

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA

*INSTITUTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA*



*“PRONOSTICO DE ENERGIA EOLICA A CORTO PLAZO EN LA REGION DE
LA RUMOROSA B.C.”*

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRIA EN INGENIERIA

PRESENTA:

ARMANDO RELLO GARCIA

DIRECTOR: ALEJANDRO ADOLFO LAMBERT ARISTA

Mexicali, B. C. Junio 2015

I. Agradecimientos

A mi tutor el Doctor Alejandro Adolfo Lambert Arista por haberme dado su confianza y aceptado, sin su apoyo no habría entrado al programa

A el Doctor Rafael Onofre García Cueto, que además de clase y consejos, me apoyo para tomar un curso que me sirvió enormemente.

A todos mis profesores del Instituto de Ingeniería que siempre me han orientado y enseñado más de lo de clase.

A mi mamá y a mis hermanos Joaquín y Luis, a mi papa que no está con nosotros.

A Korina Salomón que siempre me ha alentado en mi superación.

A los Doctores Daniel Saucedo, Alexis Acuña y Pedro Rosales que me dieron su confianza y recomendación para entrar al programa.

A todos mis amigos de la refaccionaria nippon que siempre me dan ánimo.

INDICE

I.	Agradecimientos	3
II.	Lista de tablas	7
III.	Lista de figuras	8
IV.	Nomenclatura	9
Capitulo 1.	INTRODUCCION.....	10
1.1	Introducción	10
1.2	Antecedentes	12
	Métodos de pronóstico de energía eólica comerciales	12
1.3	Fenómenos que provocan variaciones (rampas) en la producción de energía eólica.....	14
1.4	Disponibilidad del Recurso Eólico en la Sierra Juárez	15
1.5	Planteamiento del problema	17
1.6	Hipótesis.....	19
1.7	Objetivos	19
Capitulo 2.	MARCO TEORICO.....	20
2.1	Introducción	20
2.2	WRF: Weather Research Forecast	21
2.3	Sistema de coordenadas del modelo WRF	22
2.4	Principales parametrizaciones que afectan la predicción numérica del viento	24
2.5	Parametrizaciones en WRF	25
2.6	Formatos de archivo de datos iniciales.....	26
Capitulo 3.	DESARROLLO DEL METODO	28
3.1	Introducción	28
3.2	Equipo de Computo	30
3.3	Configuración de la simulación	30
3.4	Ubicación y descripción general de la zona de estudio	31
3.5	Análisis de las observaciones del parque eólico	32
3.6	Estadística de los resultados de la simulación	35
Capitulo 4.	RESULTADOS	36
4.1	Introducción	36
Capitulo 5.	CONCLUSIONES	48
5.1	Conclusiones	48

Capitulo 6. TRABAJO FUTURO	49
6.1 Trabajo futuro	49
Bibliografía	50

II. Lista de tablas

TABLA 1: ESCALAS TEMPORALES EN EL PRONÓSTICO DE LA ENERGÍA EÓLICA. [2].....	11
TABLA 2: PERMISOS OTORGADOS POR LA COMISION REGULADORA DE ENERGIA PARA LA CONTRUCCION DE PARQUES EOLICOS EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA (CRE, 2013).....	18
TABLA 3: ORGANIZACIONES QUE PARTICIPAN EN EL DESARROLLO Y SOPORTE DE WRF.....	21
TABLA 4: OPCIONES FÍSICAS DE PARAMETRIZACIÓN DE CAPA LIMITE PLANETARIA Y SUPERFICIAL EN WRF.....	25
TABLA 5: DESCRIPCIÓN DE OPCIONES DE CAPA SUPERFICIAL EN WRF.....	25
TABLA 6: CONDENSADO DE POSIBILIDADES DE COMBINACIÓN DE LAS PARAMETRIZACIONES DE PBL Y SUPERFICIE.....	29
TABLA 7: CAMPOS BÁSICOS PARA LA CONFIGURACIÓN DE UNA SIMULACIÓN EN WRF.....	30
TABLA 8: RESUMEN DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS OBSERVACIONES DEL PARQUE EÓLICO LA RUMOROSA.....	32
TABLA 9: VARIABLES ESTADÍSTICAS DE LOS PRONÓSTICOS DE VELOCIDAD.....	44

III. Lista de figuras

FIGURA 1: PROYECCIÓN DE CAPACIDAD INSTALADA EN MÉXICO PARA 2022, (AMDEE).....	10
FIGURA 2: LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA DEL VIENTO ES EN EL EJE VERTICAL. EL TIEMPO ES EN EL EJE HORIZONTAL. [FIGURA DE C. FINLEY DE WINDLOGICS.] [7].....	14
FIGURA 3: GRÁFICA DE LA ROSA DE LOS VIENTOS CON LOS DATOS DEL PARQUE EÓLICO LA RUMOROSA, PARA EL PERIODO DE OCTUBRE 2013 – SEPTIEMBRE 2014, GENERADA CON EL SOFTWARE WRPLOT COPYRIGHT © 1995-2015 LAKES ENVIRONMENTAL SOFTWARE.	15
FIGURA 4: HISTOGRAMA DE LOS VIENTOS CON LOS DATOS DEL PARQUE EÓLICO LA RUMOROSA, PARA EL PERIODO DE OCTUBRE 2013 – SEPTIEMBRE 2014, GENERADA CON EL SOFTWARE WRPLOT COPYRIGHT © 1995-2015 LAKES ENVIRONMENTAL SOFTWARE.....	15
FIGURA 5: RED ELÉCTRICA PRINCIPAL ENTRE CFE Y SDG&E, (USAID, 2009)	16
FIGURA 6: UBICACIÓN DEL PARQUE EÓLICO LA RUMOROSA 1. EL ÁREA SOMBREADA REPRESENTA EL DOMINIO DE LA SIMULACIÓN. IMAGEN OBTENIDA DE GOOGLE EARTH EL DÍA 25 DE FEBRERO DE 2015	17
FIGURA 7: INTERACCIÓN DE LAS PARAMETRIZACIONES EN WRF [9].....	20
FIGURA 8: ARQUITECTURA DE WRF, (WILLIAM C. SKAMAROCK, 2008)	21
FIGURA 9: SISTEMA DE COORDENADA VERTICAL H DE WRF [11]	22
FIGURA 10: CAPA LIMITE PLANETARIA Y CAPA SUPERFICIAL.....	24
FIGURA 11: PROMEDIOS DE POTENCIA Y VELOCIDAD DE LOS 5 AEROGENERADORES. EN EL EJE DE LA IZQUIERDA POTENCIA EN [WATTS] Y A LA DERECHA VELOCIDAD DEL VIENTO EN [M/S]	28
FIGURA 12: IMAGEN OBTENIDA DEL DOMINIO PARA SIMULACIÓN DE LOS VIENTOS EN LA RUMOROSA BC	31
FIGURA 13: OBSERVACIONES DE VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL PARQUE EÓLICO PARA EL MES DE OCTUBRE 2013	33
FIGURA 14: OBSERVACIONES DE VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL PARQUE EÓLICO PARA EL MES DE DICIEMBRE 2013	33
FIGURA 15: OBSERVACIONES DE VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL PARQUE EÓLICO PARA EL MES DE FEBRERO 2014.....	34
FIGURA 16: OBSERVACIONES DE VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL PARQUE EÓLICO PARA EL MES DE MAYO 2014	34
FIGURA 17: OBSERVACIONES Y PRONÓSTICOS DE VELOCIDAD 27 AL 31 DE OCTUBRE 2013	36
FIGURA 18: OBSERVACIONES Y PRONÓSTICOS DE VELOCIDAD 11 AL 17 DE DICIEMBRE 2013	37
FIGURA 19: OBSERVACIONES Y PRONÓSTICOS DE VELOCIDAD - 9 AL 14 DE FEBRERO 2014	38
FIGURA 20: OBSERVACIONES Y PRONÓSTICOS DE VELOCIDAD - 11 AL 17 DE MAYO 2014	39
FIGURA 21: ERROR DE PRONOSTICO Y DIRECCIÓN - 27 AL 31 DE OCTUBRE 2013.....	40
FIGURA 22: ERROR DE PRONOSTICO Y DIRECCIÓN - 11 AL 17 DE DICIEMBRE 2013	41
FIGURA 23: ERROR DE PRONOSTICO Y DIRECCIÓN - 9 AL 14 DE FEBRERO 2014.....	42
FIGURA 24: ERROR DE PRONOSTICO Y DIRECCIÓN - 11 AL 17 DE MAYO 2014	43
FIGURA 25: (CURVA DE POTENCIA BASADA EN LOS SIGUIENTES PARÁMETROS: FRECUENCIA DE RED 50HZ; ANGULO PITCH REGULADO; VELOCIDAD DE ROTOR VARIABLE ENTRE 9.0-19.0 RPM)	45
FIGURA 26: HERRAMIENTA CURVE FITTING TOOL DE MATLAB, EN EL PANEL DE LA IZQUIERDA LA FUNCIÓN DE GAUSS Y SUS PARÁMETROS, A LA IZQUIERDA LA GRÁFICA DE LA FUNCIÓN DE GAUSS.	45
FIGURA 27: PRONOSTICO DE POTENCIA EÓLICA 27 AL 30 DE OCTUBRE	46
FIGURA 28: PRONOSTICO DE POTENCIA EÓLICA 12 AL 17 DE DICIEMBRE 2013.....	46
FIGURA 29: PRONOSTICO DE POTENCIA EÓLICA 9-14 DE FEBRERO 2014.....	47
FIGURA 30: PRONOSTICO DE POTENCIA EÓLICA 11-17 MAYO 2014	47

IV. Nomenclatura

ARW	INVESTIGACION AVANZADA DE WRF
CEEBC	COMISION ESTATAL DE ENERGIA DE BAJA CALIFORNIA
CRE	COMISION REGULADORA DE ENERGIA
MW/h	MEGAWATT/HORA
NARR	REANALISIS REGIONAL DE NORTEAMERICA
NCAR	CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACION ATMOSFERICA EEUU
NCEP	CENTRO NACIONAL PARA LA PREDICION AMBIENTAL EEUU
NCL	LENGUAJE DE COMANDO DE NCAR
NREL	LABORATORIO NACIONAL DE ENERGIA RENOVABLE DE EEUU
PBL	CAPA LIMITE PLANETARIA
SDG&E	COMPAÑIA DE GAS Y ENERGIA DE SAN DIEGO
USDOE	DEPARTAMENTO DE ENERGIA DE LOS ESTADOS UNIDOS
WASP	WIND ATLAS ANALYSIS AND APPLICATION PROGRAM
WPF	PRONOSTICO DE POTENCIA EOLICA
WRF	INVESTIGACION Y PRONOSTICO DEL TIEMPO

Capítulo 1. INTRODUCCION

1.1 Introducción

El rápido crecimiento que tiene la generación eólica en el mundo y en el país (Fig. 1), exige estudiar el comportamiento del viento de una manera más estricta.

