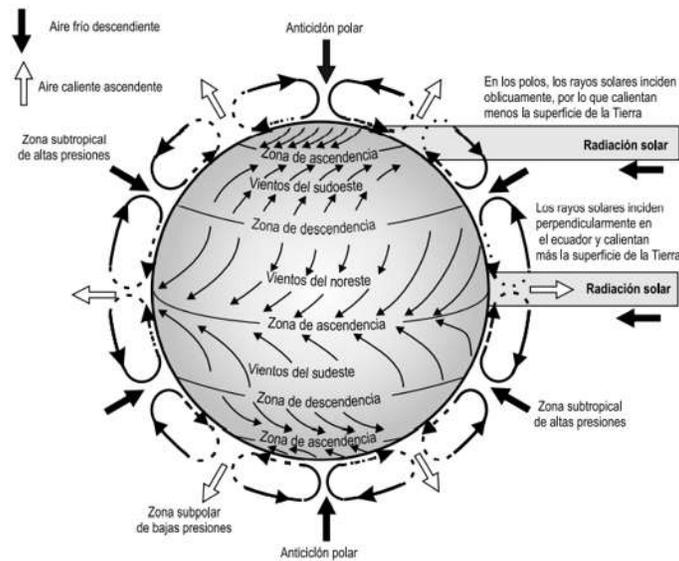


**Figura 2.4** *Circulación Atmosférica General* [16].

Si se tiene en cuenta el movimiento rotacional de la Tierra, el modelo de circulación global del aire sobre la misma se complica. El movimiento de rotación de la Tierra da lugar a la

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

aparición de las fuerzas de Coriolis, las cuales actúan sobre la masa de aire en movimiento desviándola hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur (figura 2.5).



**Figura 2.5** Efecto de la fuerza de Coriolis en la Circulación Atmosférica General [14].

De forma resumida el origen del viento se encuentra en la existencia de masas de aire a diferentes temperaturas, originadas por diferentes intensidades de radiación solar, a nivel global o local, las cuales producen corrientes ascendentes y descendentes, formando anillos de circulación del aire. La energía eólica es, por consiguiente, un pequeño porcentaje de la energía solar incidente sobre el planeta.

## 2.6 Energía cinética del viento

La energía eólica no es más que la energía cinética de una masa de aire en movimiento. La energía cinética que porta el aire al moverse es de alto grado termodinámico, lo que permite su conversión en otras formas de energía con un elevado grado de eficiencia. La energía transportada por el viento se disipa paulatinamente por fricción con el suelo, pero, en latitudes bajas, los vientos aún llevan una energía que es varias decenas de veces

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

el consumo total mundial de energía primaria. Si se descuentan los flujos de aire en puntos inaccesibles, se podría disponer de una cantidad de energía eólica que sería del orden del doble del consumo mundial.

### **2.6.1 Aparatos de Medición de la Velocidad del Viento**

Sería de gran ayuda tener datos meteorológicos perfectamente confiables, en nuestro caso datos de velocidad del viento para la ubicación de interés. Sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones de energía eólica, dicha información no está disponible, o es poco confiable ya que los aparatos de medición no son monitoreados para asegurar su operación en condiciones óptimas [15].

Las aplicaciones de energía eólica utilizan los siguientes tipos de sensores meteorológicos para poder llevar a cabo un estudio del sitio de interés:

- . Anemómetros para medir la velocidad del viento;
- . Veletas para medir la dirección del viento;
- . Termómetros para medir la temperatura ambiente del aire;
- . Barómetros para medir la presión del aire.

Existen varios dispositivos para medir la velocidad del viento, Anemómetros de Copas, Anemómetros de Hélice, Sensores Láser Doppler (LIDAR), Sensores Acústicos Doppler (SODAR).

#### **2.6.1.1 Anemómetros de copa**

El anemómetro de copa es probablemente el instrumento más común para medir la velocidad del viento [15]. Los anemómetros de copa utilizan la rotación, que varía en proporción a la velocidad del viento. Los diseños más comunes de hoy incluyen tres tazas montadas en un eje pequeño. La velocidad de rotación de las copas se puede medir mediante:

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

- . Contadores mecánicos que registran el número de rotaciones;
- . Cambios de voltaje eléctricos o electrónicos (CA o CC);
- . Un interruptor fotoeléctrico.

Los anemómetros de tipo mecánico indican el flujo del viento a distancia. La velocidad media del viento se obtiene dividiendo el flujo de viento por el tiempo (este tipo también se llama anemómetro de carrera de viento). Para sitios remotos, este tipo de anemómetro tiene la ventaja de no requerir una fuente de energía. Los valores de precisión típicos (basados en pruebas en túnel de viento) para los anemómetros de copas son alrededor del  $\pm 2\%$ .

### **2.6.1.2 Anemómetros de hélice**

Los anemómetros de hélice utilizan el viento que sopla en una hélice para hacer girar un eje que impulsa un Generador de CA o CC (más común), o un interruptor de luz para producir una señal de pulso. Los diseños utilizados para aplicaciones de energía eólica tienen una respuesta rápida y se comportan linealmente en las velocidades cambiantes del viento. En una configuración horizontal típica, la hélice se mantiene de cara al viento mediante una paleta de cola, que también se puede utilizar como indicador de dirección [15].

La precisión de este diseño es de aproximadamente el 2%, similar al anemómetro de copa. La hélice suele estar hecha de espuma de poliestireno o polipropileno. Los problemas de fiabilidad de los anemómetros de hélice son similares a los discutidos para anemómetros de copa.

## **2.7 Efecto del terreno en las características del viento**

La velocidad del viento se ve afectada por distintos factores ya sean naturales o artificiales. Un ejemplo de los primeros son la orografía del terreno, la temperatura, la

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

vegetación natural, los cultivos, las estaciones del año; los otros factores son las construcciones y obstáculos permanentes y temporales, tales como los edificios, casas, cercas, chimeneas [17].

Los obstáculos perturban el régimen laminar del viento, sobre todo en las capas más bajas. El viento al encontrarse con un obstáculo se desvía vertical y horizontalmente. Experimentalmente, se ha comprobado que a alturas alrededor de un kilómetro sobre la superficie terrestre esta influye muy poco sobre el viento, en cambio, en las capas más bajas de la atmósfera las velocidades de viento se ven afectadas por la fricción con la superficie terrestre.

### **2.7.1 Clasificación del terreno**

La intensidad del viento está influenciada por el relieve del terreno. El perfil de variación de los vientos con la altura puede cambiar sustancialmente su forma dependiendo del tipo de terreno. La velocidad del viento puede incrementarse o pueden generarse turbulencias que den lugar al cambio de sentido de la velocidad del viento, estas turbulencias pueden incluso causar la fatiga de las palas de las turbinas eólicas [18]. Los relieves más beneficiosos corresponden a perfiles redondeados con pendientes suaves, los cuales tienen un efecto acelerador sobre la velocidad del viento. Los perfiles más desfavorables corresponden a relieves bruscos con pendientes mayores de  $30^\circ$ , las fuertes pendientes son zonas que propician la generación de turbulencias que dañan a los aerogeneradores y reducen la energía capturada por los mismos.

### **2.7.2 Variaciones de la velocidad del viento con la altura**

Uno de los fenómenos más significativos en la explotación de la energía eólica es el incremento de la velocidad media del viento con la altura (figura 2.6).

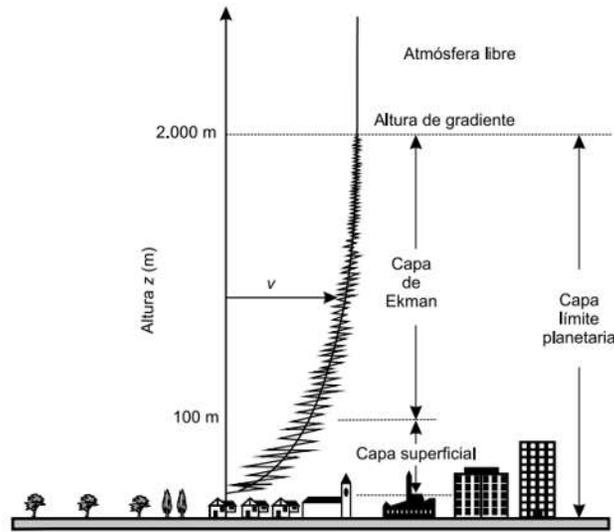


Figura 2.6 Capa Límite Atmosférica [14].

Debido a la fricción de la masa de aire que fluye sobre la superficie de la Tierra, la velocidad del viento disminuye desde un valor no perturbado a gran altura, llamada altura de gradiente y típicamente alrededor de 2,000 m, hasta la superficie del suelo. La capa límite planetaria puede considerarse que consiste en un número de capas, cada una gobernada por un conjunto diferente de parámetros de flujo. La capa límite superficial, que se extiende desde el suelo hasta una altura aproximada de 100 m, es la región donde van a quedar instaladas las turbinas eólicas [18].

Dos modelos matemáticos o leyes se han usado comúnmente para cuantificar el perfil vertical de la velocidad del viento en regiones de terreno plano homogéneo. Estas son la ley del Perfil Logarítmico del Viento y la ley Exponencial de Hellmann.

### 2.7.3 Ley del Perfil Logarítmico

La ley del perfil logarítmico del viento puede ser obtenida teóricamente de los principios básicos de mecánica de fluidos e investigaciones atmosféricas. Se deriva de una combinación de investigaciones teóricas y semi empíricas.

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

$$V = V_o \frac{\ln\left(\frac{H}{z_o}\right)}{\ln\left(\frac{H_o}{z_o}\right)} \quad (2.1)$$

Donde:

V y  $V_o$  son las velocidades del viento a las alturas H y  $H_o$ .

$z_o$  coeficiente de rugosidad del terreno.

### 2.7.4 Ley Exponencial de Hellmann

La ley exponencial de Hellmann es empírica y su validez está generalmente limitada a las elevaciones más bajas de la atmósfera.

$$V = V_o \left(\frac{H}{H_o}\right)^\beta \quad (2.2)$$

Donde:

V y  $V_o$  son las velocidades del viento a las alturas H y  $H_o$ .

$\beta$  es un exponente que representa una forma de medida del rozamiento superficial encontrado por el viento.

### 2.7.5 Valores de $\beta$ y $z_o$ para distintos terrenos

En las tablas siguientes se muestran los valores del coeficiente de rozamiento superficial del viento  $\beta$  y del coeficiente de rugosidad del terreno  $z_o$  (tabla 2.1) para un mismo tipo de terreno.

**Tabla 2.1** Valores de  $\beta$  y  $z_o$  para distintos terrenos [14].

Tipo de Terreno	$\beta$	$z_o$ (m)
Liso (mar, arena, nieve)	0.10 – 0.13	0.001 – 0.02
Moderadamente rugosa (hierba, campos cereales, regiones rurales)	0.13 – 0.20	0.02 – 0.03
Rugoso (bosque, poblado)	0.20 – 0.27	0.3 – 0.2
Muy rugoso (ciudades, altos edificios)	0.27 – 0.40	2 - 10

## 2.8 Potencial Eólico

La potencia eólica disponible a través de una superficie de sección  $A$  perpendicular al flujo de viento  $v$  viene dada por el flujo de la energía cinética por unidad de tiempo.

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 = \frac{1}{2} (\rho A v) v^2 = \frac{1}{2} \rho A u_0^3 \quad (W) \quad (2.3)$$

Donde:

$\rho$  es la densidad del aire que para 15° de temperatura y a presión normal igual a 1013 mbar tiene un valor de 1.2256 kg/m<sup>3</sup>.

$\dot{m}$  es el caudal másico del aire.

$A$  es el área de barrido del rotor.

$u_0$  es la velocidad no perturbada del viento.

La potencia transportada por el viento es una función del cubo de su velocidad y es directamente proporcional al área barrida. Así, si una ráfaga de viento duplica su velocidad, la potencia se hará ocho veces mayor. El área que atraviesa el viento influye sobre la velocidad del flujo volumétrico de aire. Si se supone que tal área es circular, duplicar el diámetro significa hacer cuatro veces mayor la potencia disponible.

De la potencia que lleva el viento, una turbina ideal aprovecharía solamente  $16/27 = 0,59$  (o el 59%), que es el denominado límite de Betz [18].

En una turbina real, la potencia producida es igual a la potencia del viento, multiplicada por un factor adimensional  $C_p$ , al que se denomina coeficiente de potencia, que es una función de la velocidad del viento y que alcanza valores máximos de 0.45 en las turbinas más eficientes.

Para calcular la potencia eléctrica real que produce una turbina hay que considerar también la eficiencia de la caja de engranajes,  $\eta_{ce}$ , necesaria para convertir la velocidad de

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

rotación de las palas a las que el generador eléctrico adosado a la turbina funciona con más eficiencia, así como la eficiencia del propio generador eléctrico,  $\eta_G$ .

### 2.8.1 Densidad y presión atmosférica

La energía del viento está en función de la densidad del aire, pero la densidad del aire,  $\rho$ , está en función de la temperatura,  $T$ , y la presión,  $p$ , las cuales varían con la altura. La densidad del aire seco puede ser determinada aplicando la ecuación del gas ideal, la cual puede ser expresada como:

$$\rho = \frac{p}{RT} = 3.4837 \frac{p}{T} \quad (2.4)$$

Donde  $R$  es la constante universal de los gases ideales, la densidad está en unidades de  $\text{kg/m}^3$ , la presión en  $\text{kPa}$  ( $\text{kN/m}^2$ ), y la temperatura en grados Kelvin. La densidad del aire está en función del contenido de humedad que se puede encontrar en numerosos libros sobre termodinámica. El aire húmedo es un poco menos denso que el aire seco, pero rara vez se utilizan correcciones para la humedad del aire. La atmósfera estándar internacional asume que la temperatura y presión al nivel del mar son  $288.15 \text{ K}$  y  $101.325 \text{ kPa}$ , lo que da como resultado una densidad estándar al nivel del mar de  $1.225 \text{ kg / m}^3$  [18]. La presión del aire disminuye con la elevación sobre el nivel del mar. La presión en la atmósfera hasta una elevación de  $5000 \text{ m}$  se calcula de manera muy aproximada con la siguiente expresión:

$$p = 101.29 - (0.011837)z + (4.739 \times 10^{-7})z^2 \quad (2.5)$$

Donde  $z$  es la elevación en metros y la presión en  $\text{kPa}$ .

## 2.9 Aerogeneradores

Desde la antigüedad, la utilización de la energía del viento ha estado presente, la historia se remonta al descubrimiento de los molinos de viento de piedra en Egipto, con una antigüedad de  $3000$  años. A principios del siglo XIX, cuando la tecnología de los molinos

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

de viento alcanzaba su punto máximo en Europa, se construyeron numerosos molinos de viento en el nuevo Mundo. El danés Poul La Cour quién marcó el punto de inflexión del histórico molino de viento, construyó una turbina eólica experimental que impulsaba un dínamo en el año de 1891. Así a lo largo del tiempo se puede observar que las turbinas eólicas han mejorado en su capacidad de generación eléctrica y evidentemente en su tamaño, hoy existen aerogeneradores modernos que generan hasta 12 MW, con 220 metros de diámetro de rotor.

Generalmente, la variabilidad de los diseños de los aerogeneradores se enfoca principalmente en el rotor, pero este no es el único componente de una turbina de viento. Otros componentes para convertir la energía mecánica en eléctrica son: la caja de engranes, el generador, el sistema de control y muchos otros equipos y auxiliares igualmente necesarios para producir energía eléctrica a partir del movimiento de rotación del rotor.

A partir de la segunda mitad del siglo XX las máquinas eólicas no han experimentado evoluciones radicales en su diseño; todas ellas están integradas por un conjunto de subsistemas cuyo objetivo es captar la energía cinética del viento y transformarla en energía eléctrica (fundamentalmente) de la forma más óptima posible [15]. De forma general pueden señalarse los siguientes subsistemas:

Subsistema de captación.

Subsistema de transmisión mecánica.

Subsistema de generación eléctrica.

Subsistema de orientación.

Subsistema de regulación.

Subsistema de soporte.

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

Los convertidores de energía eólica se pueden clasificar por su función aerodinámica y por su diseño constructivo. El funcionamiento aerodinámico del rotor se caracteriza por el hecho de si el convertidor de energía eólica captura su potencia exclusivamente de la resistencia aerodinámica de la corriente de aire que actúa sobre la superficie del rotor o de si es capaz de utilizar la sustentación aerodinámica creada por el flujo sobre las superficies adecuadamente moldeadas. De acuerdo con lo anterior tenemos rotores impulsados por la fuerza de arrastre aerodinámico y rotores impulsados por la fuerza de sustentación aerodinámica [18].

Dentro de la clasificación de acuerdo al diseño constructivo tenemos la característica más evidente a la vista que es la disposición de su eje de rotación. Así tenemos las turbinas de eje horizontal y las de eje vertical.

### **2.9.1 Rotores de Eje Vertical.**

Los diseños más antiguos son los de rotores con ejes verticales de rotación. Los rotores "Savonius" que puede ser encontrado como ventilador en los vagones del ferrocarril, el anemómetro de copa utilizado para medir la velocidad del viento son ejemplos bien conocidos de rotores con eje de rotación vertical. El diseño Savonius se usa para rotores de viento simples y pequeños, especialmente para accionar bombas pequeñas de agua, no es adecuado para turbinas eólicas generadoras de electricidad debido a su baja relación de la velocidad y su coeficiente de potencia. Recientemente los ingenieros lograron desarrollar diseños de eje vertical que también podría utilizar eficazmente la sustentación aerodinámica. El diseño propuesto en 1925 por el ingeniero francés Darrieus ha sido considerado como un concepto prometedor para las modernas turbinas de viento (figura 2.7). La ventaja de las turbinas de eje vertical es que el diseño es simple, ya que la caja de engranes y el generador se encuentran a nivel del suelo. Esto se contrarresta con desventajas como su baja relación de velocidad, su incapacidad para arrancar automáticamente y no poder controlar la salida de potencia o la velocidad inclinando las

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

palas del rotor. Una variación del rotor Darrieus es el llamado rotor-H, este en lugar de palas curvadas, se utilizan palas rectas conectadas al eje del rotor mediante puntales. También existen otras geometrías propuestas para los rotores de eje vertical como por ejemplo con aspas en forma de V y eje del rotor inclinado [18].



**Figura 2.7** Aerogenerador de Eje Vertical tipo Darrieus [19].

## 2.9.2 Rotores de Eje Horizontal

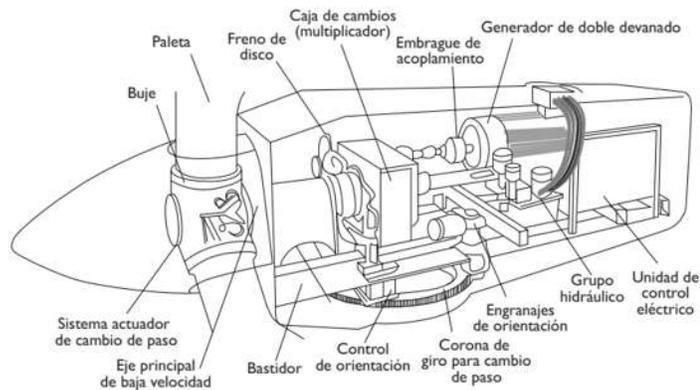
Los convertidores de energía eólica que tienen su eje de rotación en posición horizontal se realizan casi exclusivamente sobre la base de conceptos similares a una hélice (figura 2.8). Los diseños tanto de molinos de viento europeos, la turbina eólica americana o las modernas turbinas de viento, son el diseño dominante en la tecnología de energía eólica actual [18]. La superioridad de este diseño hasta la fecha se basa en gran medida en las siguientes características:

- En los diseños de la hélice, la velocidad del rotor y la salida de potencia se pueden controlar inclinando las palas del rotor alrededor de su eje longitudinal; la inclinación de la pala del rotor es la protección más efectiva

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

contra el exceso de velocidad y las velocidades extremas del viento, especialmente en grandes turbinas eólicas.

- La forma de la pala del rotor puede ser optimizada aerodinámicamente. El liderazgo tecnológico en el desarrollo del diseño de hélices es un factor decisivo.



**Figura 2.8** Góndola de una turbina de eje horizontal con algunos de sus componentes [20].

## 2.10 Parques Eólicos: generalidades

En la actualidad la aplicación típica de la energía eólica es la producción de electricidad, aunque aún siguen utilizándose pequeñas máquinas eólicas para el bombeo mecánico de agua. Las instalaciones eólicas pueden clasificarse en dos grupos: aerogeneradores conectados a la red eléctrica de distribución general y aerogeneradores aislados. En cualquier caso, cuando se emplean más de un aerogenerador la instalación recibe el nombre de parque eólico. A la hora de instalar un parque eólico, además de precisarse un estudio detallado y riguroso del potencial eólico, se requiere la construcción de una serie de infraestructuras civiles, eléctricas y de control. En el proceso de extracción de energía cinética del viento por el aerogenerador se origina una fuerza de empuje y un efecto de frenado del viento, que da lugar a que se produzca tras ella una disminución de la cantidad de movimiento y un incremento de la turbulencia. La difusión de estas

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

perturbaciones de velocidad y turbulencia aguas abajo da origen a la inestabilidad de la máquina [18].

