

# **PRONÓSTICO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE CORTO PLAZO DE UN PARQUE EÓLICO, UTILIZANDO TÉCNICAS NUMÉRICAS DE PREDICCIÓN DEL CLIMA**

## *SHORT-TERM ELECTRICITY GENERATION PROGNOSTIC OF A WIND FARM, USING WEATHER PREDICTION NUMERICAL TECHNIQUES*

***Georgina Lizeth González González***

Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp)  
*georgina.glzg@uaem.edu.mx*

***Antonio Rodríguez Martínez***

Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp)  
*antonio\_rodriguez@uaem.mx*

***Gabriel Cuevas Figueroa***

Universidad de Sonora  
*gabriel.cuevas.f@gmail.com*

***Uriel Lezama Lopez***

Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias  
*uriel.lezama@ineel.mx*

## **Resumen**

Actualmente el aumento de la demanda energética ha provocado impactos negativos al ambiente, debido al uso irracional de combustibles fósiles que se ocupan en la producción de energía eléctrica. Derivado de esta situación se busca una solución en la cual México afronte esta problemática. El desarrollo e implementación de energías renovables ha tenido un auge en los últimos años, por lo que se considera una manera adecuada de minimizar los impactos negativos al ambiente y la sustitución y/o reducción de combustibles fósiles. En particular, la energía eólica presenta una alternativa a esta problemática, sin embargo, esta energía tiene una limitante, debido a su intermitencia. El objetivo del presente trabajo es desarrollar un modelo de predicción numérica del tiempo (PNT) en microescala, para el cálculo de la generación de energía eléctrica en parques

eólicos en un periodo de corto plazo (24 horas). El desarrollo de este proyecto contribuye a la integración de la energía eólica para suministrar a la red eléctrica y de esta manera disminuir el uso de combustibles fósiles.

**Palabra(s) Clave:** Energía eólica, generación de energía eléctrica, intermitencia y PNT.

## **Abstract**

*Currently the increase in energy demand has caused negative impacts on the environment, due to the irrational use of fossil fuels that are involved in the production of electricity. Derived from this situation, a solution is sought in which Mexico faces this problem. The development and implementation of renewable energies has had a boom in recent years, which is why it is considered an adequate way to minimize the negative impacts on the environment and the substitution and / or reduction of fossil fuels. In particular, wind energy presents an alternative to this problem, however, this energy has a limiting factor, due to its intermittence. The objective of this work is to develop a model of numerical weather prediction (NWP) in microscale, for the calculation of the generation of electric power in wind farms for a short period (24 hours). The development of this project contributes to the integration of wind power to supply the electricity network and thus reduce the use of fossil fuels.*

**Keywords:** Wind power, electric power generation, *Intermittence and NWP.*

## **1. Introducción**

En la actualidad la demanda energética trae consigo impactos negativos al ambiente, contribuyendo al cambio climático [1]. Para satisfacer la demanda de energía eléctrica se han explotado a los combustibles fósiles (hidrocarburos, carbón y algunos derivados). El 81.2% de la energía eléctrica que se consume es proveniente de combustibles fósiles y el restante de energías limpias [2], esta baja relación de energías limpias contra las de origen convencional, compromete la permanencia de éstos y genera problemas socioambientales. En los últimos años México ha desarrollado la implementación de legislación ambiental que promueve

el uso de energías renovables como fuente de suministro para la conexión de la red eléctrica. México ha registrado en el segundo lugar al recurso eólico como la energía renovable con un mayor desarrollo en comparación de otras renovables [3]. La energía eólica se origina por las variaciones de temperatura y la diferencia de presión, formado por las corrientes de aire que contienen energía cinética [4], al entrar en contacto con el aerogenerador se transformará en energía mecánica y por medio de un eje acoplado a un generador se producirá energía eléctrica [5].

Para calcular la energía cinética  $E_c$ , se utiliza la ecuación 1, donde  $m$  es la masa en kg y  $V$  la velocidad en m/s.

$$E_c = \frac{1}{2}mV^2 \quad (1)$$

La predicción y simulación de viento en los últimos años ha sido uno de los temas de interés como objetivo de investigaciones académicas y parte externa del campo, esto se debe al crecimiento de la industria de energía eólica. Además de los crecientes eventos meteorológicos que han afectado de manera directa la generación de energía eléctrica [6].