El viento es un recurso renovable caprichoso, si bien podemos describirlo con variables estadísticas como la velocidad media, no podemos basarnos en esta para la toma de importantes decisiones de la operación diaria de las instalaciones eólicas, aun incluso para justificar la puesta en marcha de proyectos de gran magnitud donde según el reporte anual del mercado de energía eólica, realizado por el departamento de energía de Estados Unidos, las inversiones en 2013 del costo total del proyecto aproximadamente fueron de \$1,630/kW (Dólares estadounidenses de 2013 por kilowatt instalado) y en cuanto al costo de la energía se habla de entre 22 y 55 \$USD/MWh (Dólares EU de 2013 por Megawatt-hora) promedios normalizados por acuerdos de precio de compra. [1].

Implementar un pronóstico del viento nos daría la posibilidad de anticiparnos a los cambios en las condiciones del clima y en consecuencia a la producción de energía eólica, para así poder predecir la energía disponible por cierto periodo en el futuro, reduciendo la incertidumbre y dándonos la posibilidad de tomar decisiones operativas como por ejemplo el compromiso de energía que se transmitirá o inyectará a la red eléctrica por día adelantado y, de esta manera, el controlador del sistema eléctrico podrá reducir generación de energía convencional.

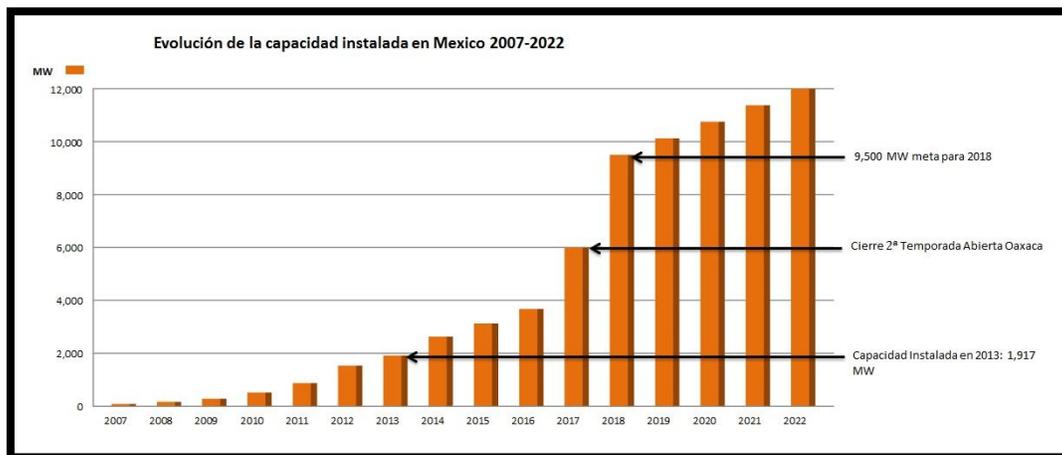


Figura 1: Proyección de capacidad instalada en México para 2022, (AMDEE)

Algo que a primera vista pareciera sencillo como un pronóstico, se vuelve complicado por las dificultades que se presentan al realizarlo en zonas de terreno con pendientes pronunciadas, o por la presencia de fenómenos meteorológicos que pudieran afectar el comportamiento de los vientos. Los modelos de predicción meteorológica se han vuelto cada vez más complejos y sofisticados para representar adecuadamente los fenómenos que ocurren en la atmósfera y, en consecuencia, dar predicciones más exactas. En el mismo sentido, a través de una simulación se podría describir la climatología de los vientos mediante el análisis de los datos generados por el simulador, identificar las zonas con mejor potencial y reservarlas para la producción eólica, reducir la incertidumbre de las decisiones financieras para nuevos proyectos resultado de no tener datos de viento disponibles en zonas remotas o de difícil acceso y mejorar la operación de los proyectos en funcionamiento.

Para tal fin, *los modelos atmosféricos regionales resuelven las ecuaciones de movimiento suponiendo una atmósfera no hidrostática (es decir, no asumen equilibrio entre la fuerza del gradiente de presión vertical y la atracción gravitatoria), lo que les permite alcanzar alta resolución espacial en las simulaciones. A pesar de la complejidad que los modelos regionales han adquirido en las últimas décadas, todavía presentan limitaciones que nos impiden usar las simulaciones numéricas como sustituto de la realidad. En este sentido, la comunidad científica internacional continúa implementando modelos que ayuden a mejorar las estimaciones, tal es el caso de la Unidad de Energía Eólica del CIEMAT que se encuentra colaborando con el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas de Estados Unidos (NCAR) para proporcionar mejores estimaciones numéricas del viento cerca de la superficie terrestre, mediante el modelo de investigación y predicción del tiempo WRF (Weather Research and Forecasting)* <http://www.ciemat.es/portal.do?IDM=61&NM=2&identificador=51>

En la tabla 1 se resumen las aplicaciones del pronóstico de energía eólica en los diferentes horizontes temporales y su importancia para la operación de los parques eólicos. Aunque distintos autores difieren en la clasificación exacta de los periodos de pronóstico, se tomó como base la definición del reporte “A Review of Wind Power Forecasting Models”, elaborado por USDOE en septiembre de 2011 [2].

Tabla 1: Escalas temporales en el pronóstico de la energía eólica. [2]

ESCALA TEMPORAL	RANGO	APLICACIONES
INMEDIATO-CORTO PLAZO	8 HORAS POR DELANTE	OPERACION EN TIEMPO REAL DE LA RED ELECTRICA
		ACCIONES DE REGULACION
CORTO PLAZO	DIA ADELANTE	DESPACHO LOCAL ECONOMICO
		DECISIONES DE CARGAS EN LA RED
		DISMINUIR LA INCERTIDUMBRE EN MERCADOS DE ENERGIA
LARGO PLAZO	VARIOS DIAS	PLANEACION Y MANTENIMIENTO
		ADMINISTRACION DE OPERACION
		OPTIMIZACION DE COSTOS DE OPERACION

1.2 Antecedentes

Para el pronóstico de energía eólica se han utilizado métodos numéricos, estadísticos y de inteligencia artificial.

A continuación se presenta un resumen de principales conclusiones del reporte “pronóstico de energía eólica (WPF)” a corto plazo para parques eólicos” obtenido del reporte “Wind Power Forecasting: State-of-the-Art 2009” [3]:

- La combinación de varios modelos estadísticos para los pronósticos del día siguiente sirven para disminuir el error del pronóstico.
- La información espacial y temporal de un área amplia mejora la previsión del parque eólico.
- El error del pronóstico numérico se puede reducir mediante el uso de algoritmos de optimización para la función de selección y ajuste de parámetros.
- Los autores mostraron que la combinación de varios pronósticos de predicción numérica del tiempo puede mejorar fácilmente el error de predicción.
- Mejoras en el rendimiento inicial se pueden lograr mediante el suministro de una curva "teórica" del parque eólico de potencia calculado con WASP (Wind Atlas Analysis and Application Program) en especial para los nuevos parques eólicos.
- Medidas de estabilidad y modelos de meso escala puede mejorar aún más los modelos físicos.
- El rendimiento de los modelos está fuertemente relacionado con la complejidad del terreno del parque eólico.

Métodos de pronóstico de energía eólica comerciales

Los modelos de pronóstico numérico no predicen por si solos energía eólica, primeramente calculan las velocidades punto por punto en una malla predeterminada y posteriormente se calcula la energía producida por los aerogeneradores, donde ésta depende de las características de cada máquina en particular.

Algunas de las dificultades para la predicción de energía eólica se encuentran en las propias turbinas. La arquitectura de los aerogeneradores requiere software de control sofisticado que se utiliza para gestionar y regular la salida de las máquinas. Los algoritmos de control pueden ser ad-hoc a la ubicación de la turbina y particularizados en base a una variedad de necesidades por parte del cliente. A veces, para mitigar las cargas o para regular el ruido, la salida de potencia de la turbina se puede reducir independientemente de la velocidad instantánea del viento. Por lo tanto, conocer la velocidad del viento en un sitio no es suficiente para el pronóstico de energía. A menudo, estos mecanismos de control dependen de una dirección del viento en particular o de ciertas horas del día. Estas consideraciones deben incluirse en la conversión de viento para poder predecir con exactitud la potencia eólica. Generalmente, los modelos físicos de pronóstico cuentan con varios tipos de representación de los procesos que ocurren en la atmósfera, a estos se les llama parametrizaciones. Las ventajas de cambiar de parametrizaciones es que da lugar a una mayor diversidad de soluciones del modelo, posiblemente en alusión a la capacidad de los modelos de crear una gama más amplia de posibles resultados. Varios estudios han comparado las diferencias entre los sistemas de capa límite y observaciones. [4]

Los métodos de pronóstico comerciales utilizan varios modelos físicos, estadísticos o una combinación de estos. Los esquemas de predicción de viento también se pueden clasificar en función de su metodología en dos categorías:

Enfoque físico (enfoque determinista): El Método físico o método determinista se basa en la baja atmósfera o la predicción numérica del tiempo (PNT) a partir de datos del tiempo como la temperatura, la presión, la rugosidad superficial y obstáculos.

Enfoque estadístico: El método estadístico se basa en gran cantidad de datos históricos sin tener en cuenta las condiciones meteorológicas. Por lo general, utiliza inteligencia artificial (redes neuronales, redes de lógica difusa) y los enfoques de análisis de series de tiempo. [2]

A continuación se enlistan algunos ejemplos de modelos comerciales de pronóstico del viento:

eWind de AWS TruePower genera predicciones basadas en tres modelos meteorológicos distintos: MASS, su modelo propietario (simulación atmosférica de meso-escala) el modelo Omega, y WRF. Ellos específicamente se centran en alta resolución para capturar los efectos de la topografía y uso de la tierra [5]

WPPT, desarrollado por la Universidad Técnica de Dinamarca, utiliza una combinación de modelos estadísticos no lineales, la potencia de salida en línea de los parques eólicos seleccionados, la producción de energía eólica histórica y predicción numérica para generar predicciones hasta 36 horas antes. [6]

Prediktor es un modelo físico que utiliza la salida predicción numérica para modelar el comportamiento del viento y WASP (Atlas Eólico y Programa de Análisis) para modelar los efectos locales del terreno. El resultado final es una predicción de la producción de energía del parque eólico cada tres horas se extienden hasta las 48 horas (*Prediktor* sitio web).