Si un aerogenerador se encuentra dentro de la estela de otro situado aguas arriba, se verá reducido su potencial eólico. Para evitar este tipo de interferencias, es necesario disponer las turbinas en el parque con una distancia de separación entre ellas lo suficientemente grande. Por otra parte, la superficie de terreno disponible para instalar el parque suele estar limitada. Incluso si no lo está, es deseable la proximidad entre los aerogeneradores con objeto de reducir los costes de instalación, interconexión, operación y mantenimiento. Por tanto, es necesario llegar a una solución de compromiso para optimizar la configuración del parque, evitando en lo posible los efectos de interferencia y aprovechando al máximo la superficie de terreno disponible, teniendo en cuenta además la influencia de la orografía.

### **2.10.1 Aerogeneradores y la producción de energía eléctrica**

La energía eléctrica se produce en el aerogenerador. La fuerza del viento hace girar las palas del aerogenerador, que están diseñadas para captar al máximo esa energía cinética: pueden moverse incluso con vientos muy suaves, desde 11 kilómetros por hora. Las palas están unidas a la turbina a través del buje, que a su vez está conectado al eje lento, que gira a la misma velocidad de las aspas (entre 7 y 12 revoluciones por minuto). Una multiplicadora eleva esa velocidad más de 100 veces y la transfiere al eje rápido, que se mueve a más de 1500 revoluciones por minuto. Dicha fuerza se transmite al generador (algunas tecnologías utilizan generadores de baja velocidad acoplados directamente al eje lento), donde la energía cinética se transforma en energía eléctrica. Y de ahí pasa al convertidor, que la transforma en corriente alterna.

La energía eléctrica producida es de baja tensión, por lo que se conduce hasta un transformador que la eleva a media tensión (entre 20 y 66 kV) para que pueda ser

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

transportada por el parque. Desde allí se traslada hasta la subestación, que convierte la energía en corriente de alto voltaje (más de 132 kV). Esta electricidad, ya apta para el consumo, se transfiere a través de la línea de evacuación (generalmente aérea) hasta las instalaciones conectadas a la red de distribución, que la lleva finalmente a los hogares [21].

# Capítulo 3

## 3. Pronóstico de Generación Eólica

### 3.1. Introducción de las ERv al Sistema Eléctrico Nacional

Para hablar de la normativa con referencia al Sistema Eléctrico Nacional y la introducción de Energías Renovables Variables, es necesario comenzar haciendo mención de La Ley de la Industria Eléctrica (LIE). La LIE a la letra dice: “Esta Ley tiene por finalidad promover el desarrollo sustentable de la industria eléctrica y garantizar su operación continua, eficiente y segura en beneficio de los usuarios, así como el cumplimiento de las obligaciones de servicio público y universal, de Energías Limpias y de reducción de emisiones contaminantes” [3]. Aunque el artículo 25 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos dice que el sector público tendrá a su cargo las áreas estratégicas, para nuestro caso el Sistema Eléctrico Nacional. Las reformas hechas a la Ley de Servicio Público de Energía en 1992, permitió que se celebraran contratos con particulares dándoles la autorización para la generación de energía eléctrica. Esto trajo consigo nuevas tecnologías de generación como la energía eólica, que para poder participar como generadora debe cumplir con las Bases que operan en el Mercado Eléctrico Mayorista que surgió en la Reforma eléctrica de 2013 y se encuentra bajo el control operativo del Centro Nacional de Control de Energía (CENACE). Dentro de los requerimientos que se hacen a los particulares que quieran participar están los pronósticos de generación, que son necesarios para poder participar en el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) y poder inyectar a la red la energía generada. Ahora que se

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

encuentra nuevamente bajo discusión la Reforma Energética de 2013, cabe mencionar la importancia de generar investigaciones que puedan coadyuvar en el cambio energético ordenado que se propone en la iniciativa de reforma constitucional, presentada el pasado 30 de septiembre de 2021 por el titular del Ejecutivo Federal, Andrés Manuel López Obrador.

### 3.1.1 Pronóstico de la Potencia Eólica

Para poder integrar las ERv de manera eficaz al sistema eléctrico, los operadores de red necesitan disponer de un buen pronóstico de generación. El pronóstico de la potencia eólica corresponde a estimar la producción de energía eléctrica de un aerogenerador en un tiempo futuro. El pronóstico de la energía eólica tiene como objetivo primordial combatir su incertidumbre, para reducir el uso de la energía convencional y promover la introducción de ERv.

A lo largo del tiempo se han desarrollado distintos tipos de pronósticos que se clasifican de acuerdo con distintos criterios, como lo son el horizonte de pronóstico, la metodología usada y una tercera nueva clasificación sería el agente que los genera.

## 3.2 Clasificación según horizonte de Pronóstico

De acuerdo con el horizonte, los pronósticos se pueden dividir en las siguientes categorías (tabla 3.1):

**Tabla 3.1** Clasificación del Pronóstico según su Horizonte [19].

<b>PMCP</b>	Pronóstico de muy corto plazo, o intradiario, que es un pronóstico con un horizonte que puede fluctuar desde minutos hasta 6 horas.
<b>PCP</b>	Pronóstico de corto plazo, el más común es el de día en adelante, con horizontes que pueden fluctuar entre 6 y 48 horas.
<b>PMP</b>	Pronóstico de mediano plazo, el cual puede tener un horizonte desde 2 y hasta 20 días.

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

Los distintos tipos de pronósticos son usados por diferentes usuarios y para distintos fines. Los PMP usualmente son usados por los generadores, para decidir aspectos relacionados con la seguridad de suministro y la manutención de la red. El PCP es usado principalmente por el organismo encargado de la regulación o el operador de red, para prevenir eventuales congestiones del sistema, programar la generación y el seguimiento de carga. Los principales usuarios de los PMCP son los operadores de la red, por ejemplo, para la programación de generación de las unidades, la operación en tiempo real y las restricciones de transmisión [22].

### **3.3 Tipos de pronósticos según su metodología**

Los tipos de pronósticos empleados para la predicción según su metodología se pueden clasificar en dos grandes grupos: los que se basan en datos históricos y aquellos que buscan modelar el mundo físico.

Aunque existe una relación entre la calidad del pronóstico y la metodología a utilizar, no siempre es deseable o posible aplicar las técnicas más avanzadas. Si los pronósticos obtenidos con técnicas simples están arrojando un error muy alto, o si el sistema no es tan robusto y por lo tanto el costo del error es alto, se recomienda utilizar pronósticos más avanzados.

#### **3.3.1 Pronóstico de persistencia**

Se basa en el supuesto de que la energía generada en el futuro cercano será similar a la generada actualmente y/o en el pasado reciente. El pronóstico de persistencia no necesita más insumos que la energía generada en el último tiempo (figura 3.1). Por la metodología, las desviaciones aumentan con el horizonte del pronóstico, y tiene cierta validez para un PMCP. Este modelo es usado actualmente, tanto por operadores de la red como de las centrales ERv cuando no existe otro tipo de pronóstico.

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.



**Figura 3.1** Diagrama de Bloques del Proceso del Pronóstico de Persistencia.

### 3.3.2 Pronóstico Análogo

Este modelo de pronósticos analiza variables meteorológicas recientes, y buscan en un historial un evento igual o muy similar. Así como en el método de persistencia, sólo se necesita un conjunto de datos recientes de la generación. Se utiliza un coeficiente de correlación para poder encontrar aquellos fenómenos históricos que se le asemejen (figura 3.2). Con esto se pueden hacer diferentes tipos de regresiones o métodos estadísticos para hacer el pronóstico.



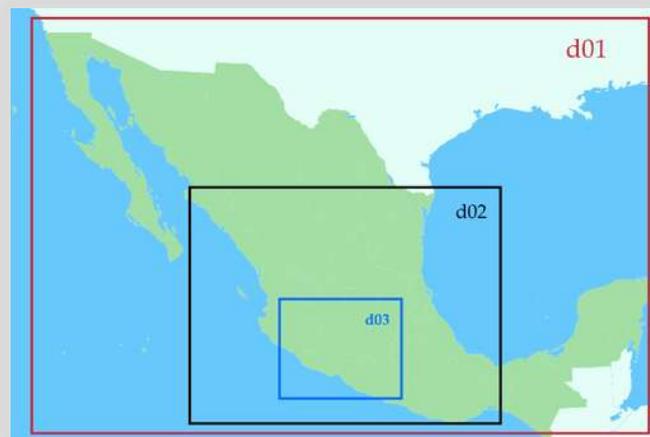
**Figura 3.2** Diagrama de Bloques del Proceso del Pronóstico de Análogo.

### 3.3.3 Modelo numérico de predicción meteorológica

Es importante predecir cómo se comportará el clima para poder hacer pronósticos más precisos y a más largo plazo. Cuando se busca describir y simular el clima, la técnica más utilizada es la del modelo numérico de predicción meteorológica (por sus siglas en inglés, NWP) [23].

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

Los NWP resuelven las ecuaciones que gobiernan la física de la atmósfera, usando métodos numéricos, para lo cual es necesario disponer de una infraestructura computacional adecuada. De acuerdo con el área de simulación, se puede distinguir entre modelos globales, que calculan las condiciones meteorológicas a nivel global, y modelos regionales o de mesoescala (Figura 3.3), que caracterizan la meteorología en una zona limitada, normalmente del orden de cientos de kilómetros. Para poder resolver las ecuaciones implícitas en un NWP, se requiere dividir el área horizontal de simulación en cuadrados, o cuadrícula, que son vistos por el modelo como unidades, y a su vez dividir el espacio en niveles verticales discretos.



**Figura 3.3** Imagen de representación de tres Dominios para el Modelo WRF.

Debido a la relación entre la granularidad espacial y el requerimiento de recursos computacionales, un modelo global usa una cuadrícula horizontal de baja resolución. Una solución, es utilizar los modelos regionales o de mesoescala, que permiten realizar una reducción de escala, mejor conocida como downscaling. El downscaling es una metodología mediante la cual los pronósticos realizados con un modelo global, que son de baja resolución espacial, se mejoran para que sean válidos a escala local. Se conocen

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

dos tipos de downscaling: estadístico y dinámico. Uno de los modelos regionales más usados es el Modelo de Investigación y Pronóstico Meteorológico WRF [24].

### 3.3.4 Pronóstico físico

Un pronóstico físico transforma el pronóstico meteorológico generado con un NWP en un pronóstico de energía, a partir de la dependencia de la variable de potencia de las tecnologías de las variables meteorológicas, declaradas por el fabricante (Figura 3.4).

En el caso de la energía eólica, se evalúa el pronóstico del viento en la posición de la góndola de cada una de las turbinas que componen el parque. Posteriormente, con la curva de potencia se calcula el pronóstico de generación de cada una de las turbinas. La potencia generada por el parque completo se predice sumando la energía que generarán las turbinas individualmente y considerando los efectos de turbulencia de cada turbina en el parque.

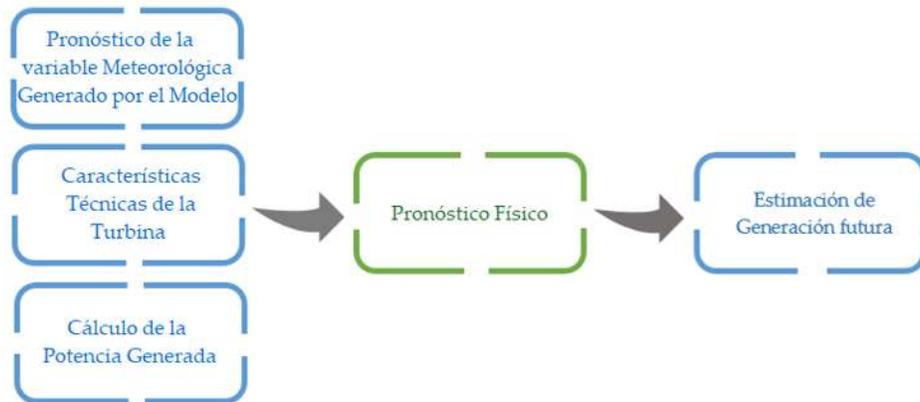


Figura 3.4 Diagrama de Bloques del Proceso del Pronóstico Físico.

### 3.3.5 Pronóstico estadístico

Un pronóstico estadístico analiza relaciones entre variables, a partir de información histórica. Uno de los métodos estadísticos que ha presentado mayor éxito en la generación de pronósticos es el generado a partir de las Redes Neuronales Artificiales

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

(por sus siglas en inglés ANN). A menudo, las ANN se describen como algoritmos biológicos que trabajan imitando el funcionamiento del cerebro humano. A partir de un proceso de entrenamiento basado en información histórica, son capaces de encontrar las relaciones entre la variable de interés y otras variables, lo que permite hacer pronósticos.

### **3.3.6 Pronóstico de energía usando Dinámica de Fluidos Computacional**

Cada turbina eólica genera turbulencia en el viento, después de que éste pase a través de ella. Para simular correctamente un parque eólico, se recomienda modelar la interacción que tienen las turbinas entre sí y cómo afecta la turbulencia generada por cada una de ellas. Para ello, es posible usar herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (por sus siglas en inglés CFD) que utilizan ecuaciones de dinámica de fluidos y métodos numéricos para simular el comportamiento del viento en el parque. Sin embargo, las simulaciones requieren de recursos computacionales sustanciales y, en la práctica son difíciles de implementar para un pronóstico operacional.

## **3.4 Tipos de pronósticos según el agente que los genera**

Los pronósticos se clasifican también de acuerdo con el agente que los genera, los cuales se enuncian a continuación [25]:

- Pronóstico descentralizado. Es el pronóstico que genera cada central, para el que puede contratar un proveedor externo o desarrolla sus propios modelos
- Pronóstico Centralizado. Pronóstico desarrollado por el operador de red desarrollando modelos propios o contrata el servicio de pronóstico para las centrales de ERv.
- Pronóstico mixto. Este Pronóstico presenta ambas modalidades, el operador de red tiene un pronóstico centralizado y recibe el pronóstico de los generadores y con ambos genera uno nuevo más preciso.

### 3.5 Error de pronóstico

El pronóstico ha surgido como un método rentable para reducir el impacto de la integración de ERv en la red, proporcionando beneficios clave que son esenciales para los operadores. Sin embargo, existen desviaciones entre la generación despachada y la pronosticada cuando los pronósticos no son de buena calidad, por ello es necesario calcular los errores de pronóstico para evaluar el nivel de desempeño del modelo. El error de pronóstico es una medida de la desviación entre lo previsto y lo real, y para ello existen dos medidas de error de pronóstico que son las más usadas, el Error Medio Absoluto y la Raíz Cuadrada del Error Cuadrado Medio [25].

#### 3.5.1 Error medio absoluto (MAE)

El error medio absoluto es una medida de la diferencia entre dos variables. Considerando dos series de datos (unos calculados y otros observados) relativos a un mismo fenómeno, el error medio absoluto sirve para cuantificar la precisión de un modelo de predicción comparando por ejemplo los valores pronosticados frente a los observados [26].

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |e_t| \quad (3.1)$$

Donde  $e_t$  representa el error de pronóstico.

#### 3.5.2 Raíz cuadrada del error cuadrado medio (RMSE)

Es una medida de las diferencias entre los valores predichos por un modelo y los valores observados. El RMSE representa la raíz cuadrada de las diferencias entre los valores predichos y los valores observados [26].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e_t^2} \quad (3.2)$$

### 3.6 Intervalos de Predicción

Por lo general, es deseable proporcionar no solo valores de pronóstico, sino también declaraciones de la incertidumbre que los acompañan en forma de intervalos de predicción. Esto es útil porque proporciona al usuario de los pronósticos estimaciones del "peor" o "mejor" escenario que se puede presentar. No se espera que los pronósticos sean perfectos así que los intervalos enfatizan esta cuestión [26].

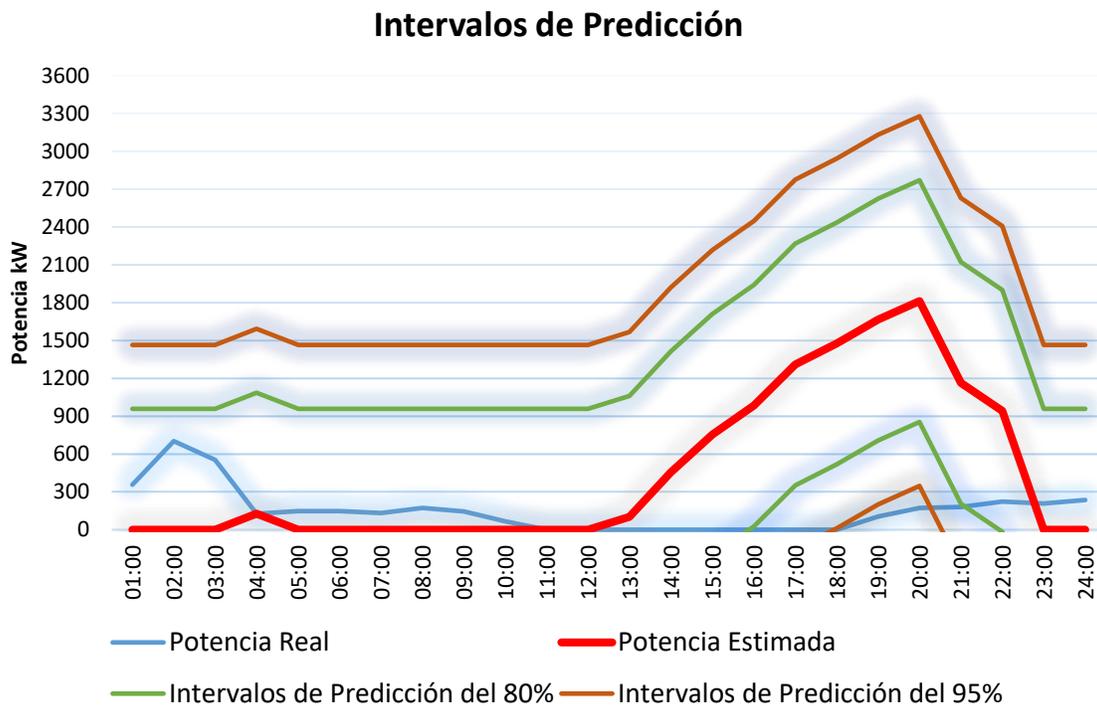


Figura 3.5 Intervalos de Predicción para el Pronóstico de Potencia.

Los intervalos de predicción generalmente se basan en el error cuadrado medio (MSE) porque proporciona una estimación de la varianza del error de pronóstico (figura 3.5). Entonces la raíz cuadrada del MSE es una estimación de la desviación estándar del error de pronóstico. Para su cálculo se usa la expresión 3.3:

$$F_{n+1} \pm z\sqrt{MSE} \quad (3.3)$$

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

Donde:

$F_{n+1}$ : es la potencia pronosticada

$z$ : es el coeficiente que determina el ancho y la probabilidad de la predicción, que se selecciona de una tabla de valores propuestos para el porcentaje del intervalo a calcular.

Para el 80% corresponde un valor de  $z$  de 1.282 y para un 95% un valor de 1.96 [26].

# Capítulo 4

## 4. El Modelo WRF; PCP en Tepuxtepec, Michoacán

### 4.1 Predicción Numérica del Tiempo

Los Modelos Numéricos de Predicción del Tiempo son modelos que se utilizan y desarrollan con fines de predicción meteorológica. Los modelos resuelven las ecuaciones diferenciales que describen la evolución de la atmósfera, estas ecuaciones son traducidas a códigos de computadora y mediante ecuaciones gobernantes, métodos numéricos y parametrizaciones de otros procesos físicos se ejecutan en un dominio para generar la predicción [27].

Los Modelos de Predicción se pueden clasificar como Modelos Globales y Modelos de Mesoescala. Los Modelos Globales tienen una cobertura global y se ocupan del análisis y la predicción de las estructuras meteorológicas cuya escala excede los 2000 km, el más común es el Sistema de Pronóstico Global (GFS).

### 4.2 Modelos de Mesoescala

Un modelo de mesoescala es un modelo de predicción numérica del tiempo (PNT) cuya resolución horizontal y vertical es suficiente para pronosticar fenómenos meteorológicos menores a los 2000 km. Las estructuras de mesoescala oscilan de la escala casi sinóptica (mesoescala-alfa) a las células nubosas individuales, las cuales tienen

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

dimensiones de 1 a 20 km y duran menos de una hora (mesoescala-gamma). A estas escalas, las velocidades verticales que se alcanzan bajo el efecto de procesos tales como el empuje hidrostático y los efectos topográficos pueden igualar y hasta superar las velocidades horizontales para distancias cortas.

Al nivel de mesoescala, una resolución del modelo de 20 km o menos, el terreno afecta profundamente a las manifestaciones meteorológicas y a veces hasta juega un rol dominante al igual que los procesos no hidrostáticos, esto es de suma importancia para comprender las repercusiones en el pronóstico [28].

La gran relación que existe entre los modelos sinópticos y de mesoescala es que todos los modelos de "mesoescala" dependen de un modelo "global" de resolución relativamente baja que genera las condiciones iniciales.