Los modelos de Predicción Numéricos del Tiempo (PNT), también conocidos como NWP, por sus siglas en inglés Numerical Weather Prediction son considerados una herramienta poderosa y útil para simular las variables meteorológicas. Los modelos PNT se encargan de ejecutar ecuaciones complejas (Navier-stokes) para conocer el comportamiento de un fluido. Los modelos numéricos son útiles para la predicción del tiempo a corto y mediano plazo, sin embargo, dichos modelos permiten formar errores grandes en series temporales en largos periodos [7].

La estructura de un modelo numérico del tiempo se compone por:

- La asimilación de los datos.
- Las parametrizaciones.
- La dinámica del modelo (dinámica atmosférica) [8].

El uso de estos modelos tiene una amplia gama de configuraciones numéricas, físicas y computacionales. En muchos de estos casos los modelos meteorológicos

regionales se vuelven complejos, debido a su alta dimensión y a su mayoría de interacciones no lineales [9].

Uno de los retos más importantes que se tiene de estos modelos en un área en particular es establecer la configuración del modelo [10]. Los procesos atmosféricos ocurren en diferentes espacios y tiempos, por lo tanto, los modelos meteorológicos regionales no se encuentran diseñados para resolver procesos físicos en todas las escalas de construcción, por lo cual se debe configurar diferentes parametrizaciones [11].

Existen otros modelos de pronóstico como los estadísticos que no simulan procesos físicos, se encargan de parametrizar las relaciones existentes entre los pronósticos meteorológicos y la producción de parques eólicos para predecir periodos de tiempo corto, de minutos a horas y no requirieren un mayor coste computacional [12].

### **Weather Research Forecasting (WRF)**

El modelo que se utilizó para llevar a cabo este proyecto fue la versión 3.9.1 WRF (Weather Research Forecasting), diseñado para la investigación en el desarrollo de modelos de predicción numérica del tiempo y un sistema de asimilación de datos. El modelo es considerado un modelo no hidrostático y fue desarrollado por el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR) en Estados Unidos de América, es sucesor del Modelo de mesoescala (MM5), el cual tiene los mismos principios. El modelo WRF cuenta con múltiples opciones y parametrizaciones físicas para microfísica, radiación, cúmulos (Cu), capa superficial (SL), capa de límite planetaria (PBL) y superficie terrestre (LSM), entre otras [13]. Existen variables a las parametrizaciones que pueden afectar al modelo, como son las condiciones iniciales y de límite, tamaños de dominio y posición, resolución horizontal y vertical, características de terreno entre otras.

El modelo WRF utiliza como condiciones de entrada a modelos globales con menor resolución, considerados como un sistema de entrada. Existen diferentes tipos de modelos globales, el más utilizado ha sido el Global Forecast System (GFS) y en este caso para el presente trabajo será el utilizado [14].

## 2. Desarrollo

El presente trabajo se desarrolló con una serie de pasos que permitió validar el recurso eólico para la obtención de energía eléctrica en un parque. Se utilizó un modelo WRF para validar periodos de tiempo de una semana del año 2017 y se obtuvo la compilación de datos. En la figura 1 se observa el diagrama de frecuencia de datos de orientación con respecto a la velocidad del viento, en un periodo de una semana del 1 al 7 de mayo. La presente figura permitió conocer el comportamiento del viento y la mayor concentración de datos que se encuentran entre los ángulos 165-195° con una inclinación al sur a diferentes velocidades de viento. Sin embargo, también se puede observar la existencia de valores entre los ángulos de 345-15° con menores concentraciones de datos dispersas en diferentes direcciones.