Según el sitio web de AWS Truewind con respecto a su producto *eWind*, "Para las previsiones próximas por hora, el MAE normalmente oscila entre un 4% y un 6%, lo que representa una mejora del 15 a 25% en la puntuación de habilidad sobre la persistencia. Para los pronósticos al día siguiente (12 horas y más allá), el MAE normalmente oscila entre 14% a 22%, una mejora del 40 al 60% en el índice de habilidad sobre los modelos climatológicos de referencia. ". A pesar de los muchos modelos actualmente en uso, aún existen retos para hacer predicciones de energía eólica precisa. El primero de estos retos es mejorar los algoritmos de modelo y parametrizaciones. Otros desafíos incluyen la mejora de la estimación de viento a la altura de la turbina y para mejorar el pronóstico. [5]

1.3 Fenómenos que provocan variaciones (rampas) en la producción de energía eólica

Los eventos rampa son generalmente causados por los cambios en la velocidad del viento. El momento, la duración y amplitud de estos eventos son importantes para las predicciones precisas. Los eventos rampa de viento son inherentemente difíciles de pronosticar con precisión y pueden ser causados por muchos fenómenos meteorológicos en todas las escalas, incluyendo el desarrollo o el movimiento de los sistemas meteorológicos en gran escala, tormentas, procesos de capa límite, incluyendo la mezcla vertical y el calentamiento diurno, efectos de terrenos complejos; flujos térmicamente forzados, por ejemplo la brisa del mar y las corrientes de valle - montaña. En la (figura 2) podemos ver la amplia variedad de fenómenos meteorológicos que producen rampas de energía eólica durante un período de 5 días. [7]



Figura 2: La producción de energía del viento es en el eje vertical. El tiempo es en el eje horizontal. [Figura de C. Finley de WindLogics.] [7]

1.4 Disponibilidad del Recurso Eólico en la Sierra Juárez

Existe una elevada concentración de recurso eólico en el Estado de Baja California, donde las mejores condiciones de viento se encuentran a lo largo de la Sierra Juárez, en especial en la región de La Rumorosa.

Estudios del Departamento de Energía de Estados Unidos (US DOE, por sus siglas en inglés) y el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos (NREL) señalan que existe un potencial de 500-1,800 MW de generación eólica en el estado de Baja California. Otros estudios sugieren que existe un potencial significativamente mayor, incluyendo en las estimaciones otras áreas de la Sierra Juárez. Por otra parte, la iniciativa del estado de California, EUA, para la transmisión de energía renovable, estimó que Baja California tendría un potencial eólico de 2,400 MW, y existen también estimaciones de otras fuentes que señalan un potencial de hasta 10,000 MW. [8].

La Comisión Estatal de Energía del Gobierno del Estado de Baja California nos facilitó los datos de los 5 aerogeneradores ubicados en el parque eólico la Rumorosa 1. En la (figura 3 y 4) respectivamente, podemos ver la rosa de los vientos y el histograma de vientos de los datos mencionados

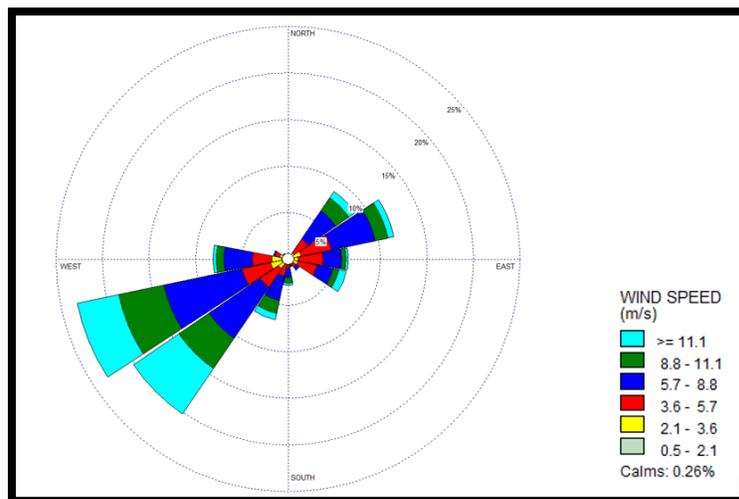


Figura 3: Gráfica de la rosa de los vientos con los datos del Parque Eólico La Rumorosa, para el periodo de Octubre 2013 – Septiembre 2014, generada con el software WRPLOT Copyright © 1995-2015 Lakes Environmental Software.

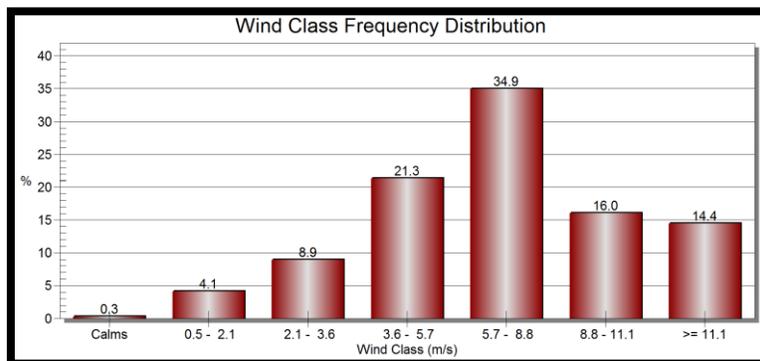


Figura 4: Histograma de los vientos con los datos del Parque Eólico La Rumorosa, para el periodo de Octubre 2013 – Septiembre 2014, generada con el software WRPLOT Copyright © 1995-2015 Lakes Environmental Software

El estado de Baja California cuenta con infraestructura de interconexión con el estado de California del país vecino Estados Unidos, lo cual permite un intercambio de energía eléctrica entre ambas partes. Al oeste de Mexicali, se encuentran 2 plantas de ciclo combinado de la empresa internacional Sempra Energy, la cual exporta la energía a estados unidos y se conecta con la red de la compañía eléctrica de San Diego EU (SDG&E por sus siglas en inglés) (Figura 5). Actualmente (Los primeros meses del año 2015) en la Rumorosa, que será donde será el caso de estudio de este trabajo, se está instalando la primera etapa del proyecto eólico de la compañía sierra Juárez, filial de Sempra, el cual exportara el total de la energía al Estado de California.

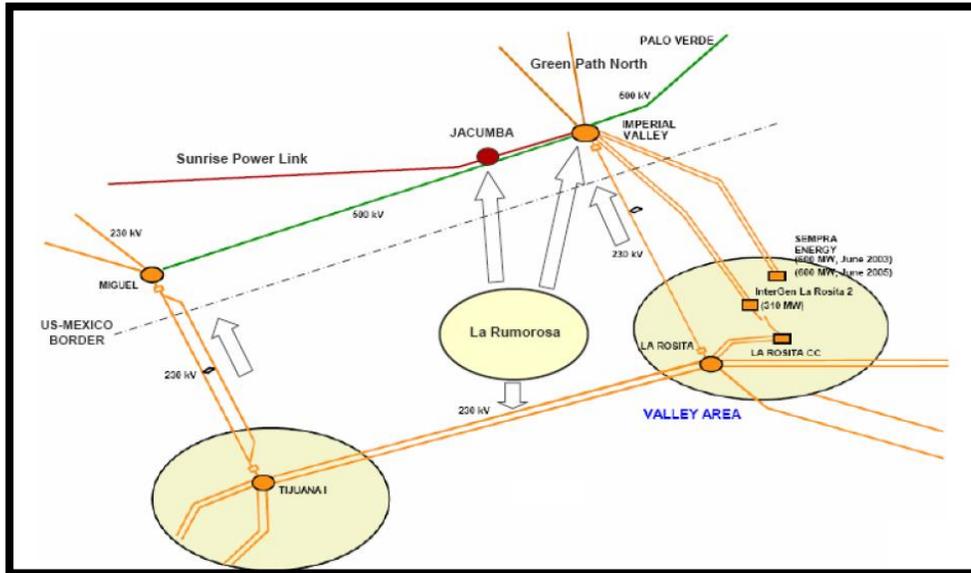


Figura 5: Red Eléctrica Principal entre CFE y SDG&E, (USAID, 2009)

1.5 Planteamiento del problema

Debido a la naturaleza intermitente de la energía eólica, la producción eléctrica de los aerogeneradores varía, por tanto, es necesario estudiar el comportamiento del viento a través del pronóstico del clima, para simular las condiciones de operación de los aerogeneradores y las condiciones de la red eléctrica y así poder estimar la penetración eólica y comparar resultados de diferentes configuraciones del sistema de transmisión eléctrica con la que cuenta actualmente la zona de La Rumorosa (Figura 6).

Con la utilización del simulador se esperaría obtener información a priori para proponer los parámetros óptimos del parque eólico y el total de energía que éste produzca y así poder hacer una planeación que mejore la confiabilidad y eficiencia del sistema eléctrico al que esté interconectado. En este estudio se proporcionará una metodología que contribuirá a planificar la instalación de nuevos parques eólicos que ya cuentan con permiso de la Comisión Reguladora de Energía, pero que no se han emplazado a causa de cuestiones técnicas.

Se tomara como base del estudio el Parque Eólico La Rumorosa, operado por el gobierno del estado de Baja California, en su primera etapa de un conjunto de parques eólicos que cuenta con 5 Aerogeneradores de la marca Gamesa modelo G87 de 2 MW de capacidad nominal para un total de 10 MW. Este proyecto está ubicado en las coordenadas Latitud 32.5°N y Longitud 116.09°W y elevación cercana a los 1300 msnm (Figura 6).