### **4.3 Modelo WRF**

El modelo de investigación y pronóstico del tiempo WRF (Weather Research and Forecasting) es un sistema de predicción meteorológica numérica de mesoescala diseñado tanto para la investigación atmosférica como para aplicaciones de predicción operativa. Cuenta con dos núcleos dinámicos, un sistema de asimilación de datos y una arquitectura de software que admite computación paralela y extensibilidad del sistema. El modelo sirve para una amplia gama de aplicaciones meteorológicas en escalas que van desde decenas de metros a miles de kilómetros. El esfuerzo para desarrollar WRF comenzó a fines de la década de 1990 y fue una asociación de colaboración del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR), la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (representada por los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP) y el Laboratorio de Investigación del Sistema Terrestre), la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, el Laboratorio de Investigación Naval y la Universidad de Oklahoma [29].

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

Para los investigadores, WRF puede producir simulaciones basadas en condiciones atmosféricas reales, es decir, a partir de observaciones y análisis, o de condiciones idealizadas.

El sistema WRF contiene dos solucionadores dinámicos, denominados núcleo ARW (Advanced Research WRF) y núcleo NMM (modelo mesoescala no hidrostático), como se muestra en la figura 4.1.

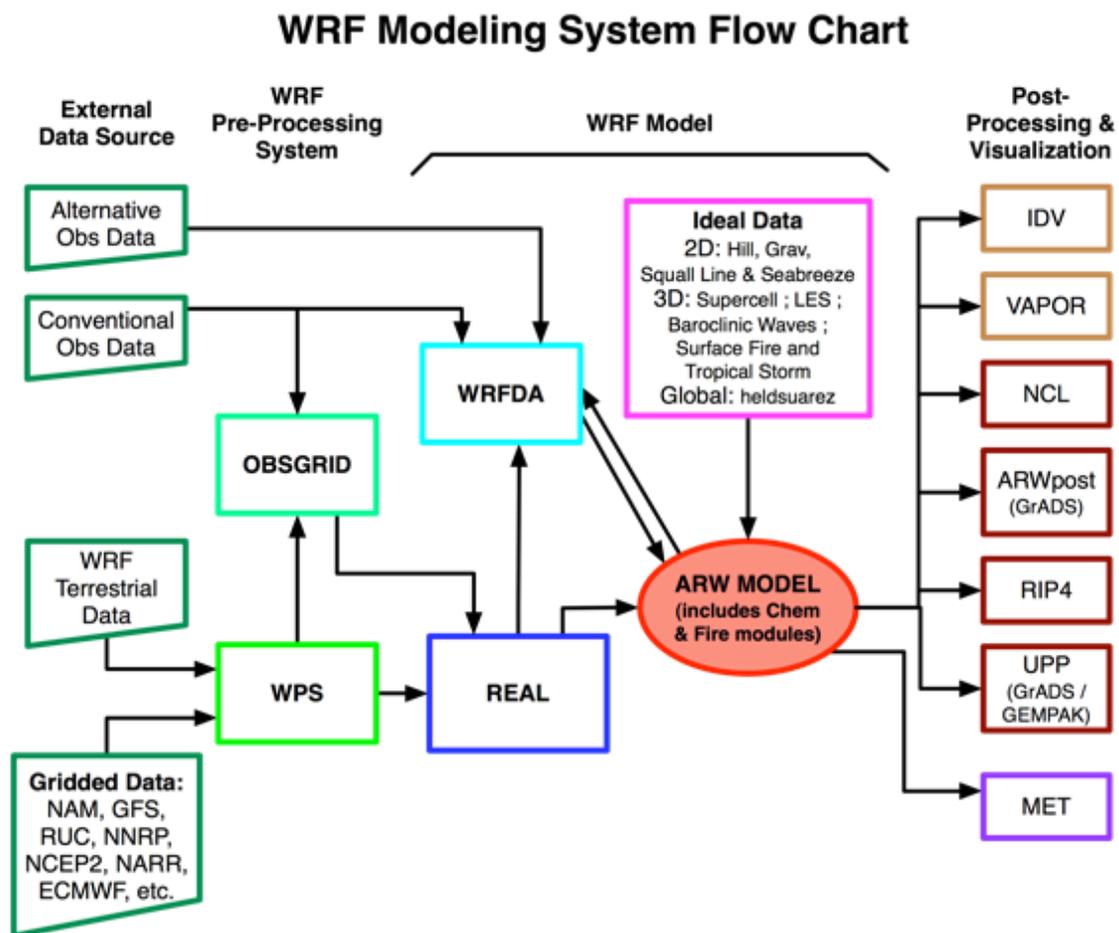


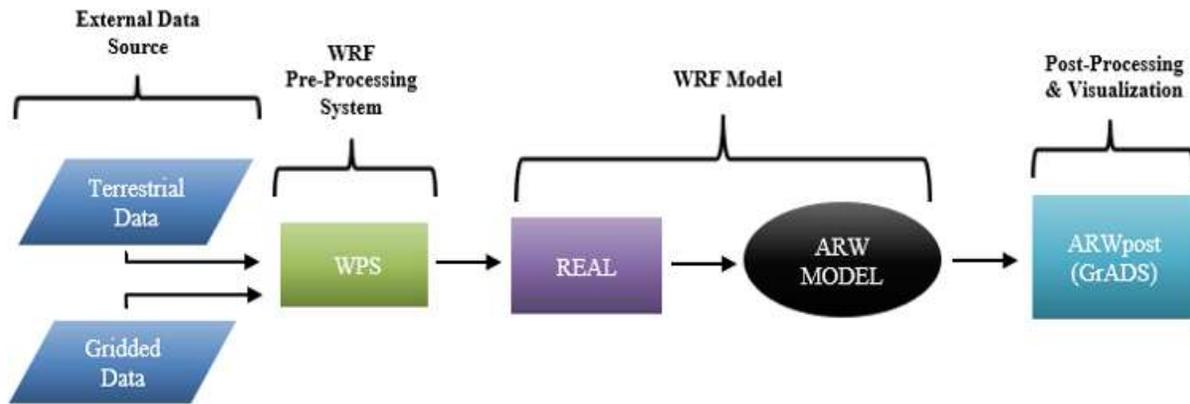
Figura 4.1 Diagrama de flujo del modelo ARW [30].

En la figura 4.2 se muestra el diagrama de flujo del sistema de modelado de WRF para simulaciones reales que consta de tres programas principales:

- El Sistema de Preprocesamiento WRF (WPS).

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

- El Solucionador WRF-ARW.
- Las Herramientas de Posprocesamiento y Visualización.



**Figura 4.2** Diagrama de flujo condensado del modelo ARW utilizado para la investigación.

### 4.3.1 WPS

La herramienta WRF Preprocessing System (WPS) es un conjunto de tres programas (geogrid.exe, ungrib.exe y metgrid.exe) que trabajan para preparar las entradas (inputs) para la etapa de procesamiento [30]. Las funciones que se llevan a cabo en estos tres programas son:

- 1) geogrid.exe: Define los dominios de simulación e interpola los datos geográficos al dominio de la simulación;
- 2) ungrib.exe: Extrae campos meteorológicos desde los archivos gribfiles, provistos por la base de datos de reanálisis e interpola los datos terrestres (como terreno, uso de tierra y tipos de suelo) al dominio de la simulación; y
- 3) metgrid.exe: Desglosa e interpola horizontalmente los campos meteorológicos extraídos por ungrib.exe para los dominios definidos por geogrid.exe, además, genera

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF. archivos en formato NetCDF que serán utilizados por real.exe en la etapa de procesamiento.

### **4.3.2 Solucionador WRF-ARW**

Este es el componente clave del sistema de modelado, ya que es aquí donde se lleva a cabo la simulación con el programa de integración numérica. Las características clave del modelo WRF incluyen [30]:

- Ecuaciones no hidrostáticas totalmente comprimibles con opción hidrostática.
- Aplicaciones regionales.
- Términos completos de Coriolis y curvatura.
- Anidación bidireccional con múltiples nidos y niveles de nidos.
- El espaciado de la cuadrícula vertical puede variar con la altura.
- Factores de escala de mapa para proyecciones: estereográfica polar, Lambert, Mercator, Latitud y longitud.
- Sistema de cuadrícula de Arakawa C.
- Opciones físicas completas para la superficie terrestre, la capa límite planetaria, la radiación atmosférica y superficial, la microfísica y la convección de cúmulos.
- Pasos de tiempo adaptables.

### **4.3.3 ARWpost**

El pronóstico generado por WRF-ARW, necesita ser post-procesado para obtener datos que nos permitan graficar e interpretar el pronóstico, para ello se utiliza ARWpost que genera las salidas necesarias para ser interpretadas por GrADS que es un sistema de visualización de los resultados obtenidos por WRF-ARW [30].

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

#### 4.3.4 GrADS

EL programa GrADS (del acrónimo en inglés Grid Analysis and Display System) es una herramienta que se utiliza para facilitar el acceso, manipulación y visualización de datos de ciencias de la tierra (figura 4.3). Este programa admite los archivos generados por ARWpost para la visualización de la simulación utilizando un entorno de cuatro dimensiones convencionales (longitud, latitud, nivel vertical y tiempo), con técnicas gráficas como cuadrículas sombreadas y vectores de viento [31]. Para fines de investigación este programa tiene la ventaja de ser distribuido de forma gratuita a través de internet.

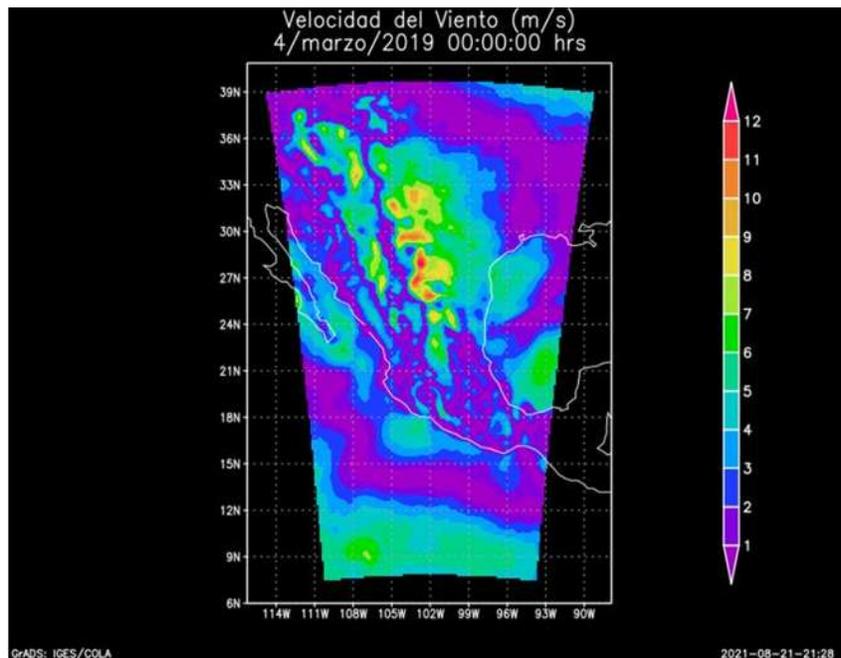


Figura 4.3 Imagen de los resultados obtenidos por WFR visualizados en GrADS [31].

#### 4.4 Sitio de estudio y sus características

El municipio de Contepec es uno de los 113 municipios en que se divide el estado mexicano de Michoacán. Situado al noreste del estado, su cabecera es el pueblo de Contepec. Se localiza al noroeste del Estado en las coordenadas 19°57' de latitud norte

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF. y  $100^{\circ}10'$  de longitud oeste, a una altura de 2,490 metros sobre el nivel del mar. Limita al norte con Epitacio Huerta y el Estado de Querétaro, al este con el Estado de México, al sur con Tlalpujahuá y Maravatío y al oeste con Maravatío. Su distancia a la capital del Estado es de 126 km. Su clima es templado con lluvias en verano, tiene una precipitación pluvial de 1,168.0 milímetros y temperaturas que oscilan de  $8.6^{\circ}$  a  $22.4^{\circ}$  centígrados [32].

#### 4.4.1 Características del terreno

De acuerdo con la propuesta de ubicación para el emplazamiento [33], se hizo un reconocimiento del sitio con la finalidad de caracterizar el tipo de terreno puesto que sería necesario para los cálculos del Potencial Eólico. El sitio tiene área plana con superficie lisa para la superficie del agua de la presa y el área de terreno con pendientes suaves y suelo agrícola abierto sin cercados ni setos, como se puede apreciar en la figura 4.4.



**Figura 4.4** Foto del sitio propuesto para el emplazamiento Eólico en Tepuxtepec.

#### 4.4.2 Registro de Velocidades de Viento del lugar

Se solicitó información de la Estación Meteorológica Automática Tepuxtepec a la CONAGUA, la cual fue proporcionada por el Organismo de Cuenca Lerma Santiago

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF. Pacifico (OCLSP) (figura 4.5). La estación se ubica en las coordenadas  $20^{\circ}00'6.68''N$ ,  $100^{\circ}13'44.28''W$  [31], a 2.76 kilómetros del sitio propuesto para el emplazamiento (figura 19).



**Figura 4.5** Estación Meteorológica Automática Tepuxtepec [34].

La Estación Meteorológica Automática Tepuxtepec, está conformada por un grupo de sensores que registran y transmiten información meteorológica de forma automática desde el sitio. Su función principal es la recopilación y monitoreo de algunas variables meteorológicas para generar archivos con promedio de cada 10 minutos de todas las variables, esta información es enviada vía satélite en intervalos de 1 o 3 horas [34]. La información de los registros de la velocidad del viento proporcionada por la CONAGUA comprendía los periodos de 2018 a 2020 con promedios de la velocidad del viento a cada

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF. hora. Cabe mencionar que en los registros faltaba mucha información, lo cual fue una condicionante para la selección de las fechas de simulación.



**Figura 4.6** Estación Meteorológica Automática Presa de Tepuxtepec [35].

## 4.5 Periodo y fechas de simulación

Para esta investigación se seleccionó hacer un pronóstico de la velocidad del viento con un horizonte de 24 horas, mejor conocido como el de día en adelante. Para probar el modelo para el sitio de estudio se seleccionaron primeramente 3 configuraciones distintas con la finalidad de seleccionar el modelo que mejor se ajustara a la velocidad del viento real, seleccionando el día 4 de marzo de 2019 para la simulación. Una vez seleccionado el modelo con mejor desempeño en el pronóstico, se propusieron dos días de simulación por mes para un periodo de un año, la selección de las fechas se hicieron acorde a los

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

datos registrados, ya que se buscaron semanas de mediciones continuas donde no hubiera datos faltantes. En la Tabla 4.1 se muestran las fechas seleccionadas.

**Tabla 4.1** Fechas seleccionadas para las corridas.

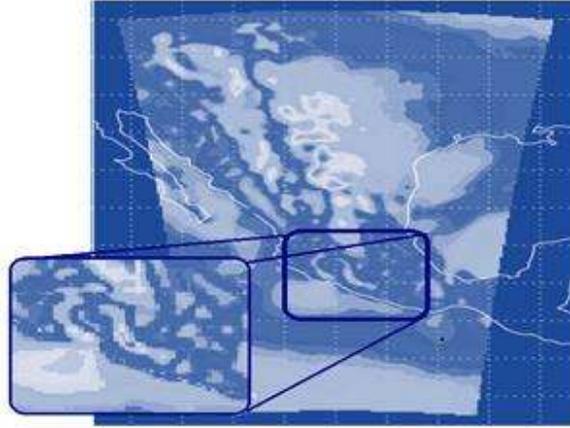
Fechas	Fechas
26 de marzo de 2019	20 de septiembre de 2019
27 de marzo de 2019	20 de septiembre de 2019
9 de abril de 2019	15 de octubre de 2019
10 de abril de 2019	16 de octubre de 2019
8 de mayo de 2019	7 de noviembre de 2019
9 de mayo de 2019	8 de noviembre de 2019
28 de junio de 2019	6 de diciembre de 2019
29 de junio de 2019	7 de diciembre de 2019
5 de julio de 2019	18 de enero de 2020
6 de julio de 2019	19 de enero de 2020
19 de agosto de 2019	4 de febrero de 2020
20 de agosto de 2019	5 de febrero de 2020

## 4.6 Configuración del Modelo (WRF)

Para esta investigación, WRF se utilizó para simulaciones basadas en condiciones atmosféricas reales (es decir, a partir de observaciones y análisis). En la parte del preprocesamiento para la simulación del 4 de marzo de 2019 se definieron:

1) Dominios y fechas de la simulación, resolución de la cuadrícula, la proyección del mapa, la latitud y longitud de referencia. Para estos modelos se estableció un dominio de coordenadas 5.99831 a 40.8632 de latitud y -116.258 a -87.8796 de longitud. La resolución fue de 30 km, con simulaciones de 24 horas para el modelo 1 y 2, y 10 km y 30 horas para el modelo 3. En la figura 4.7 se observa el dominio de la simulación.

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.



**Figura 4.7** *Dominio de la Simulación [31].*

2) Se interpolaron los datos terrestres al dominio de la simulación con lo que se prepararon los campos para su uso en el modelo, con las categorías de uso de suelo, altura del terreno, promedios anuales de temperatura del suelo, datos mensuales de cobertura vegetal y otras características en cada nodo, de acuerdo a la configuración que tiene por default el modelo (figura 4.8).



**Figura 4.8** *Configuración de inicio para WPS [30].*

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

3) Se decodificó e interpoló con los Datos Meteorológicos de Reanálisis. Para inicializar y establecer las condiciones de frontera del Modelo de Pronóstico se utilizaron datos de Reanálisis del Sistema de Pronóstico Climático (CFSR), de los Centros Nacionales para la Predicción Ambiental (NCEP). Este sistema se inicializa cuatro veces por día con datos cada seis horas y resoluciones horizontales de 0.2, 0.5, 1.0 y 2.5 grados [36].

#### 4.6.1 Opciones Físicas

EL programa de WRF cuenta con un manual de usuario que define paso a paso el uso correcto, dando referencia de buenas prácticas de configuración del programa. Previo a la simulación existen una serie de configuraciones físicas del modelo acorde con el sitio de estudio y el tipo de variable a predecir; para la predicción de la velocidad del viento se utilizaron las configuraciones que se muestran en la tabla 4.2.

**Tabla 4.2** Configuración del Modelo WRF [30].

Parametrización	Esquemas
physics_suite	'CONUS' (con modificaciones)
mp_physics	Kessler
cu_physics	Kain-Fritsch
ra_lw_physics	RRTMG
ra_sw_physics	RRTMG
bl_pbl_physics	MYNN
sf_sfclay_physics	Eta Similarity
sf_surface_physics	Unified Noah Land Surface Model

A continuación, se da una breve descripción de las configuraciones mostradas en la tabla 4.2.

**Kessler:** Utilizada para tomar en cuenta las conexiones probables entre distribuciones de vapor de agua, nubes, lluvia y nieve con vientos verticales y horizontales, divergencia

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF. del viento, compresibilidad de la atmósfera, y la fuerza y distribución de varios procesos micro físicos.

**Kain-Fritsch:** Usa coordenadas híbridas ETA que se aproximan a las coordenadas sigma cerca de la superficie y a los niveles de presión constante en altura, que son utilizados en Servicio Meteorológico Nacional de Estados Unidos.

**RRTMG:** Toma en cuenta el forzamiento radiativo a causa de los gases de efecto invernadero, simulando el cambio climático y ayuda a representar de forma precisa los procesos radiativos asociados con vapor de agua y ozono.

**MYNN:** Mejora el modelo para turbulencia de la capa límite atmosférica. Se usa para tamaños de cuadrícula mayores a 500 m.

**ETA Similarity:** Propone un método para calcular las características austausch para la medición de la velocidad del viento y el gradiente de temperatura.

**Unified Noah Land Surface Model:** Parametriza los procesos de la superficie terrestre de forma adecuada.

Una vez hechas todas las configuraciones se ejecutó el programa *real.exe* en la etapa de procesamiento para interpolar verticalmente y construir las condiciones iniciales y de borde; estos archivos de salida generados por *real.exe* son la entrada a *wrf.exe* que es el encargado de integrar numéricamente las ecuaciones del modelo [30].

Se ejecutó el programa *wrf.exe* llevando a cabo 24 corridas con el modelo se obtuvieron los pronósticos de la Potencia Generada a cada hora de dos días por mes en las fechas ya especificadas en la tabla 4.1, además, se calcularon los Intervalos de Predicción del 80% y el 90% para cada día. Los resultados obtenidos se presentan en la parte de resultados del Capítulo 5.

# Capítulo 5

## 5. Resultados

En este Capítulo se presentan los resultados obtenidos con la integración del modelo WRF y el pronóstico a corto plazo de la Potencia del aerogenerador Siemen-swt-2.3-113 (con potencia nominal de 2,300 kW) para los días propuestos en la tabla 4.1 del Capítulo 4. Para poder calcular la potencia primero se validó que el modelo más adecuado fuera el que mejores resultados proporcionara en el pronóstico de la velocidad del viento, para ello se configuraron tres modelos con distintas configuraciones para la selección del que mejor desempeño mostrara en el pronóstico. Para la validación de los modelos se utilizaron las medidas de error de pronóstico denominadas error medio absoluto (MAE) y la raíz cuadrada del error cuadrado medio (RMSE), las cuales confirmaron el modelo número 3 como el que mejor ajuste presenta. Con las configuraciones del modelo 3 se hicieron las distintas corridas para las fechas propuestas en el Capítulo 4 y se extrajeron los datos de la velocidad del viento a 10 metros, con archivos de salida a cada hora para ser comparados con los datos observados de la Estación Meteorológica.