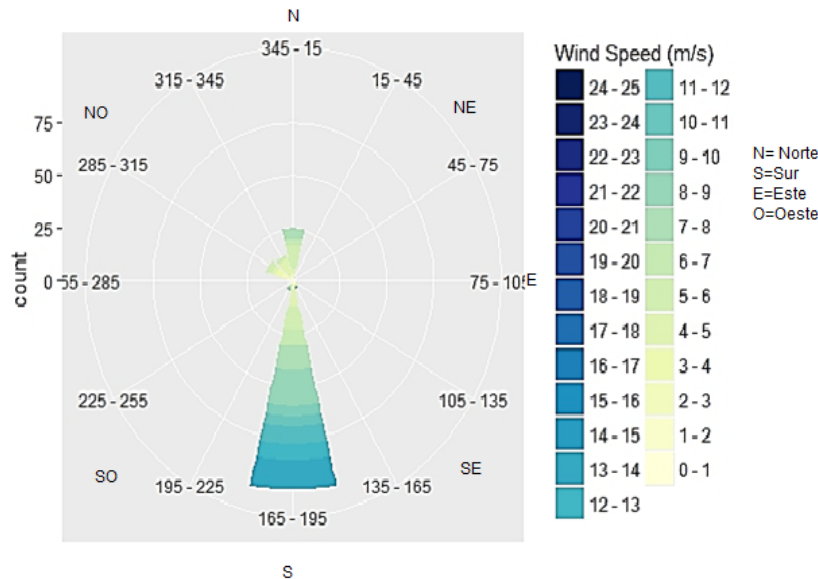


Figura 1 Frecuencia de datos del (1-7 de mayo del 2017).

### Instalación del modelo

Se trabajó con la versión 3.9.1. del modelo WRF en ambiente Linux, posteriormente se establecieron las condiciones iniciales y de contorno, este proceso fue alimentado por un modelo meteorológico regional de menor resolución, en este caso para el presente trabajo se seleccionó el modelo Global Forecast System (GFS) con lecturas de cada 6 horas. Se optó por el uso del GFS por su compatibilidad al modelo WRF y la obtención de datos en periodos cortos de tiempo.

## Condiciones iniciales y de contorno

De acuerdo con bibliografía consultada se optó para la configuración de los dominios de trabajo una regla de 1 a 3. En la configuración del modelo se establecieron tres dominios anidados: el primer dominio (d01) contó con una resolución de 9 km, el segundo dominio (d02) fue de 3 km y por último se estableció un dominio (d03) de 1 km, todos los dominios cuentan con 30 niveles verticales. Los tres dominios se encuentran en un punto de coordenadas de 16° 33' 44" latitud y 94°50'16" longitud. En la figura 2 se observa un mapa representativo de los dominios anidados que se establecieron.

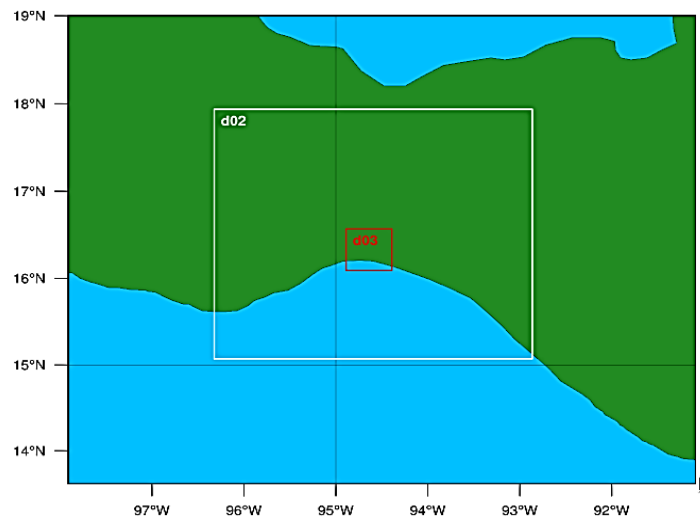


Figura 2 Configuración de dominios del modelo WRF.

## Diseño de simulaciones

Las simulaciones realizadas en este trabajo fueron en un periodo de una semana. Se llevaron a cabo 15 simulaciones para este presente trabajo y se configuro para obtener 144 salidas de un día, en un periodo de cada 10 minutos, más una del pronóstico de predicción, para obtener un total de 145 saludos. El modelo WRF se alimentó con condiciones iniciales y de frontera provenientes del modelo GFS.