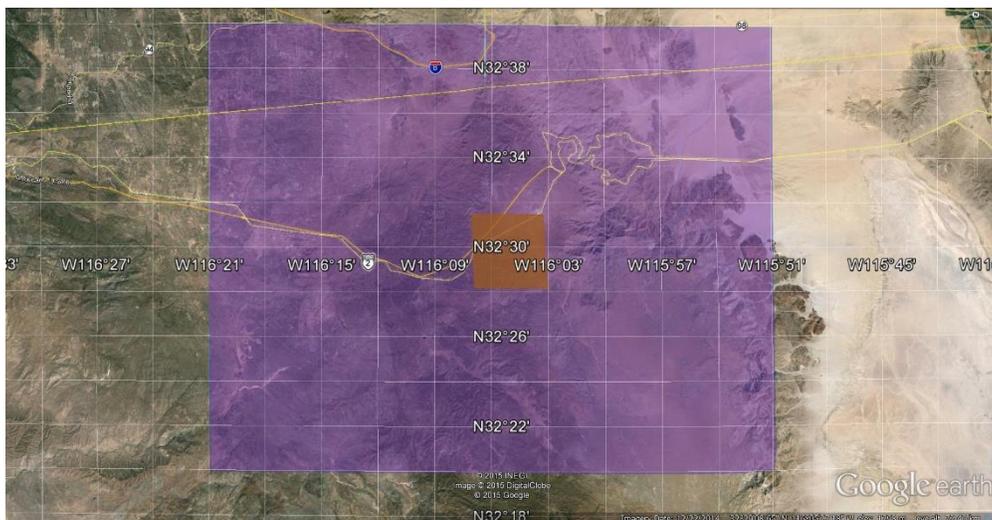


Figura 6: Ubicación del Parque Eólico La Rumorosa 1. El área sombreada representa el dominio de la simulación. Imagen obtenida de Google Earth el día 25 de febrero de 2015

En el año 2014 arrancó un nuevo proyecto de la compañía Energía de sierra de Juárez de la trasnacional Sempra Energy, en su primera etapa, con una inversión de 300 millones de dólares y una capacidad de 155 MW con 47 aerogeneradores de la marca Vestas, de una capacidad de 3.3 MW

Tabla 2: PERMISOS OTORGADOS POR LA COMISION REGULADORA DE ENERGIA PARA LA CONTRUCCION DE PARQUES EOLICOS EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA (CRE, 2013)

NUMERO DE PERMISO	501	538	596	645
PERMISIONARIO	MUNICIPIO DE MEXICALI	MPG RUMOROSA, S. A. P. I. DE C. V.	ENERGÍA SIERRA JUÁREZ, S. DE R. L. DE C. V.	WIND POWER DE MÉXICO, S. A. DE C. V.
MODALIDAD	AUT.	AUT.	EXP.	EXP.
FECHA DE OTORGAMIENTO	15/10/09	2/12/2010	14/06/12	14/02/13
CAP. AUTORIZADA (MW)	10	72	156	300.8
ENERGIA AUTORIZADA (GWh/AÑO)	27	220.75	403.1	998
INVERSION (MILES DE DOLARES)	\$20,000.00	\$144,000.00	\$312,000.00	\$601,600.00
FECHA DE ENTRADA EN OPERACIÓN	29/10/09	19/12/13	30/09/14	30/09/15
ACTIVIDAD ECONOMICA	MUNICIPAL	INDUSTRIAS DIVERSAS	EXPORTACION	EXPORTACION
TIPO DE PLANTA (TECNOLOGIA)	EOLOELECTRICA	EOLOELECTRICA	EOLOELECTRICA	EOLOELECTRICA
ESTADO ACTUAL	EN OPERACION	EN CONSTRUCCION	EN CONSTRUCCION	EN CONSTRUCCION
UBICACION DE LA PLANTA	BAJA CALIFORNIA	BAJA CALIFORNIA	BAJA CALIFORNIA	BAJA CALIFORNIA

1.6 Hipótesis

Si se logra disminuir la incertidumbre de la producción de energía eólica a corto plazo (hasta 72 horas) en la región de la rumorosa mediante la evaluación de la habilidad del modelo WRF (Weather Research and Forecast) para la predicción de las velocidades de viento; permitirá contar con herramientas para hacer una mejor planeación de la producción eólica y así mejorar la confiabilidad y eficiencia de la red eléctrica de la región.

1.7 Objetivos

Objetivos generales

- ✓ Utilizar el modelo Weather Research and Forecast (WRF) para realizar un pronóstico de los vientos de corto plazo para el estudio de sistemas de generación eólica.
- ✓ Encontrar las parametrizaciones, que logren el mejor pronóstico.
- ✓ Describir la climatología de la región de estudio a través los datos de salida del modelo

Objetivos específicos

- ✓ Interpolación de velocidad de viento a la altura de rotor 80 o 100m (altura de Aerogenerador)
- ✓ Obtener la función de la curva de potencia del aerogenerador para evaluarla
- ✓ Evaluar la exactitud del pronóstico
- ✓ Desarrollar un método sencillo para poder mejorar el pronóstico de potencia eólica

Capítulo 2. MARCO TEORICO

2.1 Introducción

Siempre hemos estado interesados en predecir eventos futuros, sobre todo pronósticos del tiempo, para lograr esto han sido necesarios grandes avances en las ciencias, particularmente de la computación y de la atmósfera, para llegar a pronosticar las condiciones del tiempo a través de modelos matemáticos que tratan de representar los procesos físicos que ocurren en la atmósfera.

Las dificultades que existen en los pronósticos son numerosas, y algunas son más fáciles de resolver que otras. En los modelos de pronóstico del tiempo típicos, el dominio del modelo puede alcanzar cientos de kilómetros, donde, para encontrar la solución es necesario seccionar el dominio en partes más pequeñas y resolver las ecuaciones del modelo para cada sección sucesivamente; De los resultados de cada segmento calculado se puede inferir el estado general de la atmósfera, pero todavía existe una falta de representación de procesos más finos que no se pueden modelar explícitamente porque no se entienden por completo o porque no hay información suficiente para poder representar apropiadamente el estado inicial del dominio. La mayoría de los modelos están diseñados con un dominio mayor para captar los patrones sinópticos del clima.

Para incluir los procesos que el núcleo del modelo no logra captar o representar adecuadamente, existen las parametrizaciones, que son una forma de incluir estos procesos con la información disponible. Las interacciones entre los esquemas de parametrización, donde cada esquema contiene su propio conjunto de errores y supuestos (por ejemplo, un modelo de suelo y el esquema de radiación intercambian información de sus variables sobre el calentamiento de la capa límite) y la creciente complejidad e interconexión de parametrizaciones, dan lugar a errores de predicción que son más difíciles de rastrear a los procesos específicos. Los modelos de pronóstico vienen en muchas configuraciones, cada modelo tiene sus fortalezas y debilidades pero éstas se pueden estudiar y ajustar, al observar los distintos esquemas de parametrización disponibles.

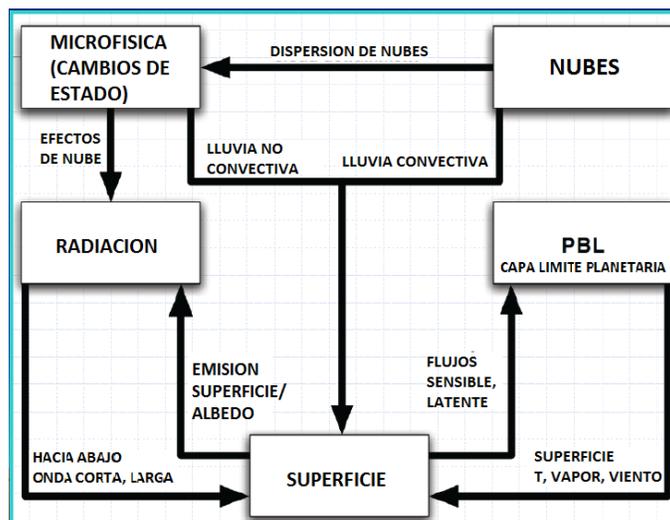


Figura 7: Interacción de las parametrizaciones en WRF [9]

2.2 WRF: Weather Research Forecast

Es un Modelo meso-escala de predicción numérica del clima, diseñado para investigación y desarrollo de pronósticos atmosféricos e investigaciones de pronóstico operacional. Sistema de asimilación de datos y arquitectura de software para cómputo en paralelo y extensibilidad de sistemas.

WRF es utilizado como una herramienta común para universidades / investigación y las comunidades operacionales para promover vínculos más estrechos entre ellos y hacer frente a las necesidades de ambos. El desarrollo de WRF ha sido un esfuerzo de varias agencias (Tabla 3) para construir un modelo de pronóstico de meso-escala de última generación y un sistema de asimilación de datos para avanzar en la comprensión y la predicción del tiempo a meso escala y acelerar la transferencia de los avances de la investigación en las operaciones.

WRF es un código flexible y eficiente en entornos que van desde las supercomputadoras paralelas a los portátiles. Su modularidad del código de una sola fuente se puede configurar para la investigación y las aplicaciones operativas. Su amplia gama de opciones de física y dinámica refleja la experiencia y las aportaciones de la comunidad científica en general. La asimilación de datos del sistema WRF-Var puede ingerir una gran cantidad de tipos de observación en la búsqueda de condiciones iniciales óptimas, mientras que el modelo WRF-Chem proporciona una capacidad para el modelado de la química del aire.

Los principales componentes del sistema de WRF se representan en la (Figura 8). El Marco de Software WRF (WSF) que proporciona la infraestructura para adaptar los solucionadores de dinámica, paquetes de física que se interconectan con los solucionadores, programas para la inicialización, WRF-Var y WRF-Chem.