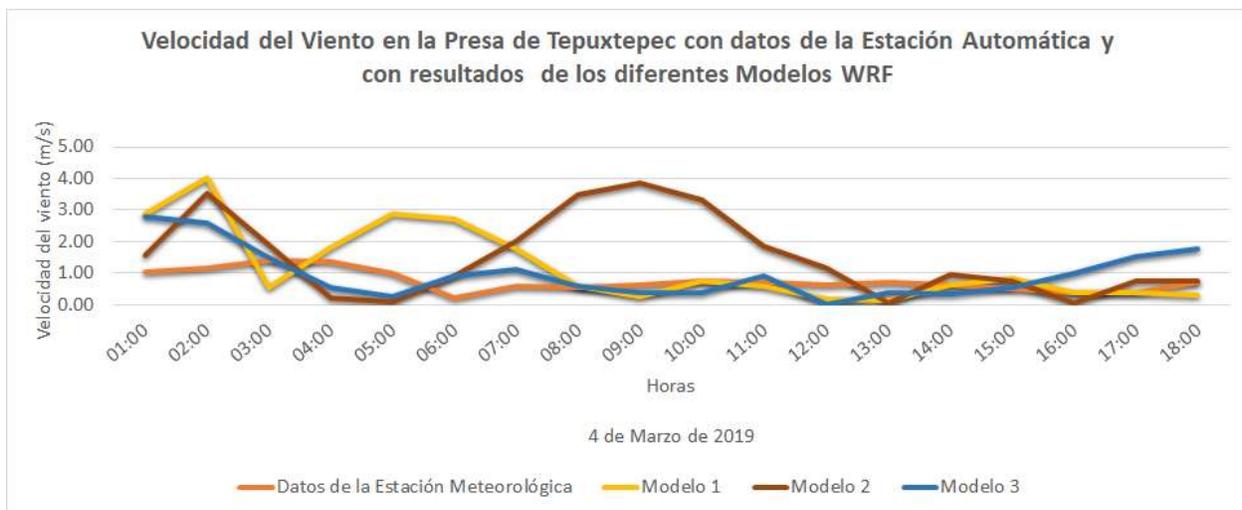
### 5.1 Modelo para el cálculo de la velocidad el viento

El desempeño de un modelo de pronóstico para la velocidad del viento se evalúa de acuerdo al error de pronóstico, que es la diferencia entre el pronóstico y la velocidad real. Para poder calcular la potencia primero se validó que el modelo más adecuado fuera el que mejores resultados proporcionara en el pronóstico de la velocidad del viento. Para validar estos modelos se utilizaron los datos proporcionados por la Comisión Nacional

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

del Agua, las observaciones fueron tomadas en la Estación Meteorológica Automática Tepuxtepec del SMN, la cual es administrada por el Organismo de Cuenca Lerma Santiago Pacifico (OCLSP).

Como se puede ver en la figura 5.1 se tienen la serie de datos observados en color naranja que se puede comparar cualitativamente con las series de datos de los modelos que son las series en color amarillo, carmín y azul. Se puede ver que el modelo que más se acerca al comportamiento de los datos observados es el Modelo 3 que es la serie de datos en color azul.



**Figura 5.1** Series de las velocidades de viento de los datos de la estación y los Modelos.

Para validar los modelos cuantitativamente se compararon los datos observados de las velocidades del viento con los pronosticados por los modelos, para ello se calcularon dos de los indicadores de precisión más utilizados: el error medio absoluto (MAE) y la raíz cuadrada del error cuadrado medio (MSRE) el resumen de resultados se puede observar en la Tabla 5.1.

**Tabla 5.1** Medidas estadísticas del error de pronóstico de los Modelos.

<b>Modelo</b>	<b>MAE</b>	<b>RMSE</b>
Modelo 1	0.778	1.17
Modelo 2	1.12	1.48
Modelo 3	0.62	0.78

Los resultados obtenidos en la primera parte de la investigación dieron como resultado la selección de un modelo por tener el mejor desempeño en el pronóstico. Es importante mencionar que, aunque el modelo 3 funcionó muy bien para la fecha de la simulación, éste se usará en simulaciones para el pronóstico de distintas fechas y periodos de simulación con la intención de validar la capacidad que le modelo tiene para pronosticar.

## 5.2 Velocidades del viento

Las velocidades del viento de la Estación Meteorológica y las obtenidas con el Modelo eran para alturas de 10 metros sobre el terreno, así que con la Ley del Perfil Logarítmico se cuantificó el perfil vertical de la velocidad del viento para obtener la velocidad a la altura de la góndola del aerogenerador. El aerogenerador propuesto para este proyecto fue el seleccionado para el emplazamiento de la Tesis de Castañeda (2018) marca Siemens [37]; las especificaciones técnicas del modelo se detallan en la tabla 5.2:

**Tabla 5.2** Especificaciones Técnicas del Aerogenerador Siemens [37].

<b>Potencia nominal: 2,300.0 kW</b>	<b>Hélice diámetro: 113.0 m</b>
<b>Velocidad del viento de arranque: 3.0 m/s</b>	<b>Superficie del rotor: 10,000.0 m<sup>2</sup></b>
<b>Velocidad nominal del viento: 12.5 m/s</b>	<b>Número de hojas: 3</b>
<b>Velocidad del viento de corte: 25.0 m/s</b>	<b>Altura del buje: 99.5 m</b>

### 5.3 Estimación del Potencial Eólico

Una vez calculadas las velocidades del viento a la altura de la góndola del aerogenerador se calculó el Pronóstico a corto plazo de la potencia con la Metodología de Pronóstico Físico descrito en el Capítulo 3; para ello se utilizó la curva de potencia del aerogenerador que proporciona el fabricante, mostrada en la figura 5.2.

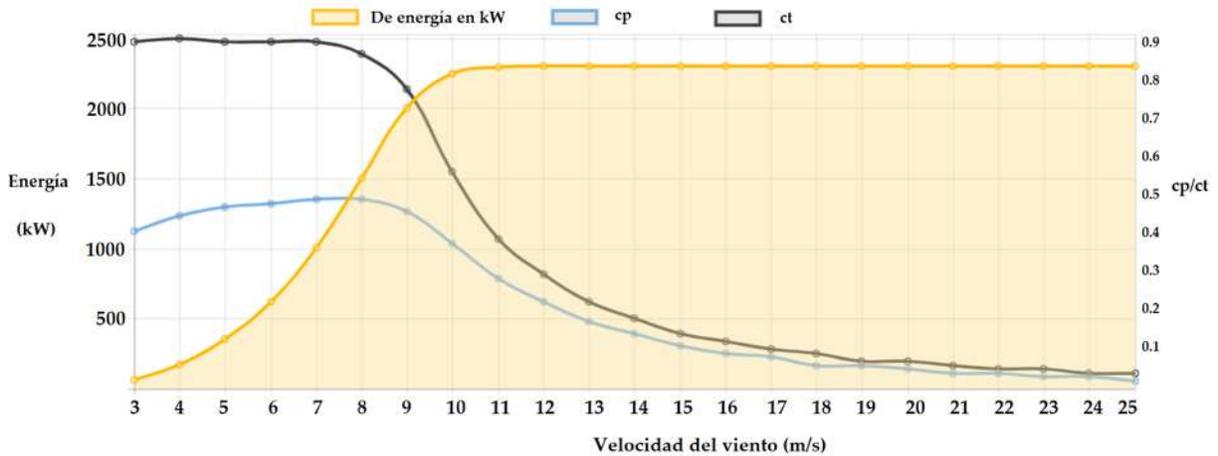


Figura 5.2 Curva de Potencia del Aerogenerador Siemens-swt-2.3-113 [37].

Para el cálculo de la potencia a diferentes velocidades se generaron ecuaciones de recta en tramos conocidos de velocidad con su correspondiente energía, tomados de la curva de potencia. Con la ayuda de las hojas de cálculo de Excel se establecieron funciones lógicas anidadas para el cálculo de la potencia a las diferentes velocidades de viento para asegurar que, las Potencias se calcularan dentro de los rangos de valores de las ecuaciones tomado en cuenta la velocidad de arranque y de corte para el aerogenerador; finalmente se llevó a cabo el cálculo de los intervalos de predicción que se plasman en las series temporales de las Potencias en las gráficas 1 a la 24 mostradas a continuación.

Para efectos de visualización de los resultados, se graficaron las potencias en kW para observar claramente las diferencias entre el pronóstico y el resultado del modelo.

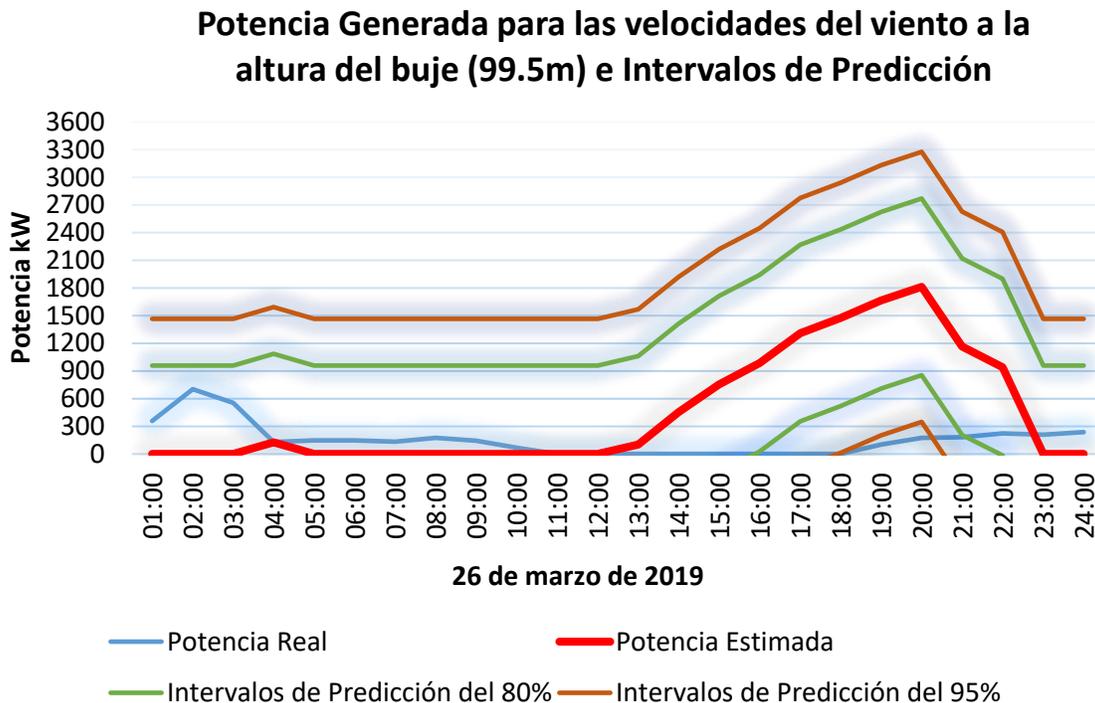
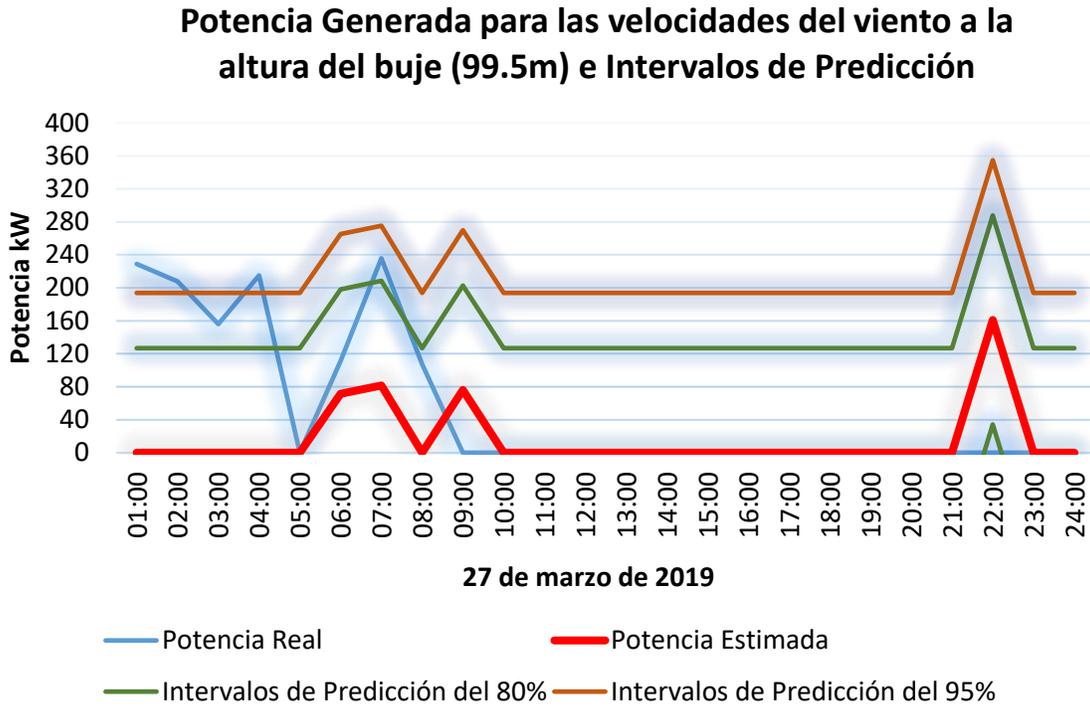


Figura 5.3 Generación de energía eólica 26-mar-2019.

En la figura 5.3 (26-marzo-2019) la potencia real y la pronosticada difieren en 1 MW, se puede observar que la serie de tiempo de la potencia y la pronosticada tienen tendencias parecidas en las primeras horas del día hasta las 13:00 horas, quedando la potencia pronosticada por encima de la real entre las 13:00 y 19:00 horas.



**Figura 5.4** Generación de energía eólica 27-mar-2019.

La figura 5.4 (27-marzo-2019) muestra diferencias de potencia menores de 0.25 MW, sin embargo, es importante mencionar las bajas velocidades que se mostraron tanto en los registros de la estación como en los estimados por el modelo, las series de tiempo mostraron una tendencia parecida, a excepción de pequeños intervalos al inicio y al final del día.

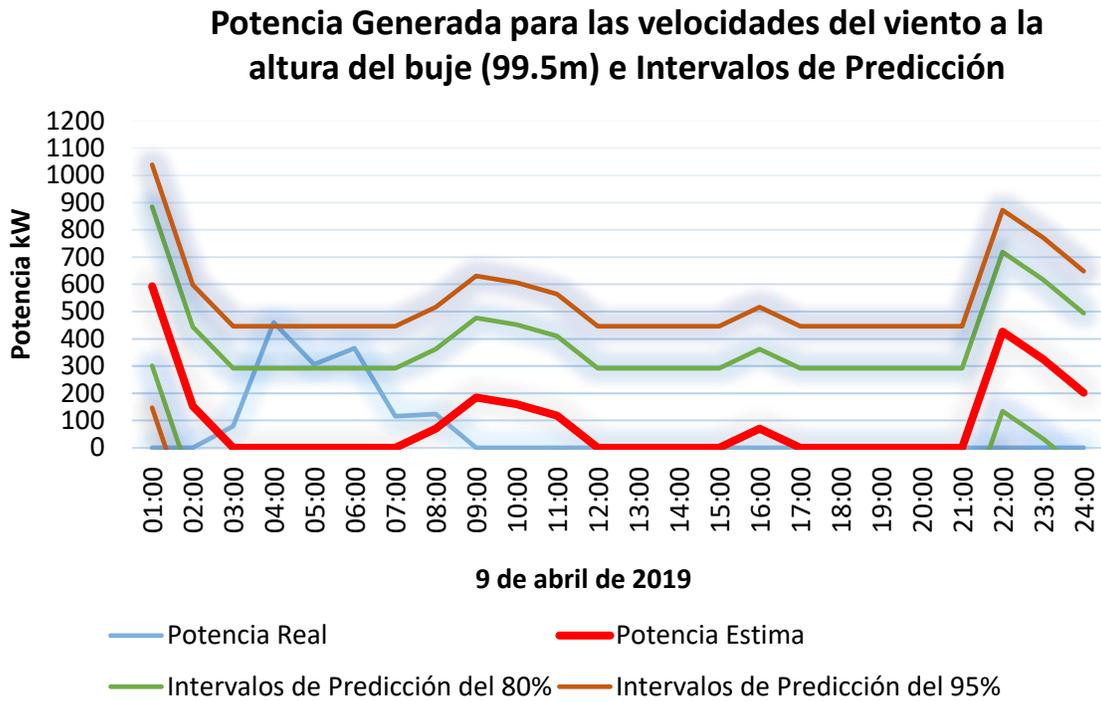
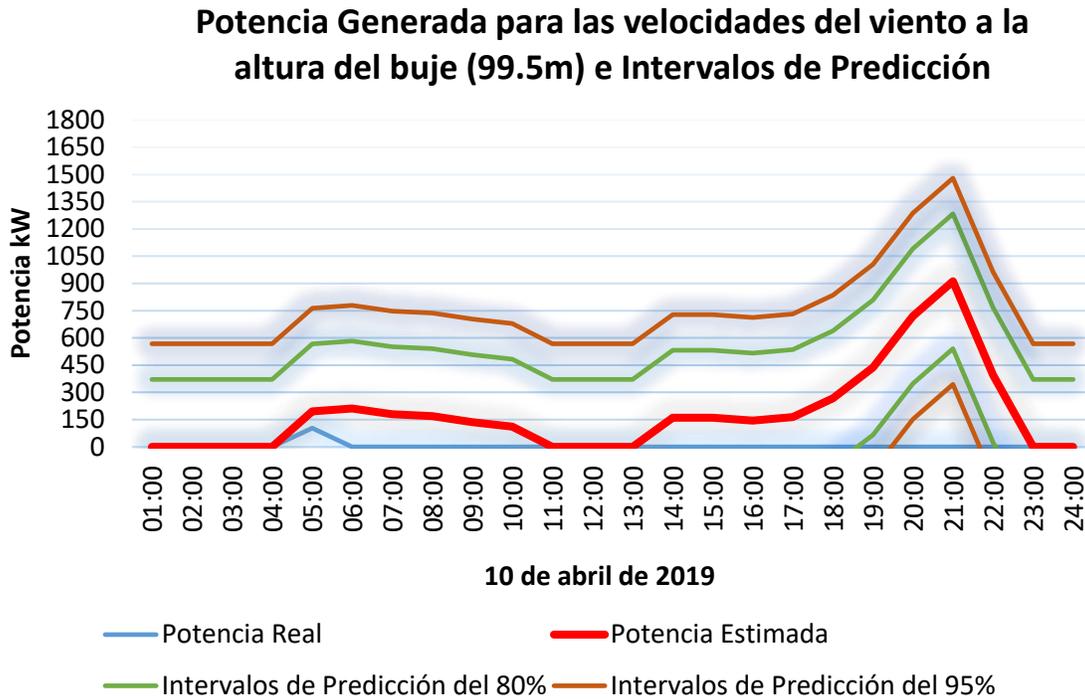


Figura 5.5 Generación de energía eólica 9-abr-2019.

Para la figura 5.5 (9-abril-2019) se observa pocas horas con velocidad suficiente para generar energía, por ello la potencia real y la estimada se asemejaron en el pronóstico.



**Figura 5.6** Generación de energía eólica 10-abr-2019.

En relación a la figura 5.6 (10-abril-2019) se observa que la potencia real fue mínima ya que la estación registro velocidades muy bajas de viento, todas insuficientes para la generación de energía, en cambio para la potencia pronosticada si hubo velocidades suficientes para la generación y esta sobrestimó la potencia en comparación a la potencia real.