## Opciones físicas

En la bibliografía consultada existen diferentes configuraciones de parametrizaciones físicas, estas son seleccionadas dependiendo el objetivo que se

desea cumplir. En particular para el presente proyecto se configuró los esquemas de parametrización del modelo WRF de acuerdo con condiciones atmosféricas, en la tabla 1 se mencionan la selección de estas.

Tabla 1 Parametrización de los esquemas del modelo WRF.

<b>Parametrización</b>	<b>Esquemas</b>
Cúmulus (Cu)	Kain-Fritsch
Radiación de onda corta (ra_sw)	Dudhia
Capa límite planetaria (bl_pbl)	YSU
Capa superficial (sf_sfclay)	MM5 Monin-Obukhov
Superficie terrestre (sf_surface)	Difusión termal (MM5)
Arrastre en superficie (sf_urban_physics))	UCM3

Durante el desarrollo del presente trabajo se ha obtuvo la experiencia del modelo WRF, el cual requiere una gran demanda computacional. El tiempo de simulación fue de una semana, sin embargo, puede ser menor con equipos robustos computacionales.

### **3. Resultados**

Se realizó un ajuste polinomial a la curva de potencia del fabricante con datos experimentales para obtener la ecuación de potencia y calcular la velocidad del viento en un periodo de cada 10 minutos. En la figura 3 se observa el comportamiento de la curva de potencia, la cual muestra que a una altura de 13 m/s se puede alcanzar una potencia de 1600 kW. Además de indicar que a una altura de 3 m/s se conecta el aerogenerador a la red eléctrica y de la misma manera a 25 m/s se desconecta a red. Para el cálculo de la curva de potencia se basó en el modelo de aerogenerador acciona AW-1500/70.

Se realizaron 15 días de simulación en el modelo WRF para la obtención de la magnitud de velocidad del viento en periodos de cada 10 minutos. En la figura 4 se observa un día de prueba de una simulación en el modelo WRF, los valores obtenidos permitieron hacer el cálculo de energía eléctrica del día 01 de mayo del 2017.

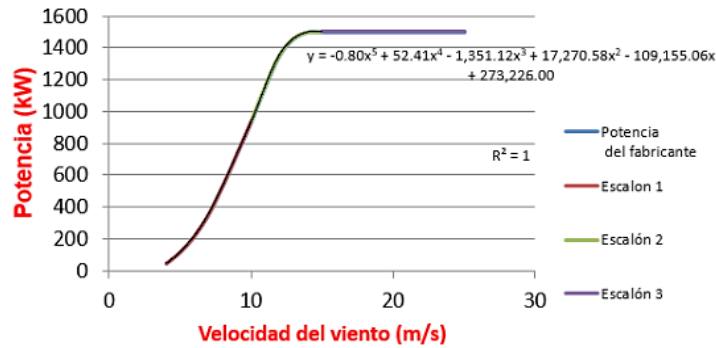


Figura 3 Ajuste de polinomial a la curva de potencia del fabricante.

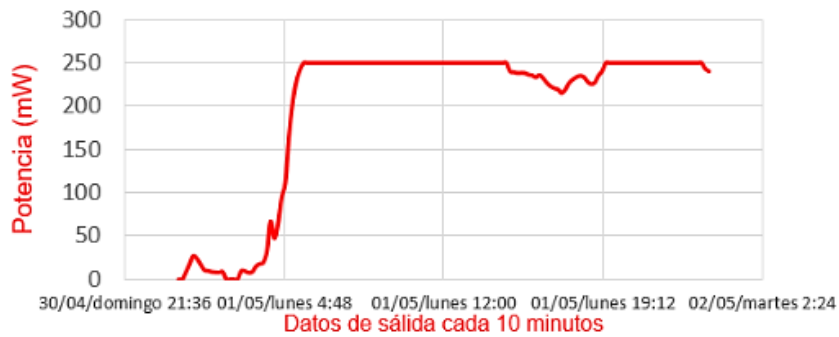


Figura 4 Serie de generación eléctrica (diezminutal).