Hay dos solucionadores de dinámica: solucionador de investigación avanzada WRF ARW (Advanced Research Weather) (originalmente se refería a sistema de masa euleriano desarrollado principalmente en el NCAR, y el solucionador NMM (modelo de mesoescala no hidrostático) desarrollado en NCEP. El apoyo de la comunidad al anterior es brindado por la División de NCAR MMM y que para este último es proporcionado por Developmental Testbed Center (DTC). [10]

Tabla 3: Organizaciones que participan en el desarrollo y soporte de WRF

(NCAR)	National Center for Atmospheric Research's
(MMM)	Mesoscale and Microscale Meteorology Division
(NOAA)	National Oceanic and Atmospheric Administration's
(NCEP)	National Centers for Environmental Prediction
(ESRL)	Earth System Research Laboratory
(AFWA)	Department of Defense's Air Force Weather Agency
(NRL)	Naval Research Laboratory
(CAPS)	Center for Analysis and Prediction of Storms at the University of Oklahoma
(FAA)	Federal Aviation Administration

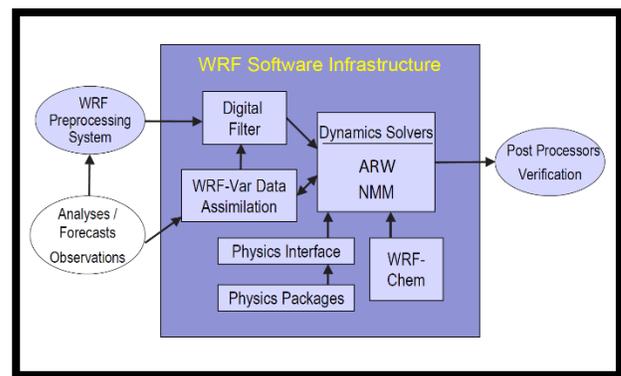


Figura 8: Arquitectura de WRF, (William C. Skamarock, 2008)

2.3 Sistema de coordenadas del modelo WRF

El modelo WRF y su solucionador dinámico ARW (Advanced Research WRF) integra las ecuaciones compresibles, no hidrostáticas de Euler. Las ecuaciones en forma de flujo utilizan variables conservativas, por ejemplo la temperatura potencial.

Las ecuaciones se formularon con la coordenada vertical de presión que sigue al terreno. Denotada por η que puede tener un valor entre cero y uno (figura 9), definida por:

$$\eta = (P_h - P_{ht})/\mu \quad \text{Ec. 1}$$

$$\mu = P_{hs} - P_{ht}$$

Donde:

P_{hs} = Presion en la superficie de terreno

P_{ht} = Presion en la frontera superior

P_h = Componente hidrostática de la presión

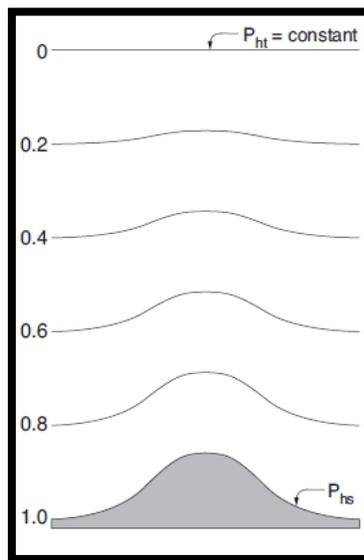


Figura 9: Sistema de coordenada vertical η de WRF [11]

Puesto que $\mu(x,y)$ representa masa por unidad de área en una columna del modelo, las variables en forma de flujo son:

$$\mathbf{Velocidad} = \mu \mathbf{V} = (\mathbf{U}, \mathbf{V}, \mathbf{W}),$$

$$\Omega = \mu \dot{\eta},$$

$$\Theta = \mu \theta$$

Donde $v=(u,v,w)$ son las velocidades covariantes en las 2 direcciones horizontales y la vertical, mientras que $\omega = \dot{\eta}$ es la velocidad vertical contravariante. Θ es la temperatura potencial.

También aparecen en las ecuaciones las variables no conservativas

$\varphi = gz$ (Geopotencial), p (presión), y $\alpha = 1/\rho$ (el inverso de la densidad).

Usando las variables definidas, las ecuaciones parciales de Euler en forma de flujo se pueden escribir:

$$\partial_t U + (\nabla \cdot Vu) - \partial_x(p\Phi_\eta) + \partial_\eta(p\Phi_x) = FU$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot Vv) - \partial_y(p\Phi_\eta) + \partial_\eta(p\Phi_y) = FV$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot Vw) - g(\partial_\eta p - \mu) = FW$$

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot V\Theta) = F\Theta$$

Los términos de la derecha son los términos de forzamientos que aparecen de la física (parametrizaciones), mezclado turbulento, proyecciones esféricas y la rotación de la tierra. Las ecuaciones de arriba están escritas en forma conservativa

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot V) = 0$$

La derivada material de la definición de geopotencial:

$$\partial_t \varphi + \mu^{-1}[(V \cdot \nabla \Phi) - gW] = 0$$

Junto con la ecuación diagnóstico para el inverso de la densidad (Balance hidrostático)

$$\partial_\eta \varphi = -\alpha \mu,$$

Y la ecuación de estado

$$p = p_0 (R_d \theta / p_0 \alpha)^\gamma$$

$\gamma = c_p/c_v = 1.4$ Es la relación de calores específicos del aire seco y húmedo, R_d es la constante de gas para aire seco y p_0 es la presión de referencia (típicamente 10^5 pascales). [21]

2.4 Principales parametrizaciones que afectan la predicción numérica del viento

La capa límite planetaria es la parte de la atmósfera que está definida como: “La parte de la troposfera que está directamente influenciada por la presencia de la superficie de la tierra, y responde a los forzamientos de una escala temporal de una hora o menos” [11]. Con una profundidad de PBL típicamente en el intervalo desde cientos hasta 1500 m de profundidad y limitada por una inversión superpuesta, la velocidad del viento, la temperatura y la humedad cambian rápidamente con la altura en la capa superficial

La capa de superficie, influye directamente en las actividades diarias de casi toda la vida en el planeta Tierra. Se extiende hasta una altura de 50 a 100 metros de orden, que posee propiedades físicas y químicas que tienen un poder de control sobre una amplia gama de intereses humanos y sociales. En las ciencias de la atmósfera, la profundidad de la capa de superficie se establece por convención como 10% de la profundidad de la capa límite planetaria completa (Figura 10) [12]

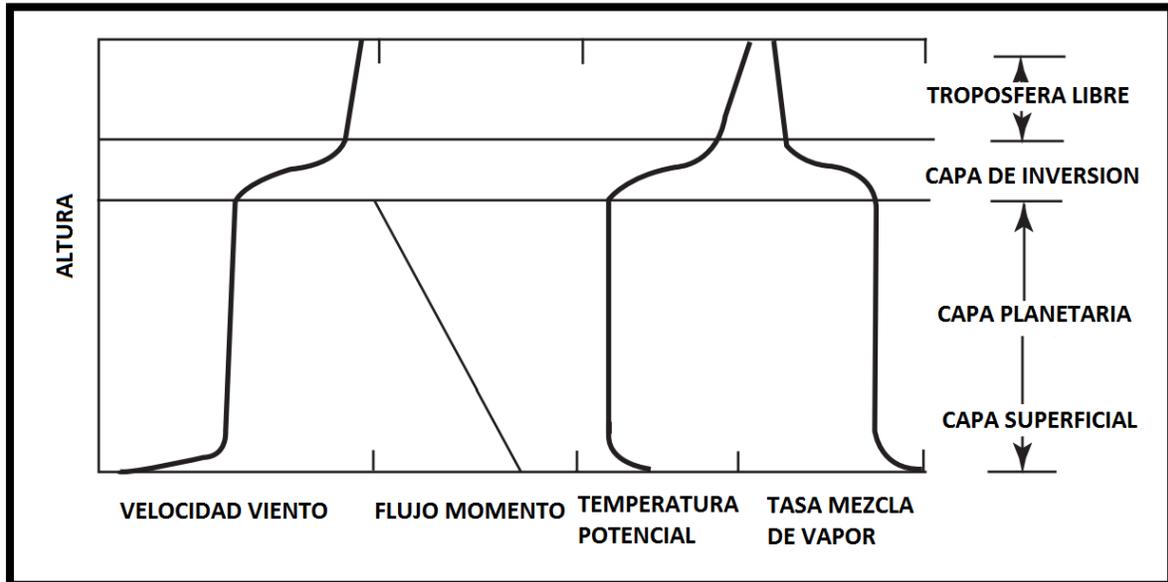


Figura 10: Capa Limite Planetaria y Capa Superficial

2.5 Parametrizaciones en WRF

Un esquema de parametrización es un subcomponente de un modelo diseñado para una tarea específica. Este subcomponente ayuda a la optimización de la eficiencia computacional. Un modelo de pronóstico tiene muchas parametrizaciones, por ejemplo, hay parametrizaciones diseñadas específicamente para resolver, radiación, interacciones entre el suelo y la capa superficial, cambios de fase del agua y otros. Puesto que los sistemas reales tienen procesos muy complejos, estos se parametrizan para aproximarse a la atmósfera real. Hay muchas opciones y no existe una mejor que otra para cada situación, pero un ensamble con distintos esquemas de parametrización puede ser una importante herramienta para mejorar la habilidad del pronóstico. Las tablas (4 y 5) son las opciones de parametrización de capa límite y capa superficial que se utilizaron en este trabajo.

Tabla 4: Opciones físicas de parametrización de capa límite planetaria y superficial en WRF

Opción de CLP	Nombre	Funciona opción Superficie	con de	Descripción
1	YSU	1		Yonsei University: Esquema K-no-local con capa de atrapamiento explícito y perfil K parabólico en capa mixta inestable.
2	MYJ	2		Mellor-Yamada-Janjic: Esquema Eta operacional. Esquema de energía cinética turbulenta unidimensional pronostica con mezclado vertical local
4	QNSE	4		Quasi-Normal Scale Elimination. Predicción de energía turbulenta cinética opcional que utiliza una nueva teoría para regiones estratificadas estables.
6	MYNN3	1, 2		Esquema de energía turbulenta cinética Mellor-Yamada Nakanishi y Niino.
9	UW	1, 2, 5		Esquema de energía turbulenta cinética del modelo climático CESM.

Tabla 5: Descripción de opciones de capa superficial en WRF

Opción Capa de Superficie	Descripción
1	Monin-Obukhov Similarity scheme: Basado en la teoría de Monin-Obukhov con sub-capa viscosa Carlson-Boland y funciones estándar de similaridad obtenidas de tablas preestablecidas.
2	Monin-Obukhov (Janjic Eta): Basado en la teoría de similaridad con sub-capas viscosas sobre superficies sólidas o sobre el agua. Este esquema está probado y es usado operacionalmente por NCEP (Centro Nacional para la Predicción Ambiental)
4	Quasi-Normal Scale Elimination: Opción de superficie para utilizarse con el esquema de capa límite QNSE

2.6 Formatos de archivo de datos iniciales

NetCDF

NetCDF (network Common Data Form) es un conjunto de interfaces para acceso a datos orientados a matriz y una colección de distribución gratuita de librerías de acceso a datos para C, Fortran, C++, Java y otros lenguajes. Las librerías netCDF soportan un formato independiente de la máquina para la representación de los datos científicos. En conjunto, las interfaces, las librerías, y el formato apoyan la creación, el acceso y el intercambio de datos científicos.