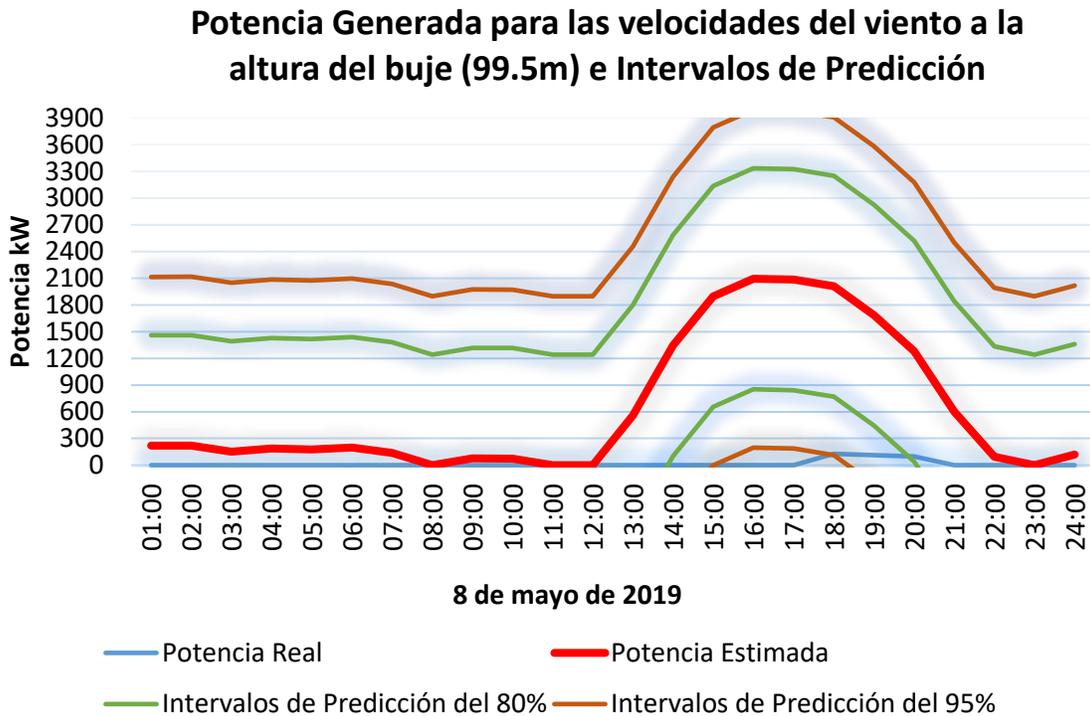
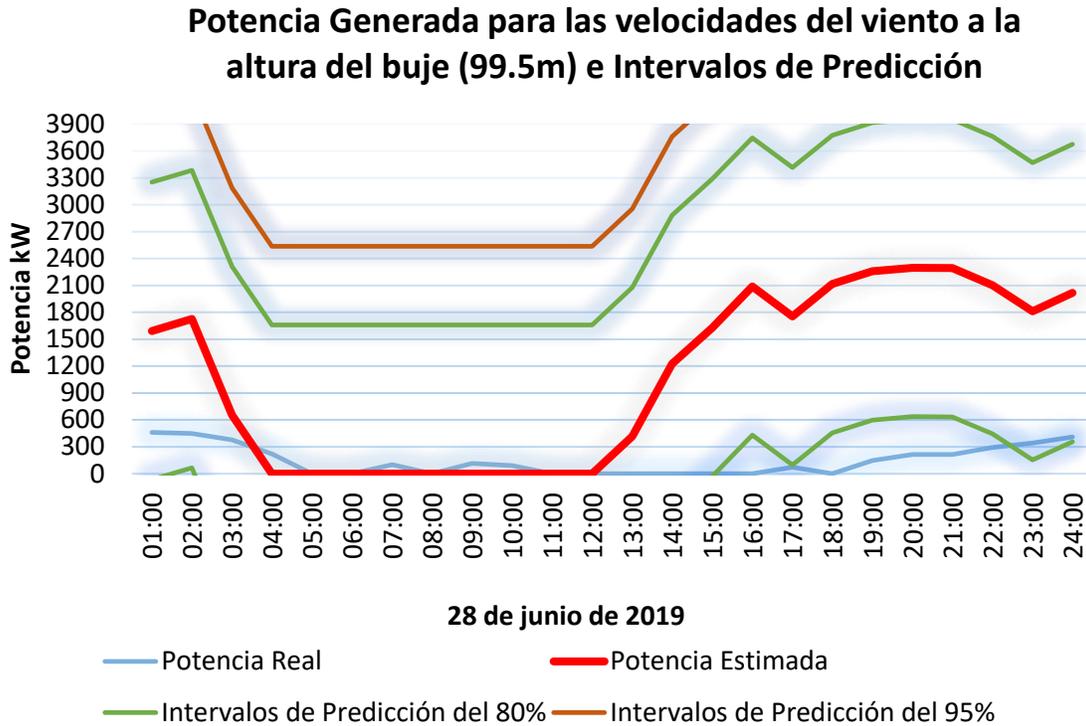


Figura 5.7 Generación de energía eólica 8-may-2019.

Para la figura 5.7 (8-mayo-2019) la potencia real fue mínima en comparación con la potencia pronosticada que llego a ser hasta de 2.1 MW.





**Figura 5.9** Generación de energía eólica 28-jun-2019.

Se observa que para para la figura 5.9 (28-junio-2019) con resultados sobrestimados del pronóstico de la potencia al final del día, tuvo un comportamiento muy similar durante las 3:00 y las 12:00 horas.



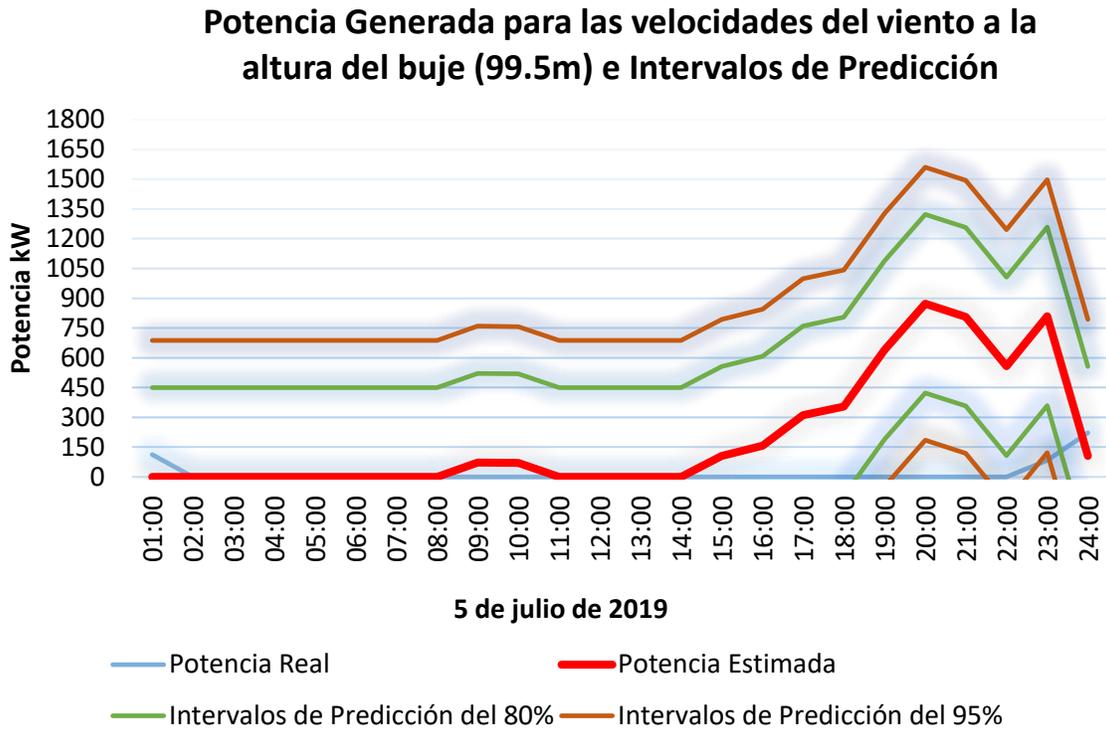


Figura 5.11 Generación de energía eólica 5-jul-2019.

Para la figura 5.11 (5-julio-2019) se presentaron velocidades bajas observadas que generaron poca potencia real al igual que con el modelo entre la 1:00 y las 14:00 horas del día, aunque el modelo pronosticó un aumento en la potencia en las últimas horas del día.

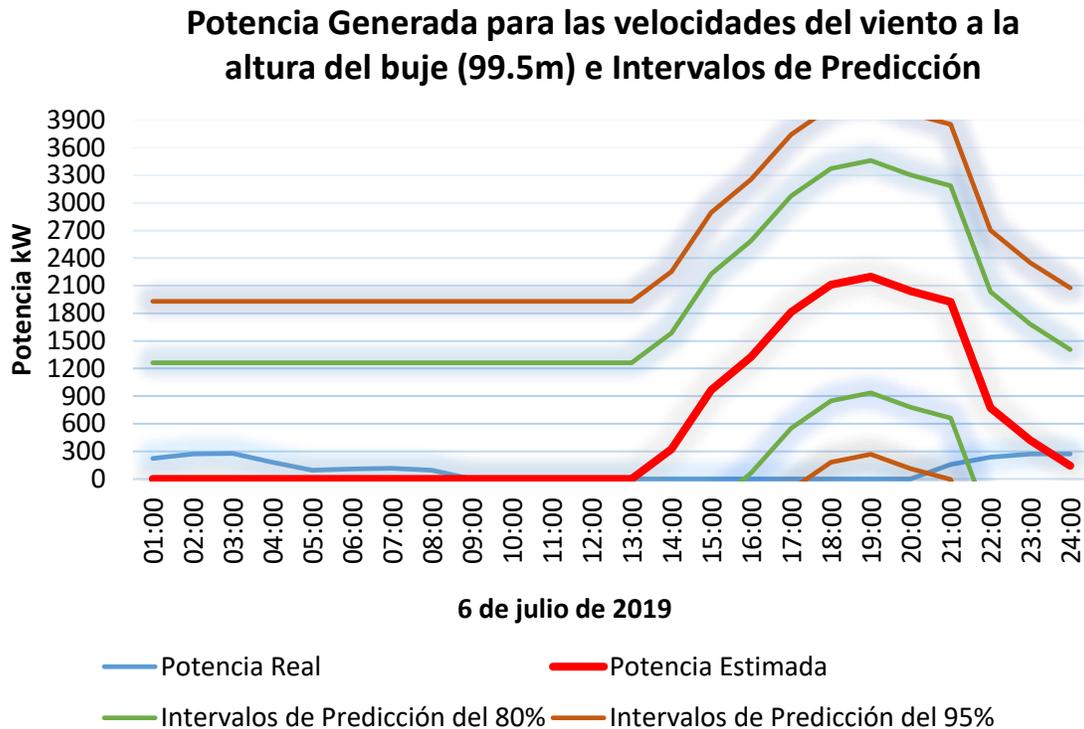


Figura 5.12 Generación de energía eólica 6-jul-2019.

En la figura 5.12 (6-julio-2019) se observan comportamiento similares de las series de tiempo desde el inicio del día hasta las 14:00 horas, después de este intervalo de tiempo el modelo obtuvo grandes diferencias de generación de potencia alcanzando valores de hasta 2.2 MW.

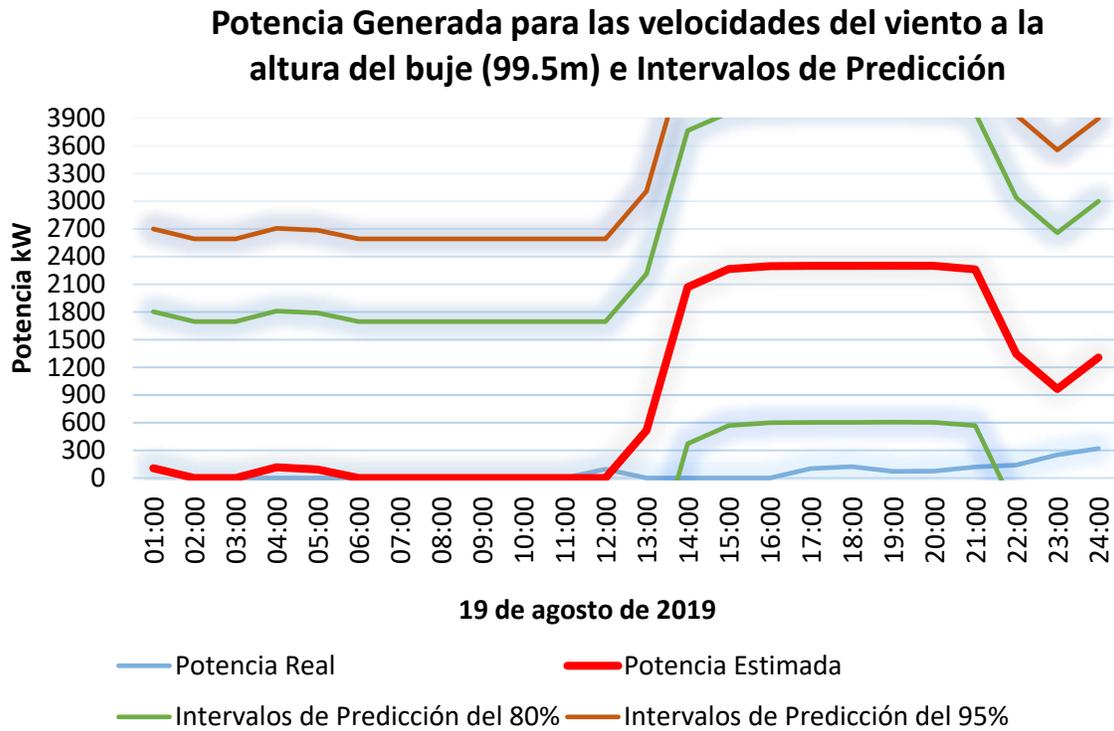
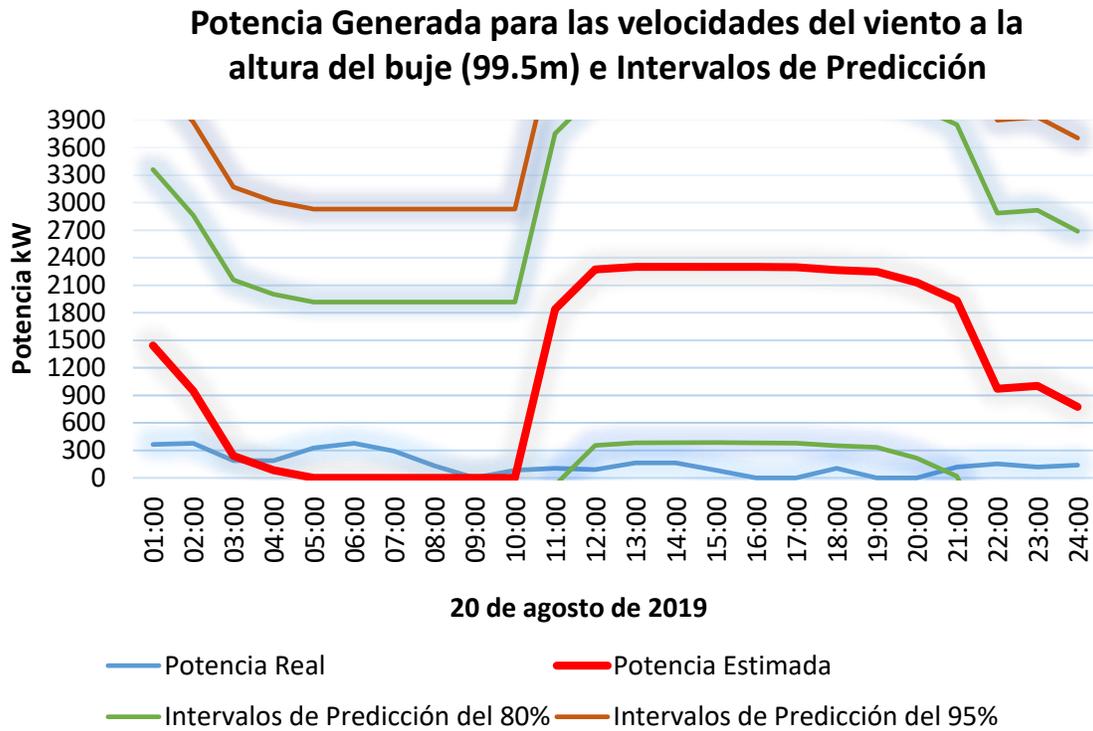


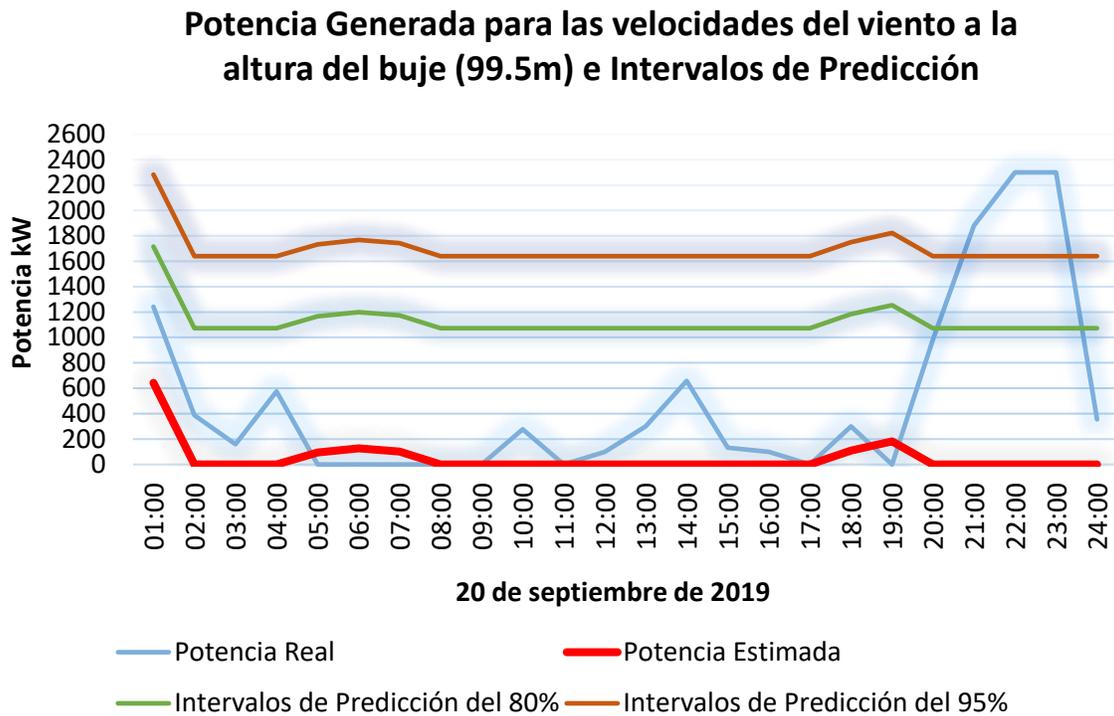
Figura 5.13 Generación de energía eólica 19-ago-2019.

En la figura 5.13 (19-agosto-2019) se observa un comportamiento similar de las series de tiempo al inicio del día, sin embargo, el modelo pronosticó potencias con valores de hasta 2.3 MW muy por encima de la potencia real para las horas después del medio día.



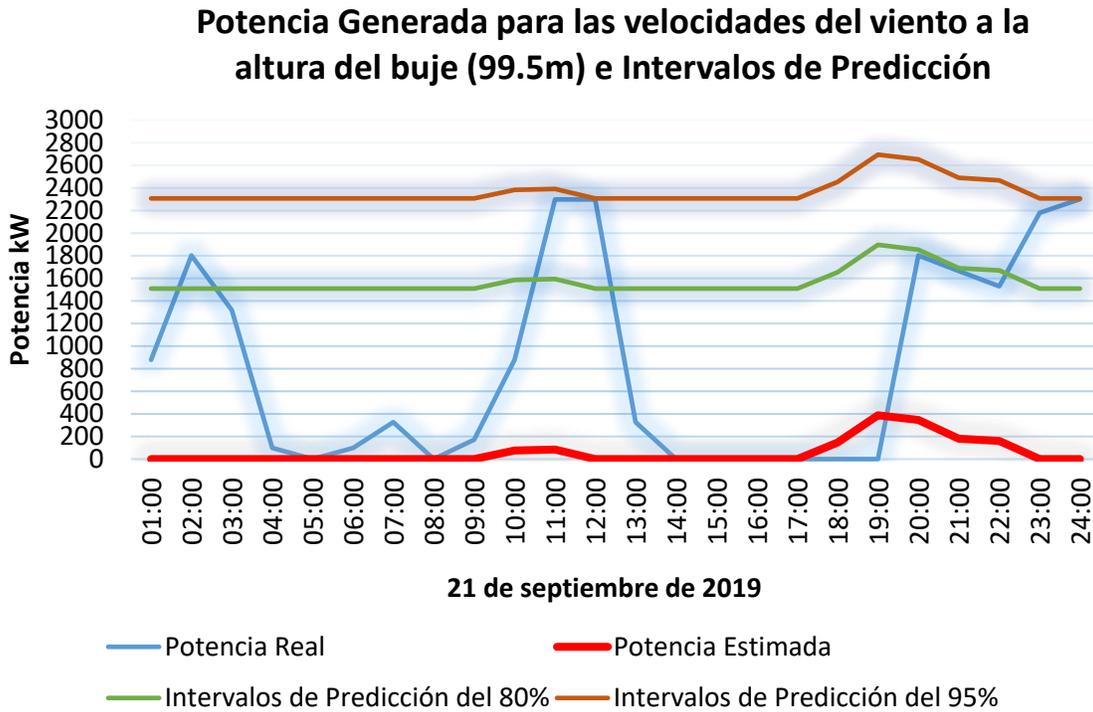
**Figura 5.14** Generación de energía eólica 20-ago-2019.

La figura 5.14 (20-agosto-2019) muestra una sobre estimación del modelo con generación total de 29.641 MW contra 3.566 MW de potencia real.