En la figura 5 se observa la comparación de valores estimados (línea roja) y los reales (línea azul) de la potencia total del parque. Los valores estimados no contienen valores específicos de los aerogeneradores, por lo que solo toman en cuenta la velocidad del viento del modelo WRF, sin embargo, las variaciones que se generan en un parque eólico adversas a factores climatológicos pueden llegar a generar cambios en los datos estimados con respecto a los reales.

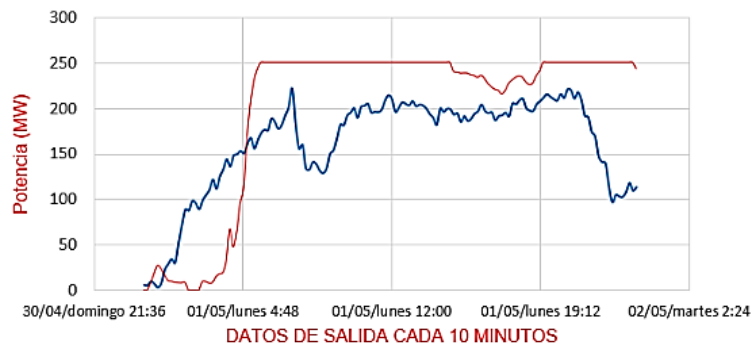


Figura 5 Generación de energía eléctrica estimada vs real (diezminutal).



## 4. Conclusiones

Se obtuvo un pronóstico de generación eléctrica de corto plazo a través de un modelo de predicción numérica del tiempo, de un parque eólico. La metodología que se desarrollo fue mediante el modelo WRF contemplando condiciones meteorológicas y orográficas del terreno, de esta manera permitió conocer datos estimados en diferentes periodos de tiempo.

Los datos obtenidos no consideraron especificaciones de los aerogeneradores, de tal manera que hay hasta un 50 % de error en los pronósticos de predicción para la generación de energía eléctrica.

## 5. Bibliografía y Referencias

- [1] WEC, "World Energy Resources," World Energy Counc. Rep., vol. 1, p. 468, 2016.
- [2] SENER, Balance General de energía. Diario Oficial de la Federación el 8 de septiembre 2015.
- [3] Gobierno de la Republica: Balance Nacional de Energía (2016), Secretaría de Energía, Primera Edición, p 11-23
- [4] U. O. Parra., SENER: México Windy Power: <http://ejkrause.com.mx/camp17-windpower/bitmemo/PDF01a/01a-OliverFlores> (2017).
- [5] R. G. Barry., R. J. Chorley. Atmosphere, Weather and Climate, Edición 8 (2003).
- [6] R. Ricardo., M. Erick, Diseño mecánico de un aerogenerador eólico, Memoria (pp.11-15), (2015).
- [7] Proyecto Aeolus, Energía eólica, Fundamentos, Aspectos técnicos, medioambientales y socioeconómicas., (pp. 78-81) (2008).
- [8] A. Roger., Mesoscale Metereological Modeling., 3ra Edición Energía eólica. (2003).
- [9] MEM., *Bases del Mercado Eléctrico Mayorista*. Diario oficial de la federación:[http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5407715&fecha=08/09/2015](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5407715&fecha=08/09/2015).

- [10] X. Wang, P. Guo, X. Huang. A Review of Wind Power Forecasting Models, *Journal Applied Energy* (2011).
- [11] IDEA, Instituto para la Diversificación del Ahorro de Energía., ANEMOS: Predicción eólica en la unión europea, Madrid, España (2007).
- [12] J. Zhang, C. Draxl, T. Hopson, L. D. Monache, E. Vanvyve, B. Hodge. Comparison of numerical weather prediction based deterministic and probabilistic wind resource assessment methods, (pp.528-541). *Journal Applied Energy* (2015).
- [13] N. J. Cutler., J. D. Kepert., H. R. Outhred., I. F. MacGill., Characterizing Wind Power Forecast Uncertainty with Numerical Weather Prediction Spatial Fields (pp. 509-524). *Wind Engineering Volume 32, No. 6*, (2008).
- [14] J. G. Powers., J. B. Klemp., W. C. Skamarock., *The weather Research and Forecasting Model.*, American Meteorological Societyring (2017).