El formato NetCDF es:

1. Auto descriptivo: Un archivo netCDF incluye información sobre los datos que contiene.
2. Portátil: Un archivo netCDF se puede acceder mediante sistemas con diferentes formas de almacenar números enteros, caracteres y números de punto flotante.
3. Escalable: Un pequeño subconjunto de un gran conjunto de datos se puede acceder de manera eficiente.
4. Anexables: Los datos pueden ser añadidos a un archivo netCDF debidamente estructurado sin copiar el conjunto de datos o la redefinición de su estructura.
5. Para compartir: Un escritor y múltiples lectores pueden acceder simultáneamente el mismo archivo netCDF.
6. Archivable: El acceso a todas las formas anteriores de datos netCDF será apoyado por las versiones actuales y futuras del software.

El software netCDF fue desarrollado por Glenn Davis, Russ Rew, Ed Hartnett, John Caron, Dennis Heimburger, Steve Emmerson, Harvey Davies, y Ward Fisher en el Programa del Centro Unidata en Boulder, Colorado, con contribuciones de muchos otros usuarios netCDF. [14]

Formato Grib

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) Comisión de Sistemas Básicos (CSB) Número Extraordinario VIII Reunión de 1985 aprobó un formato de intercambio de datos orientado a bits de propósito general, designado FM 92-VIII Ext. GRIB (GRIdded binario). Es un vehículo eficiente para la transmisión de grandes volúmenes de datos reticulados a centros automatizados a través de líneas de telecomunicaciones de alta velocidad utilizando protocolos modernos. El formato GRIB, se puede hacer comprimir y permite transmisiones de computadora a computadora más rápidas. Este formato GRIB puede igualmente servir como un formato de almacenamiento de datos, generando las mismas eficiencias relativas al almacenamiento de información y dispositivos de recuperación.

Los cambios y ampliaciones de GRIB fueron aprobados en la reunión ordinaria de la OMM en febrero de 1988; algunos cambios adicionales se introdujeron en mayo de 1989 y en octubre de 1990. Los cambios en 1990 fueron de tal magnitud estructural como para requerir una nueva edición de GRIB. El comité hizo nuevos aumentos e interpretaciones sobre la representación de datos y códigos en septiembre de 1993, con la aprobación en febrero de 1994. Estos cambios no dieron lugar a una nueva edición de GRIB, pero hizo cambiar algunas de las Tablas, dando como resultado un nuevo número de versión para ellos. Esto nos lleva ahora a la Tabla Versión 2. Los cambios desde la versión 1 eran principalmente adiciones de nuevos parámetros o definición más precisa de los ya existentes. [15]

Datos Reanálisis NARR

En 1997, durante las últimas etapas de la producción del Reanálisis global NCEP-NCAR, se sugirió la exploración de un proyecto nuevo, el análisis regional, sobre todo si el sistema regional de asimilación de datos es significativamente mejor que el nuevo análisis global en la captura ciclo hidrológico regional, el ciclo diurno y otras características importantes del tiempo y la variabilidad del clima. "Después del desarrollo y esfuerzo de seis años, el proyecto de NCEP Reanálisis Regional Norteamericano (NARR) se completó en 2004, y los datos ya están disponibles para la comunidad científica. Junto con el uso del modelo Eta de NCEP y su sistema de asimilación de datos (a los 32 km / 45 Resolución capa con salida cada 3 horas), las señas de identidad de la NARR son la incorporación de asimilación horaria de precipitación, que aprovecha un esfuerzo del análisis exhaustivo de la precipitación, uso de una versión reciente del modelo de superficie de tierra Noah, y el uso de muchos otros conjuntos de datos que son adicionales o mejorados en comparación con el Reanálisis global. [16]

Capítulo 3. DESARROLLO DEL METODO

3.1 Introducción

Como sabemos las velocidades de viento son muy variables y por tanto para seleccionar un periodo de simulación para evaluar contra los datos reales se recurrió a graficar mensualmente la velocidad y potencia de los aerogeneradores en el sitio de estudio.

En este trabajo se propone utilizar el software WRF (Weather Research and Forecast), el cual está diseñado para pronóstico e investigación del clima. Al pronosticar las velocidades de viento y otras variables importantes para el cálculo de la energía eólica, se podrán hacer una gran variedad de estudios. El que es de mayor interés para este proyecto es el pronóstico de producción de energía eólica a un plazo medio (hasta 72 horas).

Como se puede observar en la *figura 11* existen discontinuidades en la línea de tiempo, esto se debe a que los datos del parque eólico tienen periodos en los cuales no existen registros en la base de datos que nos facilitaron, por tanto se decidió hacer promedio de los 5 aerogeneradores para disminuir estas ocurrencias, esto se puede justificar dado que el pronóstico de energía se realizara para todo el parque, es decir, se sumara la energía producida por los 5 aerogeneradores.

Para el primer periodo de simulación se seleccionó desde el día 27 al 31 de octubre de 2013, particularmente porque es un periodo donde los datos de los aerogeneradores son continuos, (no tienen huecos de información), además se proba si es el modelo WRF es capaz de representar este tipo de comportamiento del viento en un periodo de pronóstico de viento, cercano al corto plazo (72 horas).

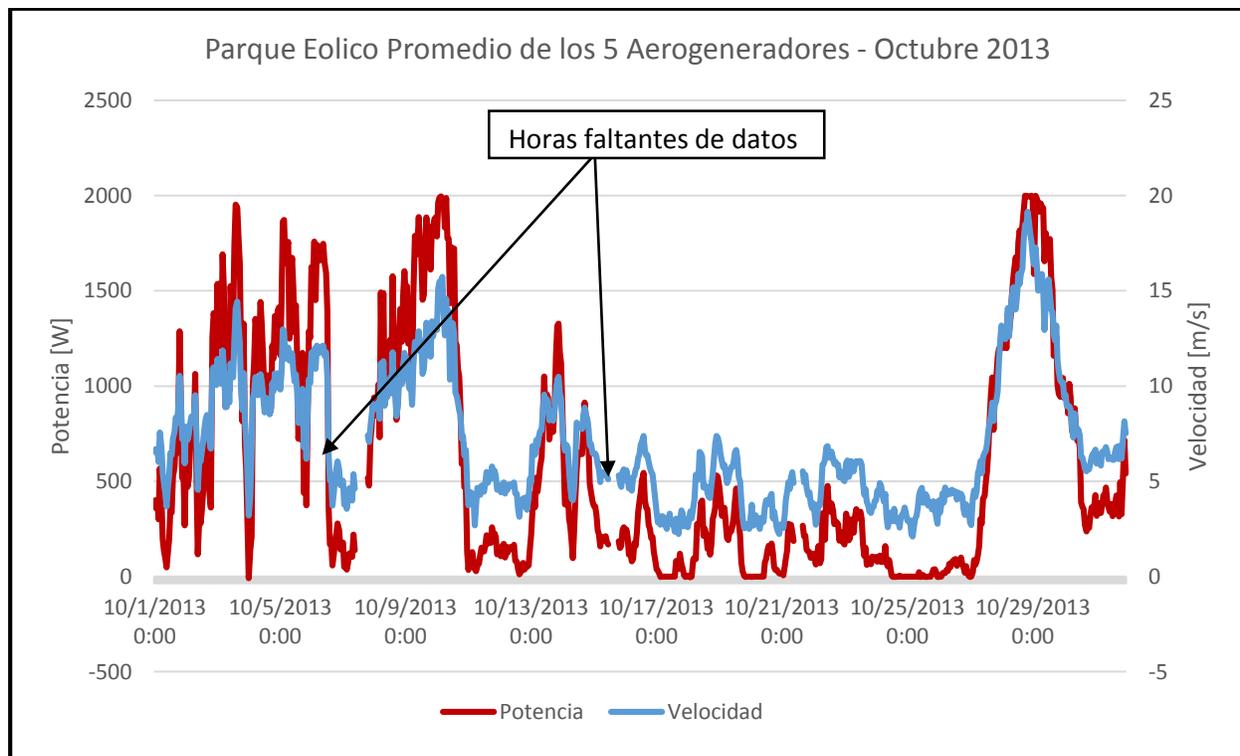


Figura 11: Promedios de Potencia y Velocidad de los 5 aerogeneradores. En el eje de la izquierda Potencia en [Watts] y a la derecha velocidad del viento en [m/s]

El modelo WRF cuenta con muchas opciones de parametrización, para este trabajo utilizamos 2 tipos de representaciones que afectan particularmente el comportamiento de los vientos en superficie, la parametrización capa límite planetario y la de capa superficial. Descartamos algunos esquemas en los cuales su descripción indica que están diseñados para estudiar otras características distintas al modelado de los vientos, como por ejemplo: La parametrización PBL de Bougeault-Lacarrère diseñada para estudiar el comportamiento de la atmosfera en áreas urbanas.

En la tabla 6 se presentan las posibles combinaciones de esquemas de capa limite planetaria con los de la capa superficial, las opciones de capa superficial están sujetas a la correspondiente selección de esquema de capa limite planetaria los cuales se utilizaron en el presente trabajo.

Para inicializar la simulación se requiere suministrar al modelo con condiciones iniciales, estas deben de ser en una malla tridimensional interpolada a los puntos del dominio a realizar la simulación, por tanto deben provenir de otro modelo de escala espacial mayor, ya sea global como el modelo (Global Forecasting System) GFS o regional como sería el modelo (Modelo Mesoescala de Norte América) NAM que abarca estados unidos y gran parte del norte del territorio de México. Como para este trabajo se requiere analizar periodos pasados para poder ajustar el modelo y mejorar su predicción, se utilizó como base de datos para las condiciones iniciales el modelo NARR (Reanalysis Regional de Norte América) el cual es un modelo numérico de adquisición de datos de cuantiosas fuentes de observaciones en mar, tierra y aire y con todos estos datos genera una malla tridimensional de datos uniforme en tiempo y espacio.

Los datos iniciales del modelo Reanalysis Regional de Norte América (NARR por sus siglas en inglés) con resolución espacial Latitud-Longitud de 32 Km, una de las mejores resoluciones en modelos de pronostico actualmente y resolución temporal de 3 horas. Los datos binarios se obtuvieron en la web en <http://nomads.ncdc.noaa.gov/>; los resultados se tomaron sobre el dominio de la Rumorosa.