**Figura 5.15** Generación de energía eólica 20-sep-2019.

En la figura 5.15 (20-sep-2019) se observa un cambio en el comportamiento de las series de tiempo tanto real como pronosticada, ambas tuvieron tendencias contrarias a lo que se venía observando. Para el caso de la potencia real aumentaron considerablemente las potencias a cada hora obteniéndose un total de potencia generada de 12.043 MW, contrario a la potencia pronosticada de 1.258 MW la cual representa una gran disminución en comparación con los pronósticos de potencia de fechas anteriores.



**Figura 5.16** Generación de energía eólica 21-sep-2019.

Para la figura 5.16 (21-sep-2019) se observa un aumento en la potencia real y una disminución importante para la potencia pronosticada lo cual sugieren una revisión del modelo.

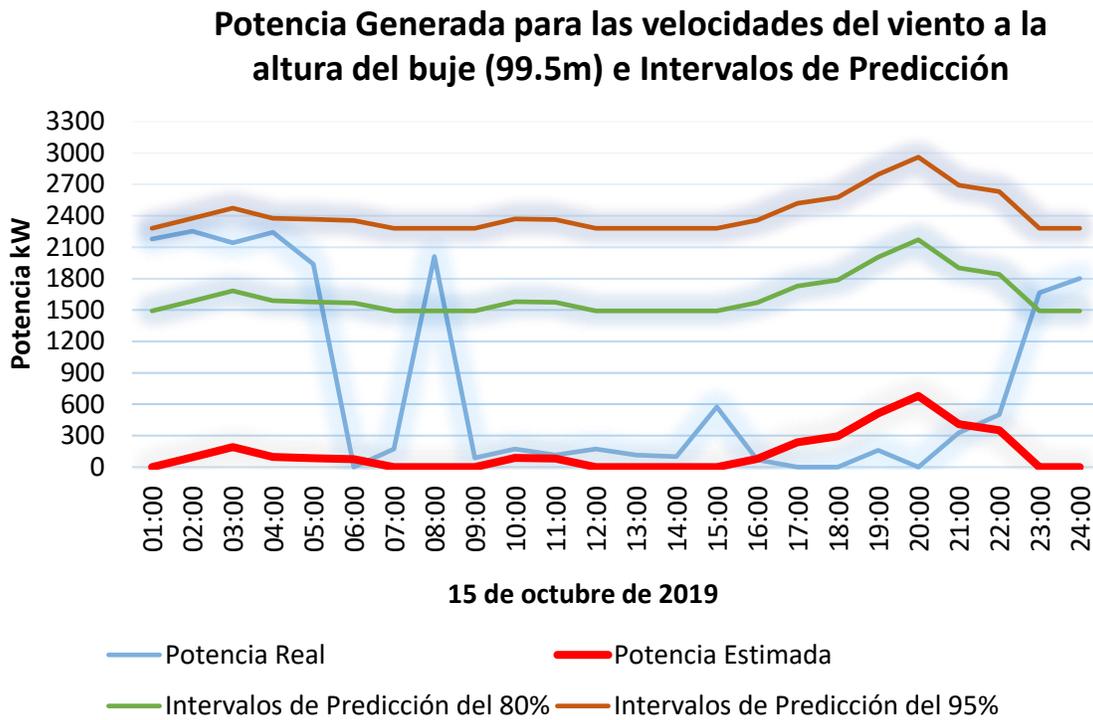


Figura 5.17 Generación de energía eólica 15-oct-2019.

Se observa que para la figura 5.17 (15-oct-2019) persiste el comportamiento del modelo con bajos valores de potencia que en comparación con la potencia real arroja valores altos.

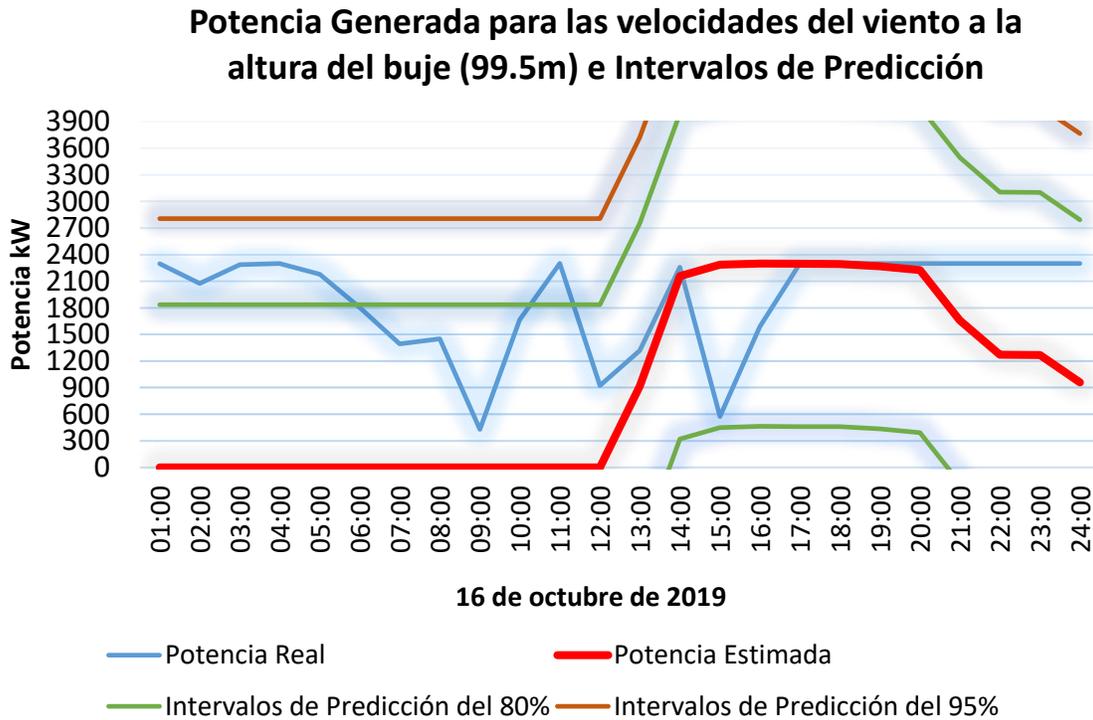


Figura 5.18 Generación de energía eólica 16-oct-2019.

Para la figura 5.18 (16-oct-2019) se mantienen valores altos de potencia real y la potencia estimada comienza a aumentar para las horas después del medio día asemejándose al comportamiento de ambas series.

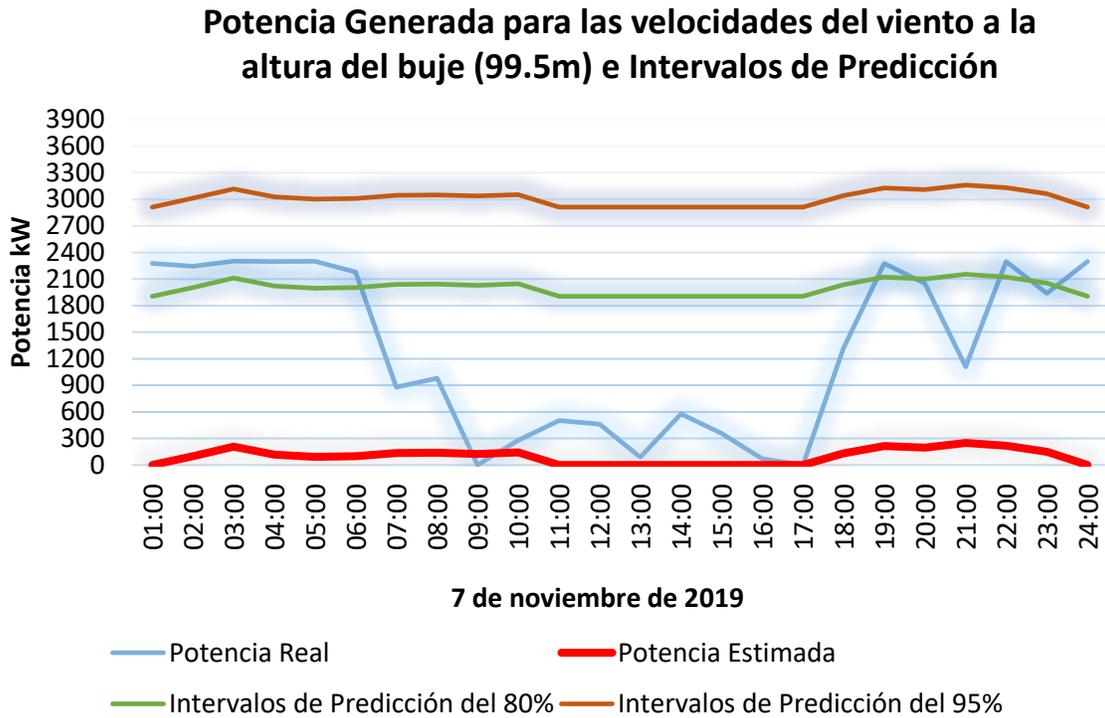


Figura 5.19 Generación de energía eólica 7-nov-2019.

Para la figura 5.19 (7-nov-2019) la potencia real tuvo potencias máximas de 2.3 MW mientras que la pronosticada obtuvo valores muy bajos para la potencia.

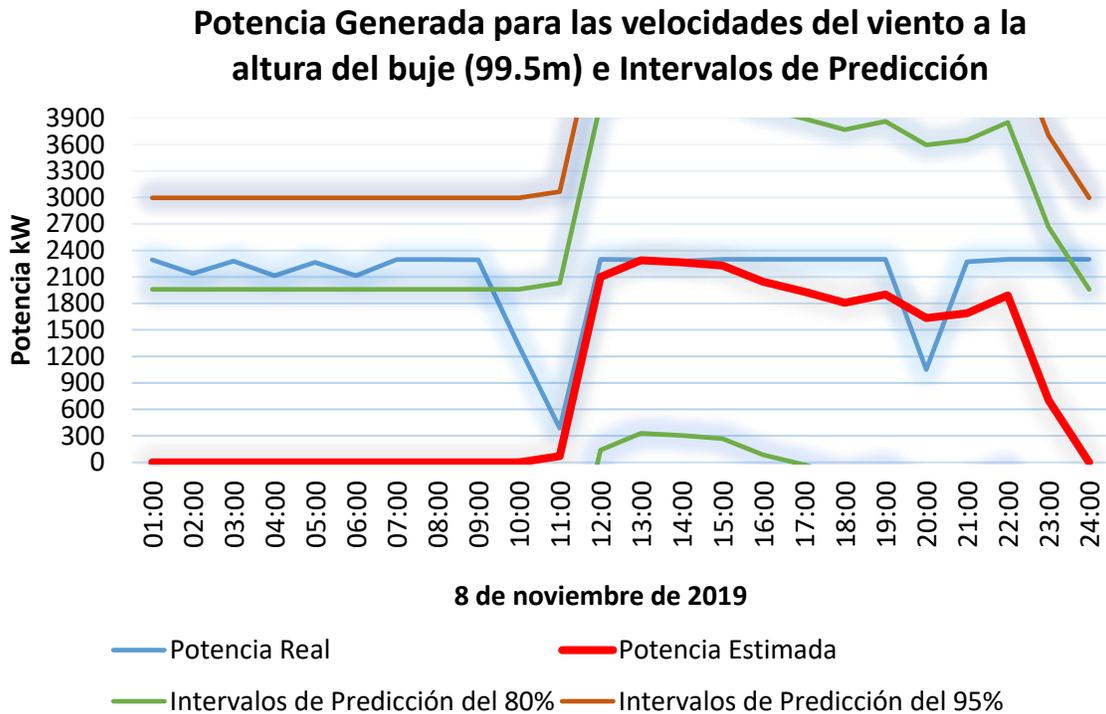
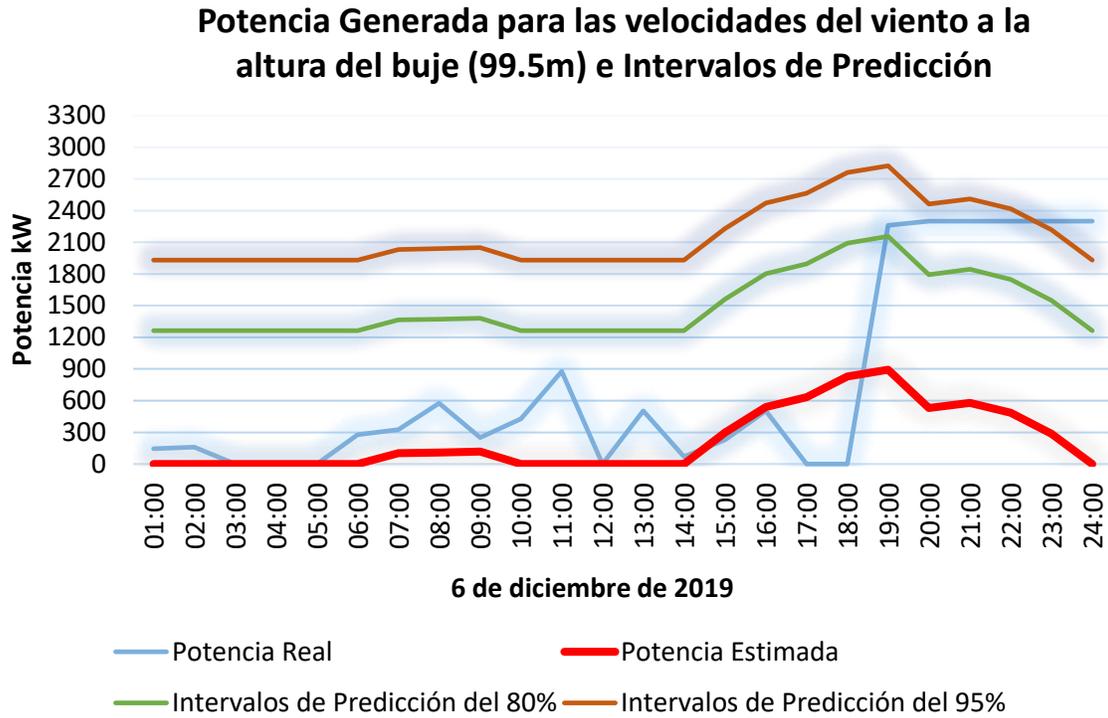


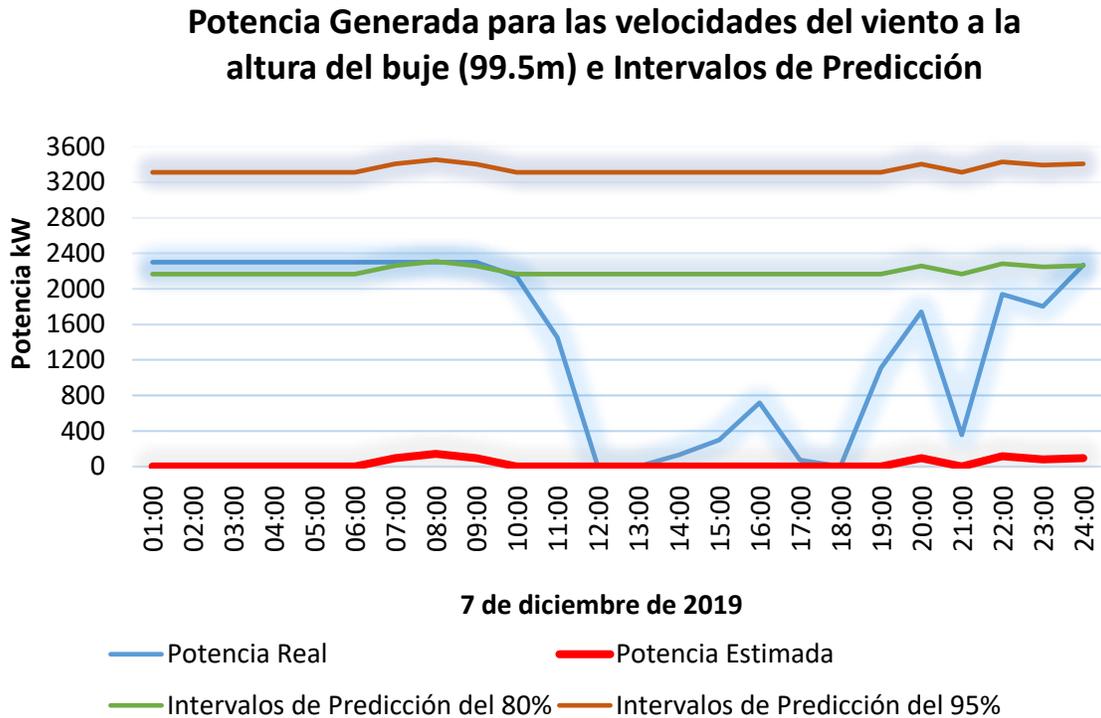
Figura 5.20 Generación de energía eólica 8-nov-2019.

En la figura 5.20 (8-nov-2019) se observa que tanto la potencia real como la pronosticada se asemejan mucho en sus valores entre las 12:00 y las 22:00 horas, aunque en las potencias totales generadas la potencia real es el doble de la pronosticada.



**Figura 5.21** Generación de energía eólica 6-dic-2019.

La serie de tiempo de la potencia real que se observa en la figura 5.21 (6-dic-2019) muestra un comportamiento constante de generación de energía en comparación con las últimas fechas, el pronóstico sin embargo ha tenido cambios drásticos en el pronóstico de generación con variaciones desde el mes de agosto con bajos resultados de generación.



**Figura 5.22** Generación de energía eólica 7-dic-2019.

En la figura 5.22 se observa el pronóstico de generación casi nulo, y el real con valores de hasta 2.3 MW entre la 1:00 y las 12:00 horas.

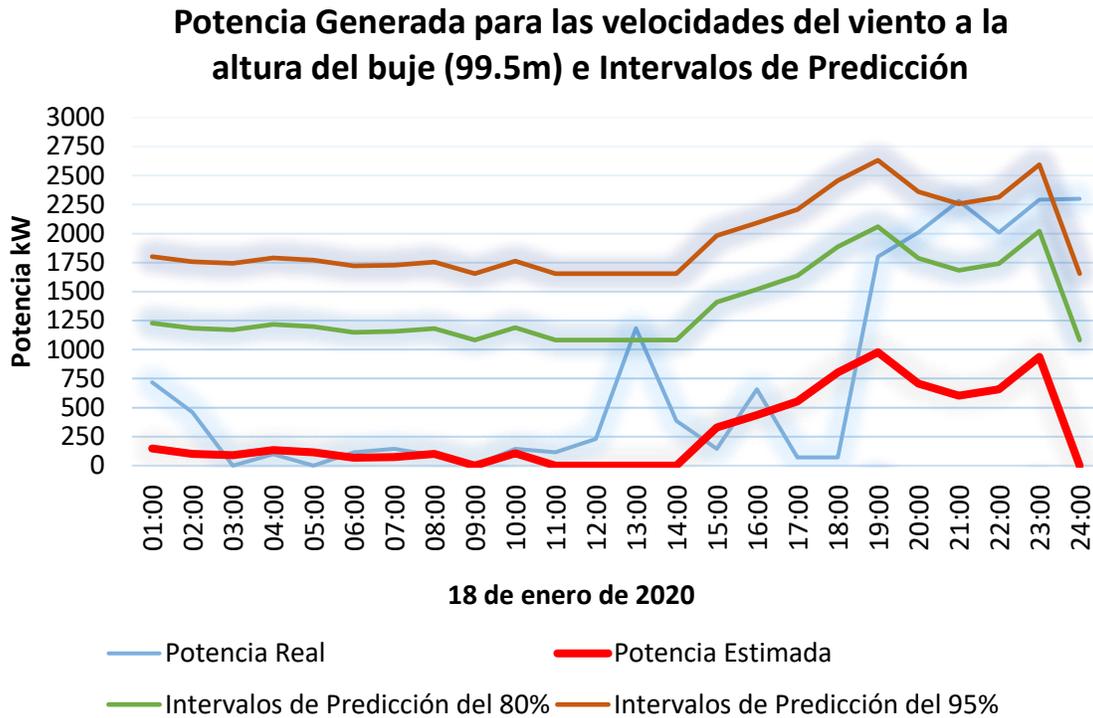
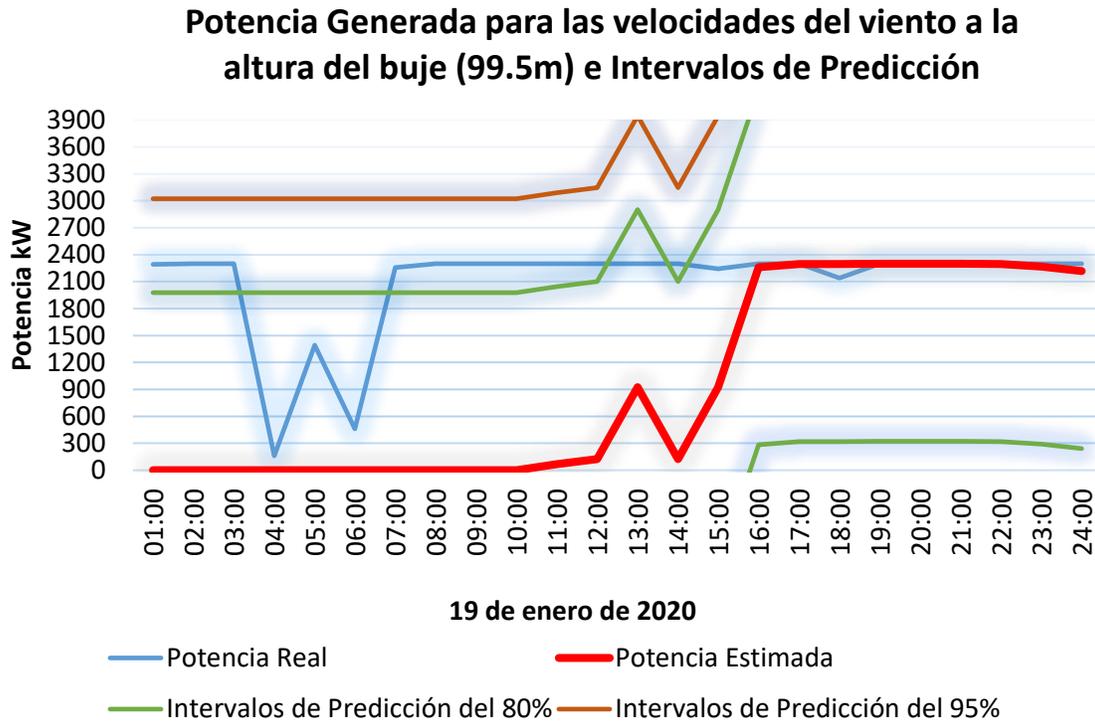