Tabla 6: Condensado de posibilidades de combinación de las parametrizaciones de PBL y superficie

OPCION PBL	NOMBRE PBL	SE PUEDE USAR CON PARAM. DE SUPERFICIE
1	YSU	1
2	MYJ	2
4	QNSE-EDMF	4
6	MYNN3	1,2,5,
9	UW	1,2,

3.2 Equipo de Computo

Las simulaciones correspondientes a esta investigación se realizaron haciendo uso del modelo WRF versión 3.6 en un equipo de cómputo perteneciente al laboratorio de Energías Renovables de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California. El equipo es marca SuperMicro con 2 procesadores Intel Xeon de seis núcleos a de 2.6 Ghz de velocidad cada uno, 16GB de memoria RAM y un disco duro de 1TB, el equipo opera bajo un sistema operativo Linux Ubuntu 14, compilador gfortran y gcc.

Para la visualización de los datos del modelo y la extracción y manipulación de los mismos se usaron los programas IDV de UNIDATA (<http://www.unidata.ucar.edu/software/idv/>) y NCL de NCAR (Centro Nacional de Investigación Atmosférica) (<http://www.ncl.ucar.edu/>) de libre acceso y para el análisis estadístico se realizó en hojas de cálculo de Microsoft Excel.

3.3 Configuración de la simulación

En la simulación de WRF se probaron además de las distintas parametrizaciones, distintas configuraciones de resolución espacial y de paso de tiempo entre cada iteración, con la restricción de que cada vez que cada vez que se aumenta la resolución espacial, el paso de tiempo (dt) se reduce, tomando más tiempo para concluir la simulación. La configuración con la que se trabajó para los resultados de este trabajo fue la que se presenta en la tabla 6.

Tabla 7: Campos básicos para la configuración de una simulación en WRF

Paso de tiempo para condiciones iniciales	10800 segundos
Puntos en dirección Oeste-Este	24, dy=2000m
Puntos en dirección Norte-Sur	18, dx=2000m
Resolución de datos de superficie	30 segundos
Proyección de mapa	Lambert
Latitud (grados)	32.5
Longitud (grados)	-116
Interpolación de niveles verticales de datos de entrada (Pa)	101300 , 100100, 100000, 99000, 98000, 95000, 85000, 80000, 75000, 70000, 65000, 60000, 55000, 50000, 45000, 40000, 35000, 30000, 25000, 20000, 15000, 10000, 5000
Paso de tiempo (dt)	12 segundos

3.4 Ubicación y descripción general de la zona de estudio

El Parque Eólico la rumorosa Consiste en 5 Aerogeneradores de 2000 kW de potencia localizados en la Rumorosa, municipio de Tecate, Baja California, a una distancia de 14 km aproximadamente de la Frontera al norte con estados unidos. Sus coordenadas geográficas son 32.49"N 116.09"W con una altitud media de 1300 msnm. En la figura 12 se observa el dominio de simulación superpuesto a una imagen de satélite obtenida de google earth.

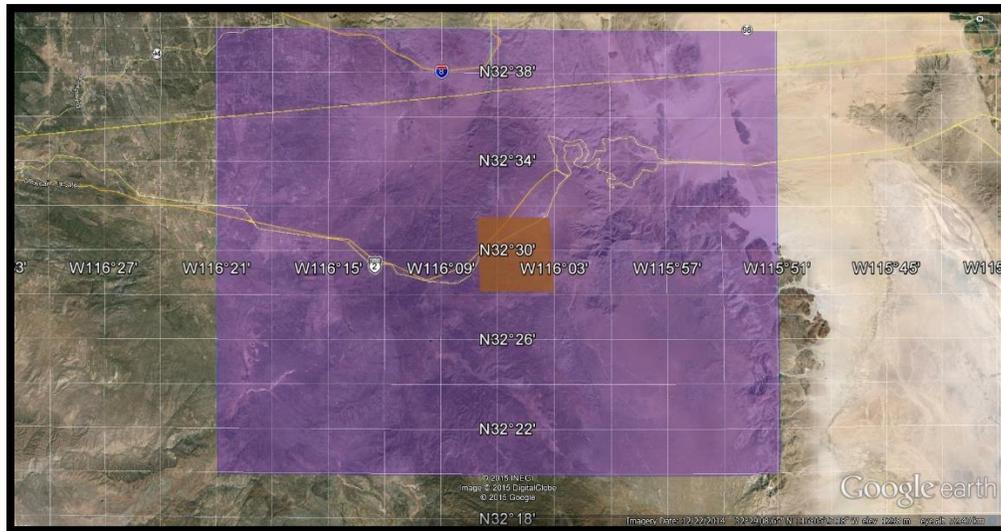


Figura 12: Imagen obtenida del dominio para simulación de los vientos en La Rumorosa BC

3.5 Análisis de las observaciones del parque eólico

A continuación se presentan las gráficas de velocidad y dirección para el periodo que comprende los meses de octubre 2013 hasta septiembre 2014, se seleccionó este periodo por 2 razones, la primera es que son las fechas entre las cuales contamos con los datos de los aerogeneradores para poder hacer el análisis del pronóstico de energía eólica y segundo, se trató de agrupar los meses de comportamiento similar.

Los datos diez-minútales que nos facilitó la Comisión Estatal de Energía de Baja California a los cuales se extrajo el dato medido al minuto cero, con el objetivo de identificar el comportamiento estadístico mensual horario de los vientos en el parque eólico. La siguiente (tabla 6) resume el análisis estadístico de las observaciones del parque eólico.

Tabla 8: Resumen de análisis estadístico de las observaciones del parque eólico La Rumorosa

	OCTUBRE 2013	DICIEMBRE 2013	FEBRERO 2014	MAYO 2015
Media (m/s)	7.08	8.09	7.27	9.20
Error Estándar	0.15	0.14	0.13	0.13
Mediana	6.15	7.63	7.14	8.83
Moda	6.71	4.51	8.23	6.24
Desviación Estándar	3.95	3.75	3.30	3.65
Varianza Muestra	15.56	14.04	10.91	13.35
Mínimo (m/s)	0.20	0.30	0.35	0.87
Máximo (m/s)	20.99	20.90	17.30	20.30
Observaciones	736	752	680	742

Otro parámetro muy importante en el viento es la dirección, a continuación se presentan las gráficas de los meses en los cuales se realizó el pronóstico para este trabajo. Se analizaron periodos dentro de los meses de octubre y diciembre del año 2013 y de febrero, mayo y agosto de 2014. En las gráficas se puede apreciar que en algunos casos los vientos más fuertes vienen de direcciones cercanas a los 250 grados (Oeste-Suroeste).

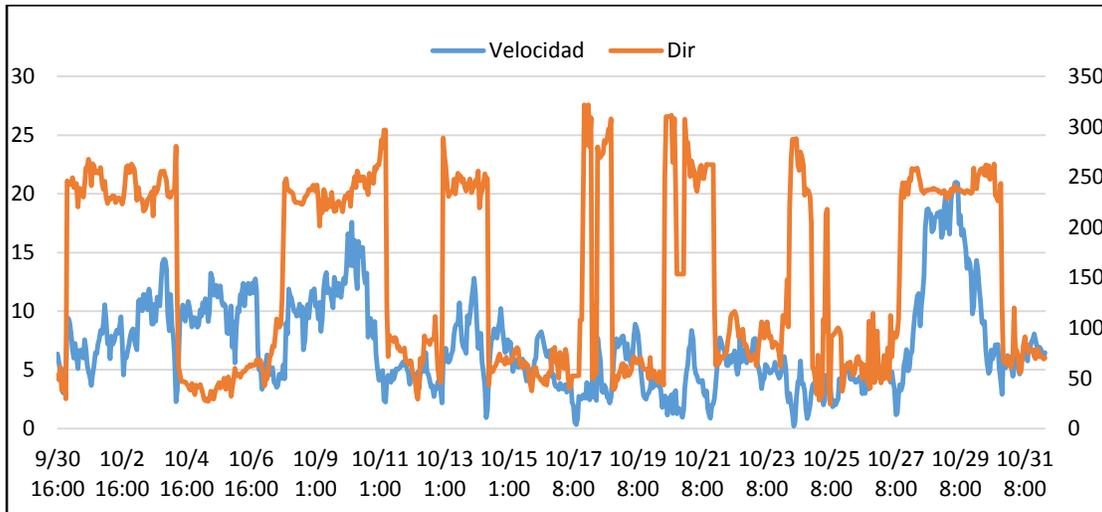


Figura 13: Observaciones de velocidad y dirección del parque eólico para el mes de octubre 2013

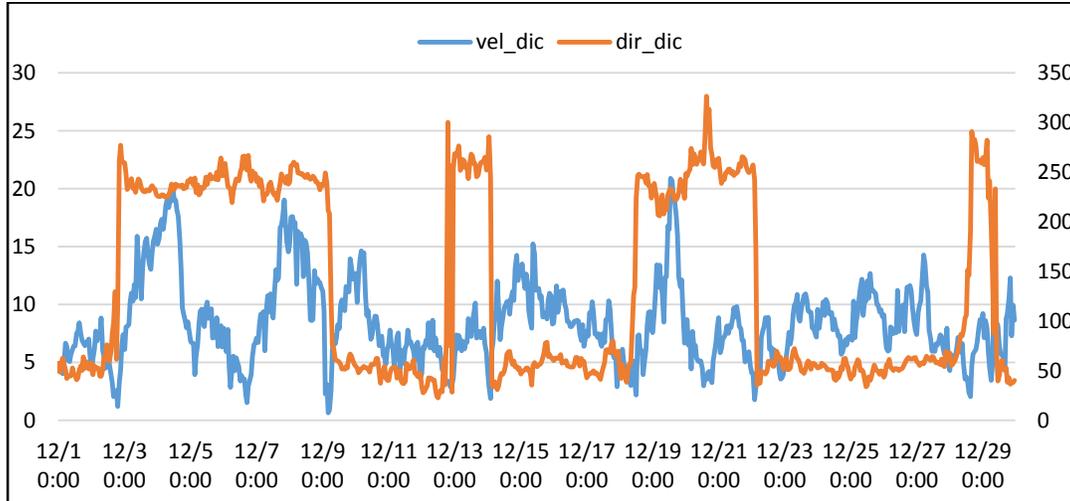


Figura 14: Observaciones de velocidad y dirección del parque eólico para el mes de diciembre 2013