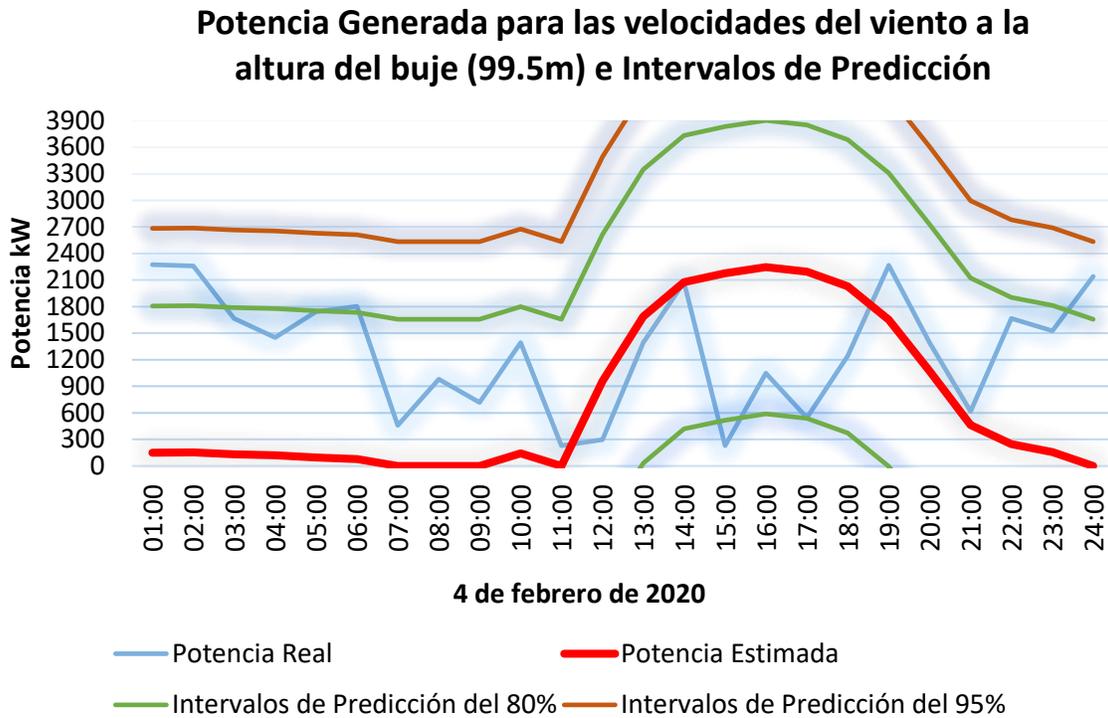
Figura 5.23 Generación de energía eólica 18-ene-2020.

Para la figura 5.23 (18-ene-2020) se observan tendencias parecidas entre la potencia real y la pronosticada aunque al final del día tienen diferencias mayores a 1 MW ambas tienen aumentos en la generación de energía.



**Figura 5.24** Generación de energía eólica 19-ene-2020.

De la figura 5.24 (19-ene-2020) la potencia real está por encima de la pronosticada en las primeras 12 horas del día después de este lapso de tiempo ambas obtienen valores casi iguales de la generación de energía.



**Figura 5.25** Generación de energía eólica 4-feb-2020.

Finalmente, para la figura 5.25 (4-feb-2020) se observa que la potencia real es aproximadamente el doble de la pronosticada subestimando nuevamente el modelo la potencia.



Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

Es importante mencionar que, en todas las figuras de potencia de los días propuestos para la simulación, los resultados del pronóstico acompañados de sus respectivos intervalos de predicción, englobaron dentro del intervalo del 80% la mayoría de las potencias reales, a excepción de algunas que quedaron parcialmente dentro del intervalo del 90%, con muy pocos valores fuera estos. La sobre estimación del modelo se observó mayormente en las últimas horas del día, sin embargo, la variabilidad del viento en el lugar según información obtenida corresponde al comportamiento que presenta el modelo. De igual forma es importante mencionar que los datos obtenidos de CONAGUA de las velocidades del viento eran poco confiables según la información otorgada, por ello es necesario gestionar datos de observaciones más confiables.

# Capítulo 6

## 6. Conclusiones y Recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

Después de haber llevado a cabo una revisión bibliográfica para conocer el funcionamiento del Modelo de Predicción Numérica del Tiempo WRF se logró desarrollar un modelo acorde con las condiciones climatológicas y topográficas de un campo eólico en la presa de Tepuxtepec municipio de Contepec en el estado de Michoacán. Se probaron esquemas de parametrizaciones que parecieron ser las más adecuadas para el sitio y se calcularon las velocidades del viento para los 24 días propuesto del año, obteniendo en su mayoría resultados del pronóstico desde excelente hasta aceptable en comparación con las velocidades reales de la estación meteorológica. Las velocidades del viento pronosticadas por el modelo y las velocidades reales de la estación se extrapolaron a la altura de la góndola del aerogenerador Siemen-swt-2.3-113 y se combinaron con la curva de potencia para obtener los pronósticos de generación de un día en adelante. Para el pronóstico operativo se requiere dar además los Intervalos de Predicción por lo que se calcularon para las potencias de cada día y se observó que en su mayoría la potencia real quedó dentro del intervalo del 80%. Con esto se concluye que se logró hacer el pronóstico a corto plazo de la potencia generada para un parque eólico en Tepuxtepec, Michoacán, acorde con lo estipulado en las normas de participación del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM).

## 6.2 Recomendaciones

No se puede asegurar que un modelo será siempre el adecuado para un sitio dado sin hacer la validación del mismo. Por ello es importante seguir investigando las posibles fuentes de error del modelo y las formas de corregir tales errores. Por lo tanto, este modelo puede ser mejorado en aquellos meses en los que presento mayores desviaciones del pronóstico con respecto a la potencia real. Sin embargo, el modelo obtuvo buenos resultados y se considera al menos bueno según los resultados del análisis cuantitativo.

Es importante mejorar el modelo probando otras configuraciones como una mayor resolución del modelo tanto espacial como temporal.

Probar datos de reanálisis de mejores características y obtener mediciones de estaciones meteorológicas más confiables.

Una buena prueba sería obtener datos de velocidades a la altura de la góndola para calcular la potencia y analizar los resultados.

Un estudio más detallado del sitio acorde con las horas del día y los meses del año podrían dar distintos conjuntos de parametrizaciones para mejorar los resultados del pronóstico durante las distintas estaciones del año.

# Apéndice 1

## Requisitos e Instalación del Software

En la guía de usuario de WRF se encuentra un apartado de los pasos para compilar el programa y llevar a cabo previamente los procesos necesarios para garantizar que el entorno informático esté configurado correctamente, cumpliendo con los siguientes requisitos del sistema:

- Tener un compilador gfortran, así como gcc y cpp.
- El sistema de compilación de WRF tiene secuencias de comandos de nivel superior para la interfaz de usuario.

Se debe llevar a cabo la instalación de las Bibliotecas que se enlistan a continuación:

- mpich-3.0.4
- netcdf-4.1.3
- Jasper-1.900.1
- libpng-1.2.50
- zlib-1.2.7

Una vez instaladas las bibliotecas se hacen pruebas para comprobar su compatibilidad y que estas puedan funcionar para las compilaciones de WPS y WRF.

Después de asegurarse del correcto funcionamiento de las bibliotecas se puede compilar WRF.

Se obtiene el código fuente de WRF para su compilación y el programa WPS, de la página [https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get\\_source.html](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_source.html).

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

Para simulaciones reales se crea la ubicación del dominio en el mundo y la información estática del lugar, para esto se requiere un conjunto de datos que incluyan la topografía y la categoría del uso del suelo. Los datos disponibles se encuentran en la página:

[http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get\\_sources\\_wps\\_geog.html](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_sources_wps_geog.html)

ARWpost es un programa Fortran que lee archivos de entrada y salida WRF-ARW y luego genera archivos de salida GrADS .

El código fuente del paquete ARWpost está disponible en la página de descarga:

[http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get\\_source.html](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_source.html)

Una vez compilado ARWpost se creará el ejecutable.

Para la visualización de los resultados después del posprocesamiento se descarga el software de visualización GrADS de la página de descarga:

<http://cola.gmu.edu/grads/>

# Apéndice 2

## Ejecución del Modelo ARW

### Ejecución de WPS

En el directorio WPS se edita el archivo `namelist.wps` acorde con el sitio y las fechas de simulación.

Antes de ejecutar `geogrid`, debe estar `geog_data_path` establecida en la ubicación donde colocan los datos geográficos estáticos.

```
./geogrid.exe >& registro.geogrid
```

Se debe crear un archivo `geo_em*` para cada dominio, para ejecutar `ungrib` y se vinculan los datos GFS de entrada:

```
./link_grib.csh ruta_GFS
```

Se enlaza la Vtable correcta:

```
ln -sf ungrib/Variable_Tables/Vtable.GFS Vtable
```

Luego se ejecuta `ungrib`:

```
./ungrib.exe
```

Se generan archivos con el prefijo "ARCHIVO" o con el prefijo que se halla asignado en la configuración.

Se ejecuta `metgrid`:

```
./metgrid.exe >& registro.metgrid
```

Se generan archivos con el prefijo `met_em*` para cada uno de los períodos de tiempo en los que se está ejecutando.

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

## Ejecución de WRF

Entre al directorio `WRF` y luego al directorio `run/`.

```
cd ../WRF/run
```

Antes de ejecutar el programa `"real"`, se modifica el archivo `namelist.input` para el caso particular que se está simulando. Se copian o vinculan los archivos `met_em*` en el directorio de trabajo:

```
ln -sf ../../WPS/met_em*
```

Se pueden copiar los archivos, en lugar de vincularlos, usando el comando `cp`, en lugar del comando `ln -sf`.

Se ejecuta el programa `"real"`.

```
./real.exe
```

Se verifican los archivos `"rsl"` para asegurarse de que la ejecución fue exitosa:

```
rsl.error.0000
```

Deben generarse un archivo `wrfbdy_d01` y un archivo `wrfinput_d0*` para cada uno de sus dominios.

Se ejecuta `WRF`:

```
./wrf.exe
```

Se genera el o los archivos `wrfout*` según la configuración, los cuales deberán ser copiados al directorio de `ARWpost` para ser procesados con el programa.

```
./ARWpost.exe
```

Se generan archivos de salida para su interpretación en el programa de interpretación y visualización `GrADS`.

# Publicaciones

## Cartel para Congreso

Se publicó un cartel para el congreso del Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación (ICTI) en octubre de 2021, a continuación, se anexan las imágenes de la constancia de participación y del cartel.





16 CONGRESO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN



10 Encuentro de Jóvenes Investigadores del Estado de Michoacán

20-21-22 OCTUBRE 2021

Escuela Superior Tecnológica de Aguascalientes

## Modelación Numérica del Viento en Tepuxtepec, Michoacán

Itzaguerí García Rodríguez<sup>1</sup>, Erasmo Cadenas Calderón<sup>2</sup>, Luis Béjar Gómez<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; [9602418a@umich.mx](mailto:9602418a@umich.mx), <sup>2</sup> Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; [ecadenas@umich.mx](mailto:ecadenas@umich.mx), <sup>3</sup> Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; [luis.bejar@umich.mx](mailto:luis.bejar@umich.mx)

### Introducción

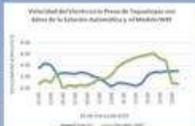
La energía eólica ha aumentado su participación en la matriz eléctrica en nuestro país, haciendo necesaria la generación de pronósticos de la velocidad del viento para poder integrarla a la red. Esta investigación aportará beneficios como demostrar la posibilidad de realizar en México modelos de calidad para pronosticar la velocidad del viento, para Pronósticos de Generación.

### Materiales y Métodos

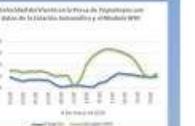
La metodología usada fue un Modelo Numérico de Predicción Meteorológica de mesoescala llamado WRF que es el acrónimo en inglés de Weather Research and Forecasting Model. El programa GRADS, seleccionado para esta investigación, herramienta que se utilizó para facilitar el acceso, manipulación y visualización de los resultados. El sitio de estudio: Tepuxtepec, Michoacán, que cuenta con potencial eólico.

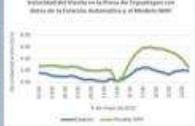
### Resultados

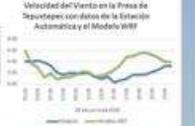
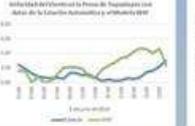
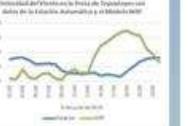
Se presentan los resultados de 10 días de simulación.









### Conclusiones

El modelo configurado para el sitio tiene un desempeño en el pronóstico del viento Bueno. El modelo se usará para Pronósticos de Generación Eólica, como una opción al problema de la falta de pronósticos confiables que sirvan para la integración de esta energía a la red eléctrica.

Fecha de simulación	MAE	RMSE
26/08/2019	2.37	3.72
27/08/2019	0.74	0.89
29/04/2019	2.38	3.72
10/04/2019	0.74	0.89
8/05/2019	2.27	3.85
9/05/2019	2.07	3.32
28/06/2019	2.50	2.99
29/06/2019	1.62	2.08
5/07/2019	1.51	1.54
6/07/2019	2.38	2.99

#### REFERENCIAS

Castañeda, J. C. "Emplazamiento eólico incorporado a la red eléctrica en el Estado de Michoacán". Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México. 2018. Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM16michoacan/municipios/16017a.html>

GWEC-Global-Wind-Report-2021, consultada por Internet el 30 de junio 2021. Dirección de Internet: <https://gwec.net/buenas-perspectivas-para-la-energia-eolica-800-gw-en-2021-segun-gwec/>

Manwell, J. G. (2009). Wind Energy Explained (Vol. second edition). USA: John Wiley & Sons Ltd J.F. Mandivel

Saha, S. y col. 2010. Productos de 6 horas de análisis del sistema de pronóstico del clima (CFR) del NCEP, enero de 1979 a diciembre de 2010. Archivo de datos de investigación en el Centro Nacional de Investigación Atmosférica, Laboratorio de Sistemas Computacionales y de Información, Consultado por internet durante el mes de agosto de 2021. Dirección de Internet: <https://doi.org/10.5065/D69K487J>

Secretaría de Energía. Informe Pormenorizado sobre el desempeño y las tendencias de la Industria Eléctrica Nacional 2017. Noviembre 2018. consultada por internet el 14 de enero de 2021. Dirección de internet: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/data/file/415850/Informe\\_Industria\\_Electrica\\_20\\_17.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/data/file/415850/Informe_Industria_Electrica_20_17.pdf)

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

## Artículo para Academia Journals

Se publicó un artículo para el Congreso Virtual de Academia Journals en octubre de 2021, a continuación, se anexan imágenes del certificado y el extenso del artículo.



## Predicción de la Velocidad del Viento Utilizando Modelación Numérica

Ing. Itzagueri García Rodríguez<sup>1</sup>, Dr. Erasmo Cadenas Calderón<sup>2</sup>,  
Dr. Luis Béjar Gómez<sup>3</sup>

**Resumen**— Se presenta la generación de un modelo de mesoescala destinado a la predicción a corto plazo de la velocidad del viento. Para generar el modelo numérico, se utilizó el software Weather Research and Forecasting (WRF), con el cual se conformaron 3 modelos de configuraciones distintas. Para probar el modelo seleccionado, se simuló dos días de los meses de abril y mayo del año 2019, utilizando datos de reanálisis del sistema de pronóstico del clima (CFSR), obtenidos del Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas (NCAR), además se cuenta con datos de una estación meteorológica automática de la Comisión Nacional del Agua ubicada en Tepuxtepec Michoacán, en donde de acuerdo a estudios preliminares existe recurso eólico aprovechable. Para la validación de los modelos se utilizaron las medidas de error de pronóstico denominadas error medio absoluto (MAE) y la raíz cuadrada del error cuadrado medio (RMSE), las cuales confirmaron el modelo número 3 como el que mejor ajuste presenta, confirmando la importancia de la configuración del modelo en los parámetros relacionados con el dominio, la resolución, las horas de simulación, el número de niveles en la vertical, el tiempo de paso, el nivel de presión y el grosor en superficie.

**Palabras clave**—Predicción a corto plazo, Modelación numérica, WRF, Energías Renovables Variables, Velocidad del Viento.

### Introducción

Para 2020, la capacidad acumulada de energía eólica instalada en el mundo fue de casi 743 GW, mostrando un crecimiento del 53%, instalando más de 93 GW de energía eólica. China con el mercado más grande de energía eólica instalada, tiene una capacidad de más de 237 GW, seguida de Estados Unidos con 96.4 GW y Alemania con 59.3 GW, que la posiciona como el país con capacidad de energía eólica instalada más alta de Europa (GWEC, 2021).

Actualmente México tiene una capacidad total instalada de 86 GW, de los cuales aproximadamente 13 GW son centrales de Energías Renovables Variables (ERv). Del total de ERv, el 55% corresponde a energía eólica y el 45% a energía solar fotovoltaica (SENER, 2018). La reforma energética de 2013 realizada en México, los compromisos contraídos por el país respecto del Acuerdo de París y el decrecimiento en el precio de las tecnologías para aprovechar estos recursos, entre otros factores, han permitido un aumento significativo en la participación de las ERv para la generación de energía eléctrica en nuestro país.

Sabemos que la energía eléctrica, que se puede generar aprovechando el recurso eólico, no puede ser almacenada en grandes cantidades, por lo cual la demanda se debe satisfacer casi de forma instantánea, he aquí la importancia de comprender la necesidad de poder prever la cantidad de viento, y a su vez el Pronóstico de la Potencia generada.

A partir de la implementación de la reforma en el año 2014, el CENACE (Centro Nacional de Control de Energía), exige a los concesionarios que entreguen el pronóstico de la potencia generada por cada unidad de generación de ERv, por lo que ha sido necesario que éstos implementen estrategias para generar modelos para pronosticar. De acuerdo con la ley, es obligación para los concesionarios disponer de dos tipos de pronósticos, el primero, denominado intermitente-horario, que debe tener un horizonte temporal de siete días y es utilizado para planificar el despacho de energía a mediano plazo; el segundo, denominado intermitente-quinceminutal, el cual debe tener un horizonte de 2.5 horas, utilizado para el despacho de energía a corto plazo (SENER, 2020).

La alta desviación de los pronósticos que se entregan a los sistemas encargados del despacho de energía hacia la red eléctrica en México, ha limitado el aumento de la penetración de la energía eólica en el país. Debido a la problemática establecida anteriormente, se lleva a cabo la presente investigación, la cual consiste en la generación de un modelo para pronosticar la velocidad del viento a corto plazo, en Tepuxtepec, Michoacán.

Tepuxtepec, Michoacán, tiene un potencial eólico aprovechable en el que, de acuerdo con un estudio previo, tiene una velocidad promedio anual del viento de 5.7 m/s (a la altura del buje del aerogenerador) y es posible instalar una central eólica (Castañeda, 2018). El modelo para pronosticar la velocidad del viento, se generó con el software

<sup>1</sup> La Ing. Itzagueri García Rodríguez es estudiante de maestría del posgrado de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, [9602418a@umich.mx](mailto:9602418a@umich.mx) (autor correspondiente)

<sup>2</sup> El Dr. Erasmo Cadenas Calderón es Profesor Investigador de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, [ecadenas@umich.mx](mailto:ecadenas@umich.mx)

<sup>3</sup> El Dr. Luis Béjar Gómez es Profesor Investigador de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, [luis.bejar@umich.mx](mailto:luis.bejar@umich.mx)

de plataforma libre, denominado en inglés Weather Research and Forecasting (WRF), el cual es un programa para modelado numérico de la atmósfera, con el cual es posible generar modelos con precisión aceptable. El horizonte de pronóstico para esta investigación será de corto plazo (PCP), el cual fluctúa entre 6 y 48 horas (Montecinos Geisse et al. 2021).

#### Descripción del Método

##### *El modelo de investigación y pronóstico del tiempo (WRF)*

Una herramienta fundamental para llevar a cabo la predicción del tiempo meteorológico son los modelos de Predicción Numérica del Tiempo (PNT), que son modelos físico-matemáticos que partiendo del estado actual de la atmósfera pueden predecir su estado futuro. Según el área de simulación, se puede distinguir entre modelos globales y modelos regionales o de mesoescala. WRF es un Sistema de Predicción Numérica del Tiempo diseñado para aplicaciones de investigación y predicción operativa, su desarrollo comenzó a fines de la década de 1990 con la colaboración del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR), la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, el Laboratorio de Investigación Naval y la Universidad de Oklahoma. WRF es un modelo de mesoescala que aumenta la resolución espacial significativamente a diferencia de los modelos Globales. El modelo WRF tiene dos clases de simulación que puede generar: aquellas con una inicialización *ideal* y aquellas que utilizan datos *reales*. Para esta investigación, WRF se utilizó para simulaciones basadas en condiciones atmosféricas reales (es decir, a partir de observaciones y análisis). En la parte del preprocesamiento WPS (WRF Preprocessing System) se definieron:

- 1) Dominios y fechas de la simulación, resolución de la cuadrícula, la proyección del mapa, la latitud y longitud de referencia. Para estos modelos se estableció un dominio de coordenadas  $5.99^{\circ}$  a  $40.86^{\circ}$  de latitud y  $-116.26^{\circ}$  a  $-87.88^{\circ}$  de longitud. La resolución fue de 30 km con simulaciones de 24 horas para el modelo 1 y 2, y 10 km y 30 horas para el modelo 3. En la figura 1 se observa el dominio de la simulación.
- 2) Se interpolaron los datos terrestres al dominio de la simulación con lo que se prepararon los campos para su uso en el modelo, con las categorías de uso de suelo, altura del terreno, promedios anuales de temperatura del suelo, datos mensuales de cobertura vegetal y otras características en cada nodo en la malla, de acuerdo a la configuración por tiene por default el modelo.
- 3) Se decodificó e interpoló con los Datos Meteorológicos de Reanálisis. Las condiciones de entrada para los modelos fueron datos de Reanálisis del sistema de pronóstico del clima (CFSR), Versión 2 (CFSv2), del NCEP (Saha, S. y col. 2010).

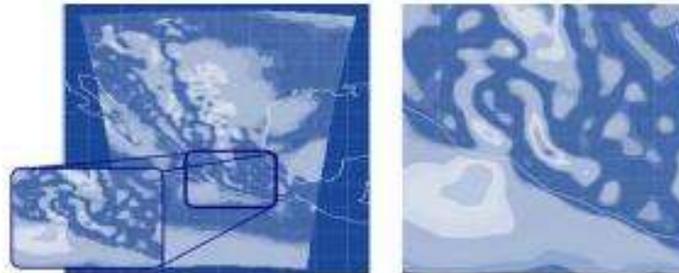


Figura 1. Definición del dominio.

Una vez completado el preprocesamiento se interpolaron verticalmente los archivos **met\_em\*** (generados por **metgrid.exe**) y se crearon archivos de condiciones iniciales y de frontera por el programa **real**, con ello se dio paso a generar el pronóstico del modelo con WRF.

En la parte del posprocesamiento es necesario generar archivos con los datos de salida de WRF-ARW para facilitar el acceso, manipulación y visualización de los resultados del pronóstico, para ello, **ARWpost** es un programa que lee estos archivos de datos y luego genera archivos de salida **GrADS**. Este programa de interpretación

y visualización de los archivos de salida que el posprocesamiento da como resultado es una herramienta que ofrece alternativas para visualización de los datos, que para fines de predicción operativa es de gran ayuda para presentar la información a las partes interesadas en el pronóstico.

*Validación del Modelo*

Poder integrar los pronósticos de ERv a los sistemas eléctricos y a la gestión de los mercados mejora la eficiencia en la operación de los sistemas. Los pronósticos anticipados proporcionan los valores de potencia para diferentes escalas de tiempo, que se utilizan en el proceso de planeación, despacho y confiabilidad de la red. La precisión del pronóstico se evalúa de acuerdo al error de pronóstico, que es la diferencia entre el pronóstico y la generación real. Para poder calcular la potencia primero se validó que el modelo más adecuado fuera el que mejores resultados proporcionara en el pronóstico de la velocidad del viento. Los datos reales fueron proporcionados por la Comisión Nacional del Agua, las observaciones fueron tomadas en la Estación Meteorológica Automática Tepuxtepec del SMN, la cual es administrada por el Organismo de Cuenca Lerma Santiago Pacifico (OCLSP). La estación se ubica en las coordenadas 20.02° N, -100.229° W, lo cual favoreció la validación del modelo ya que se encuentra a 2.6 metros del lugar del emplazamiento; de igual forma el punto de malla más cercano a la estación meteorológica y al lugar propuesto para el emplazamiento está en las coordenadas 20.0181° N, -100.217° W, de donde se tomaron los valores de las velocidades del viento pronosticadas por el modelo. Algo que se trato de configurar para mejorar el estudio fue la configuración del dominio para que el punto de malla estuviera lo más cercano a la estación. La fecha de simulación fue para el 4 de marzo de 2019, pero se tomaron rangos más amplios para la simulación en los modelos con la intención de ver si con ello se mejoraba el pronóstico.

Como se puede ver en la figura 2 se tienen la serie de datos observados en color naranja que se puede comparar cualitativamente con las series de datos de los modelos que son las series en color amarillo, carmín y azul. Se puede ver que el modelo que más se acerca al comportamiento de los datos observados es el Modelo 3 que es la serie de datos en color azul. Es importante mencionar que, aunque el modelo 3 funcionó muy bien para la fecha de la simulación, éste se usará en simulaciones para el pronóstico de distintas fechas y periodos de simulación con la intención de validar la capacidad que le modelo tiene para pronosticar. Un aspecto importante que se debe aclarar es que los modelos de mesoescala al ser alimentados por datos de modelos globales pueden heredar las deficiencias de los datos que estos datos de reanálisis puedan tener, por lo que, para distintas fechas de simulación, los distintos datos de entrada del modelo pueden limitar el obtener buenos resultados en la validación contra las observaciones acordes a las nuevas fechas.

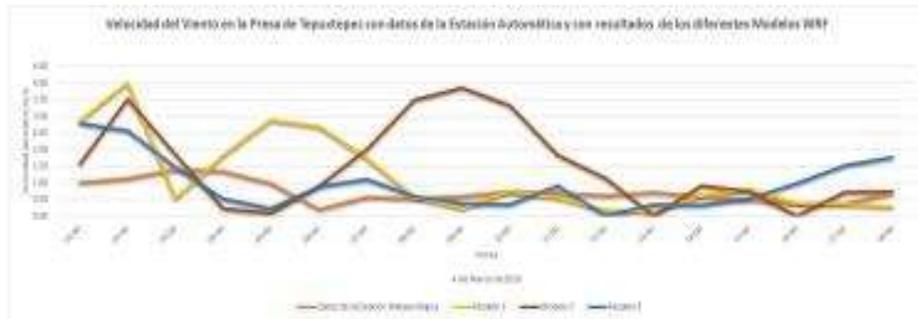


Figura 2. Series de las Velocidades de viento de las Observaciones y los Modelos.

Para validar los modelos se compararon los datos observados de las velocidades del viento con los pronosticados por los modelos, para ello se calcularon dos de los indicadores de precisión más utilizados: el error medio absoluto (MAE) y la raíz cuadrada del error cuadrado medio (MSRE).

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |e_i| \quad (1)$$

$$MRSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e_t^2} \quad (2)$$

Modelo	MAE	RMSE
Modelo 1	0.778	1.17
Modelo 2	1.12	1.48
Modelo 3	0.62	0.78

Tabla 1. Medidas estadísticas del error de pronóstico de los Modelos.

Para evaluar el desempeño del modelo se hizo la comparación de las medidas estadísticas de error de los modelos con la tabla 2 de donde se tomaron los valores para el error medio absoluto (MAE) y para la raíz cuadrada del error cuadrado medio (RMSE) (Clifford, 2011).

Grado	MAE (m/s)	RMSE (m/s)
Pobre	> 3.0	> 3.0
Aceptable	< 3.0	< 3.0
Buena	< 2.5	< 2.5
Excelente	< 2.0	< 2.0

Tabla 2. Grados del desempeño estadístico del modelo de predicción para error medio absoluto (MAE) y la raíz cuadrada del error cuadrado medio (RMSE).

Para seguir evaluando el desempeño del Modelo 3 se hicieron dos simulaciones más para distintos meses del año y calcular los indicadores estadísticos de precisión del modelo en las respectivas fechas. Se presentan los resultados de dos días más de pronóstico de la velocidad del viento para el mes de abril y el mes de mayo. La intención es validar los resultados del modelo contra los datos reales observados en la estación automática de Tepuxtepec. De la tabla 1 se aprecia que el mejor desempeño lo tiene el Modelo 3, el cual se usó para calcular la velocidad del viento en diferentes fechas evaluando el desempeño del modelo.

Al modelo solo se le configuraron las fechas de la simulación y se dejaron el resto de las configuraciones de acuerdo a las del Modelo 3 seleccionado. Los datos de reanálisis de entrada para el modelo también fueron los del sistema de pronóstico del clima (CFSR), Versión 2 (CFSv2), del NCEP. Así es que se obtuvieron los siguientes resultados.

En la figura 3 se observa la simulación con el Modelo 3 para los días 9 y 10 de abril de 2019. Se calcularon las medidas estadísticas de error obteniendo un valor para error medio absoluto (MAE) de 1.58 y para la raíz cuadrada del error cuadrado medio (RMSE) un valor de 1.89. Estos valores aumentaron en comparación con los obtenidos para el mes de marzo, sin embargo, tienen un nivel de desempeño también Excelente.



Figura 3. Datos reales de la estación Tepuxtepec del mes de abril y el Modelo 3.

Se simuló con el modelo 3 los días 8 y 9 de mayo de 2019 para hacer una validación más del modelo contra las observaciones reales de la estación automática Tepuxtepec y los resultados obtenidos para las medidas estadísticas de error fueron: para el error medio absoluto (MAE) un valor de 2.30 y para la raíz cuadrada del error cuadrado medio (RMSE) un valor de 2.85. Estos resultados ya no dan un nivel de desempeño Excelente, sino Bueno y Aceptable respectivamente. En la figura 4 se observa la gráfica del conjunto de datos reales contra los generados por el Modelo 3.



Figura 4. Datos reales de la estación Tepuxtepec del mes de mayo y el Modelo 3.

### Conclusiones

Los resultados obtenidos en la primera parte de la investigación dieron como resultado la selección de un modelo por tener el mejor desempeño en el pronóstico. En la segunda parte de la investigación en la cual se usa el Modelo 3 para llevar a cabo dos simulaciones más una para el mes de abril y otra para el mes de mayo de 2019, los resultados para el mes de abril dieron al Modelo 3 nuevamente en un desempeño Excelente, pero los resultados obtenidos para el mes de mayo lo colocaron en un desempeño Bueno para el error medio absoluto (MSE) y en un desempeño Aceptable para la raíz cuadrada del error cuadrado medio (RMSE).

Estos resultados muestran que un modelo puede tener distintos grados de desempeño estadístico para distintas fechas de la simulación, sin embargo, los resultados fueron buenos y se usará el modelo para hacer los pronósticos en los meses restantes del año para el sitio de estudio, para analizar nuevamente su nivel de Desempeño.

### Referencias

Castañeda, J. C. "Emplazamiento crítico incorporado a la red eléctrica en el Estado de Michoacán". Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México. 2018.

Clifford, K. T. "WRF-Model Performance for Wind Power Forecasting in the Coast Ranges of Central California". San Jose State University, California, USA. 2011. Dirección de internet: [https://scholarworks.sjsu.edu/etd\\_etdsoc/4043](https://scholarworks.sjsu.edu/etd_etdsoc/4043)

GWEC-Global-Wind-Report-2021, consultada por Internet el 30 de junio 2021. Dirección de internet: <https://gwec.net/buenas-perspectivas-para-la-energia-eolica-890-gra-en-2021-segun-gwec/>

Montecinos Geisse, S., N. Escobosa, A. Lruya, M. Mercedes, N. Montezuma y T. Orellana. "Pronósticos de generación eólica y solar fotovoltaica en América Latina." Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH Red sectorial OADeR-ALC. Mayo 2021.

Saha, S. y col. 2010. *Productos de 6 horas de análisis del sistema de pronóstico del clima (CFRS) del NCEP, enero de 1979 a diciembre de 2010*. Archivo de datos de investigación en el Centro Nacional de Investigación Atmosférica, Laboratorio de Sistemas Computacionales y de Información, Consultado por internet durante el mes de agosto de 2021. Dirección de Internet: <https://doi.org/10.5065/D69K487J>

Secretaría de Energía. Informe Pormenorizado sobre el desempeño y las tendencias de la Industria Eléctrica Nacional 2017. Noviembre 2018. consultada por Internet el 14 de enero de 2021. Dirección de internet: [https://www.gub.mx/energia/uploads/attachment\\_data/file/415850/Informe\\_Industria\\_Electrica\\_2017.pdf](https://www.gub.mx/energia/uploads/attachment_data/file/415850/Informe_Industria_Electrica_2017.pdf)

UCAR, 2020. Weather Research and Forecasting Model. consultada por Internet el 5 de diciembre, 2020. Dirección de internet: [www.mrrt.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model](http://www.mrrt.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model)

# Referencias

- [1] **GWEC-Global-Wind-Report-2021**. Visitado el 30 de junio 2021.  
<https://gwec.net/buenas-perspectivas-para-la-energia-eolica-800-gw-en-2021-segun-gwec/>
- [2] **Secretaría de Energía**. *Informe Pormenorizado sobre el desempeño y las tendencias de la Industria Eléctrica Nacional 2017*. Visitado en julio de 2021.  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/531413/Informe Porm. Ind. Electrica\\_2018\\_vfinal2.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/531413/Informe_Porm.Ind.Electrica_2018_vfinal2.pdf)
- [3] **DOF - Diario Oficial de la Federación**  
[https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5505475&fecha=23/11/2017](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5505475&fecha=23/11/2017)
- [4] **Roque, E.; Ferrer, A.; Borrajero I.; Sierra M.** *Elaboration of short-term energy forecast for wind farms*. Habana, Cuba. Energética vol.39 no.2 La Habana may.-ago. 2018 *versión On-line* ISSN 1815-5901
- [5] **Cong Feng, M. S.-M. (2018)**. *Characterizing forecastability of wind sites in the United States*. Renewable Energy, 1-14.
- [6] **Businger, D. A. (2018)**. *Wind power characteristics of Oahu, Hawaii*. Renewable Energy, Volume 128, 324-336.
- [7] **R. El-Samra (2018)**. *What model resolution is required in climatological downscaling over complex terrain*, 203 (2018) 68-82.
- [8] **R. Le Roux (2018)**. *Comparison of statistical and dynamical downscaling results from the WRF model*, 100 (2018) 67-73.
- [9] **Zhenhua D., Ao J., Duan Q., Wang J., Gong W., Shen C., Gan Y. y Liu Z. (2019)**, *Improving WRF model turbine-height wind-speed forecasting using a surrogate-based*

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

*automatic optimization method, Atmospheric Research, Volume 226, Pages 1-16, ISSN 0169-8095, (DOI: 10.1016/j.atmosres.2019.04.011).*

- [10] **Fernández-González, S., Martín, M.L., Garcrc-Ortega, E., Merino, A., Lorenzana, J., Sánchez, J.L., Valero, F., Rodrigo, J.S., (2018).** *Sensitivity analysis of WRF model: wind-resource assessment for complex terrain.* J. Appl. Meteorol. Climatol. 57, 733–753. <https://doi.org/JAMC-D-17-0121.1>.
- [11] **Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE).** Visitado en Julio de 2021. <https://amdee.org/>
- [12] **Manual de Pronósticos.** Visitado en mayo de 2021. <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regla/n533.pdf>
- [13] **REVE (Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico)** España. Visitado en enero de 2021 en <https://www.evwind.es/author/reve>
- [14] **R. Calero P, A Colmenar S, M A Castro G J A Carta G (2006).** *Análisis y Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables.* Madrid, España. Prentice Hall.
- [15] **Manwell, J. G. (2009).** *Wind Energy Explained* (Vol. second edition). USA: John Wiley & Sons LtdJ.F.Mandwel
- [16] **Barcelona World Race. Programa educativo.** Recuperado de: [http://www.barcelonaworldrace.org/var/ezdemo\\_site/storage/images/educacion/programa-educativo/explora/planeta-mar/meteorologia/circulacio-general-atmosferica/cel-lules-de-conveccio/41038-1-cat-ES/cel-lules-de-conveccio.jpg](http://www.barcelonaworldrace.org/var/ezdemo_site/storage/images/educacion/programa-educativo/explora/planeta-mar/meteorologia/circulacio-general-atmosferica/cel-lules-de-conveccio/41038-1-cat-ES/cel-lules-de-conveccio.jpg)
- [17] **Bañuelos-Ruedas, F., Angeles-Camacho, C., Serrano-García, J. A., Muciño-Morales, D. E.** *Validación de Metodología Usada Para la Obtención de Perfiles Velocidad de Viento.* Recuperado de: <https://es.scribd.com/doc/11545563/Analisis-de-perfiles-verticales-de-viento>
- [18] **Hau, E. (2013).** *Wind Turbines. Fundamentals, Technologies, Application, Economics.* USA. Springer.

- [19] **Genera tu luz.** *Diferentes turbinas verticales.* Recuperado de:  
<https://www.generatuluz.com/wp-content/uploads/2019/10/Diferentes-turbinas-verticales2.jpg>
- [20] **Google.** Imagen recuperada de:  
<https://www.google.com/search?q=G%C3%B3ndola+de+una+turbina+de+eje+horizontal+con+algunos+de+sus+componentes>
- [21] **IBERDROLA.** Visitado en marzo de 2021 en <https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/como-funcionan-parques-eolicos-terrestres>
- [22] **GIZ, 2015.** *Variable Renewable Energy Forecasting – Integration into Electricity Grids and Markets. A Best Practice Guide.* Visitado el 11 febrero, 2021. En:  
[https://energypedia.info/images/2/2a/Discussion\\_Series\\_06\\_Technology\\_web.pdf](https://energypedia.info/images/2/2a/Discussion_Series_06_Technology_web.pdf)
- [23] **NOAA, 2021.** *Numerical Weather Prediction.* Visitado el 19 marzo, 2021. En:  
[www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/numerical-weather-prediction](http://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/numerical-weather-prediction)
- [24] **Montecinos S., (2021).** *Pronósticos de generación eólica y solar fotovoltaica en américa latina.* Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH Red sectorial GADeR-ALC.
- [25] **GIZ, ,,** *Grid Integration Series: Variable Renewable Energy Forecasting Scaling Up Renewable Energy Project,* July 2020.  
[https://www.usaid.gov/sites/default/files/documents/1865/USAID\\_SURE\\_Variable-Renewable-Energy-Forecasting.pdf](https://www.usaid.gov/sites/default/files/documents/1865/USAID_SURE_Variable-Renewable-Energy-Forecasting.pdf)
- [26] **Makridakis, S., Wheelwright, S. C., & Hyndman, R. J. (1998).** *Forecasting Methods and Applications.* John Wiley, 3 edition.
- [27] **UCAR COMUNNITY PROGRAMS.** Visitado en junio de 2020. En:  
<https://www.meted.ucar.edu/idex.php>

Pronóstico de la Potencia de un Campo Eólico ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, usando WRF.

- [28] **UCAR, 2020. MetEd. The COMET®program.** Visitado el 5 de diciembre, 2020.  
En: [www.meted.ucar.edu/mesoprim/models\\_es/navmenu.php?tab=1&page=1-1-0&type=flash](http://www.meted.ucar.edu/mesoprim/models_es/navmenu.php?tab=1&page=1-1-0&type=flash)
- [29] **NCAR. National Center for Atmospheric Research.** Visitado en enero de 2021 en <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>
- [30] **Descripción General del Sistema de Modelado.** Visitado en marzo de 2021 en [http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get\\_source.html](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_source.html)
- [31] **Grid Analysis and Display System (GrADS).** Visitado en enero de 2021 en <http://cola.gmu.edu/grads/>
- [32] **Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México.** Visitado en junio de 2021 en <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM16michoacan/municipios/16017a.html>
- [33] **Castañeda-Ramírez, J.C., (2018).** Tesis: “*Emplazamiento Eólico Incorporado a la Red Eléctrica en el Estado de Michoacán*”. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- [34] **SMN. Sistema Meteorológico Nacional.** Visitado en junio de 2021 en <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>
- [35] **Google Earth Pro.** “*Program Files\Google\Google Earth Pro\client\googleearth.exe*”
- [36] **Saha, S., et al. 2011, updated daily.** *NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory.*  
<https://doi.org/10.5065/D61C1TXF>
- [37] **Wind-turbin-models.com.** Visitado en noviembre de 2021 en <https://es.wind-turbine-models.com/turbines/110-siemens-swt-2.3-113>