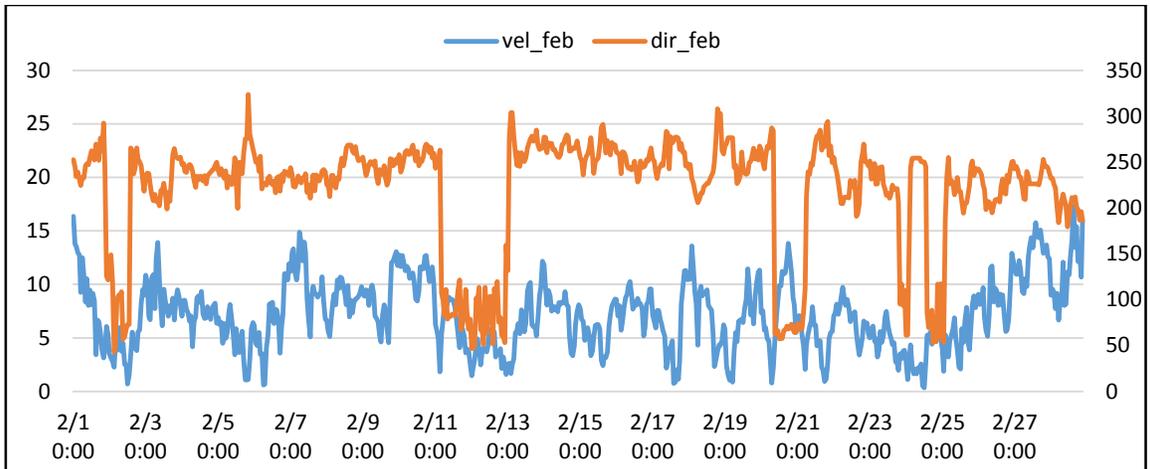


Figura 15: Observaciones de velocidad y dirección del parque eólico para el mes de febrero 2014

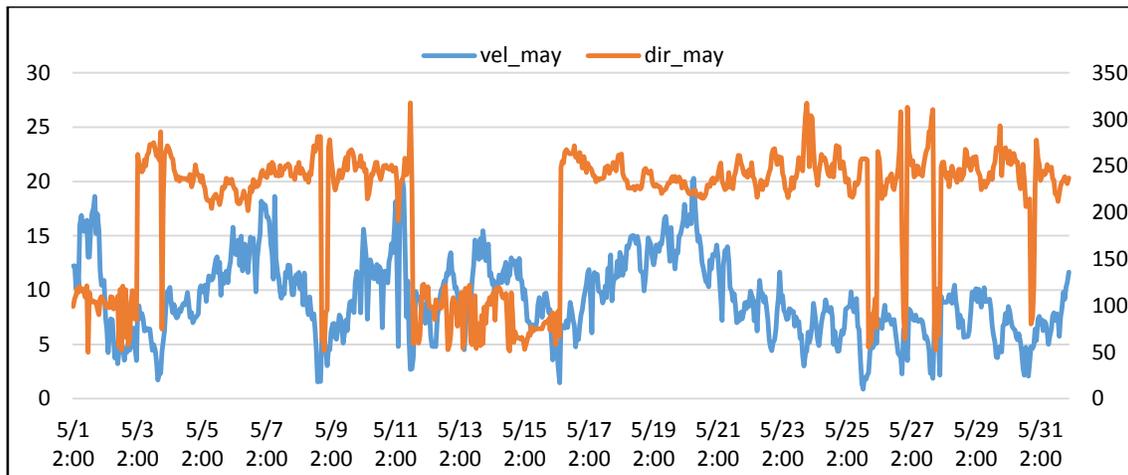


Figura 16: Observaciones de velocidad y dirección del parque eólico para el mes de mayo 2014

3.6 Estadística de los resultados de la simulación

Se calcularon las siguientes medidas cuantitativas del error:

Media del Error (ME): La media del error es simplemente la diferencia entre el promedio pronosticado y el promedio observado, y por lo tanto expresa el Sesgo o BIAS del pronóstico. Pronósticos en promedio muy altos exhiben $ME > 0$ y pronósticos en promedio muy bajos muestran $ME < 0$. Es importante notar que BIAS no provee información acerca de la magnitud típica de los errores individuales, y no es una medida de precisión. ME tiene gran ventaja respecto a otras medidas ya que tiene en cuenta si el error expresa subestimación o sobrestimación y se representa por la ecuación:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (Pronostico_k - Observacion_k) = \overline{Pronostico} - \overline{Observacion}$$

Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE por sus siglas en inglés): Una medida de precisión del error es la media del error cuadrático $MSE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (Pronostico_k - Observacion_k)^2$. MSE es el promedio de la diferencia cuadrada entre el pronóstico y la observación. Ya que MSE calcula el error cuadrático de los pronósticos este es más sensible a los errores extremos. En ocasiones MSE se representa mejor a través de su raíz, la cual tiene las mismas dimensiones físicas a los pronósticos y observaciones y de esta manera se puede concebir como una magnitud típica del error del pronóstico.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (Pronostico_k - Observacion_k)^2}$$

Media del Error Absoluto (MAE por sus siglas en inglés): La Media del Error Absoluto es el promedio aritmético de los valores absolutos de las diferencias entre el valor pronosticado y el observado, es una magnitud típica para los errores del pronóstico en un conjunto de pronósticos y observaciones y es frecuentemente usado como una medida de verificación. Un MAE es igual a cero si el pronóstico es perfecto y aumenta positivamente a medida que el pronóstico se aleja de la observación.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |Pronostico_k - Observacion_k|$$

Capítulo 4. RESULTADOS

4.1 Introducción

Los resultados se compararon con los datos promedios horarios registrados en cada uno de los 5 aerogeneradores del parque eólico (Figuras 17, 18, 19 y 20). Las variables que se utilizaron para este estudio son: velocidad del viento, dirección del aerogenerador y potencia eléctrica. Se utilizaron 6 diferentes configuraciones del modelo WRF y sus esquemas de capa límite planetaria (p) y capa superficial (s) que aparece en las gráficas seguido del número de la opción utilizada. Se puede observar que no existe una variación importante entre cada una de las pruebas. También se graficó la dirección del aerogenerador ya que se observó que los cambios en esta influyen en gran medida en la magnitud de la velocidad y también es evidente que la simulación tiene un tiempo de ajuste cuando hay cambios de dirección.

El primer periodo analizado es el mes de octubre desde el día 27 a la hora 00 UTC hasta el día 30 a la hora 12 UTC. Entre la hora 6 y 12 del día 27 se observa un cambio de dirección desde 50° hasta 170° y en la hora 12 el pronóstico comienza a alejarse de las observaciones, esto se puede deber a que desde la hora cero, cada 3 horas se actualizan las condiciones iniciales del modelo y estas probablemente difieren de las condiciones atmosféricas del sitio. El comportamiento descrito es muy similar en los 4 casos analizados y se pueden ver puntos de inflexión cada que se actualizan las condiciones iniciales desde la hora 00 hasta la 21 cada 3 horas (Figuras 17, 18, 19 y 20).

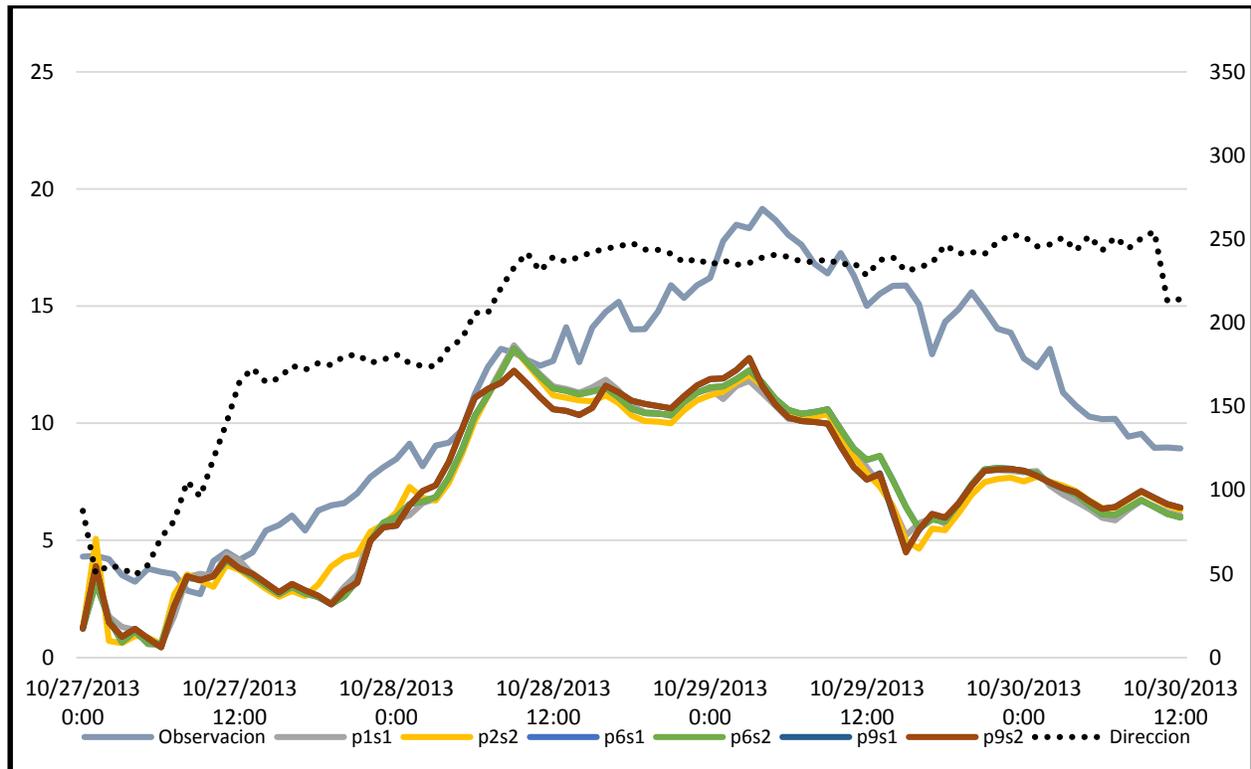


Figura 17: Observaciones y pronósticos de velocidad 27 al 31 de octubre 2013

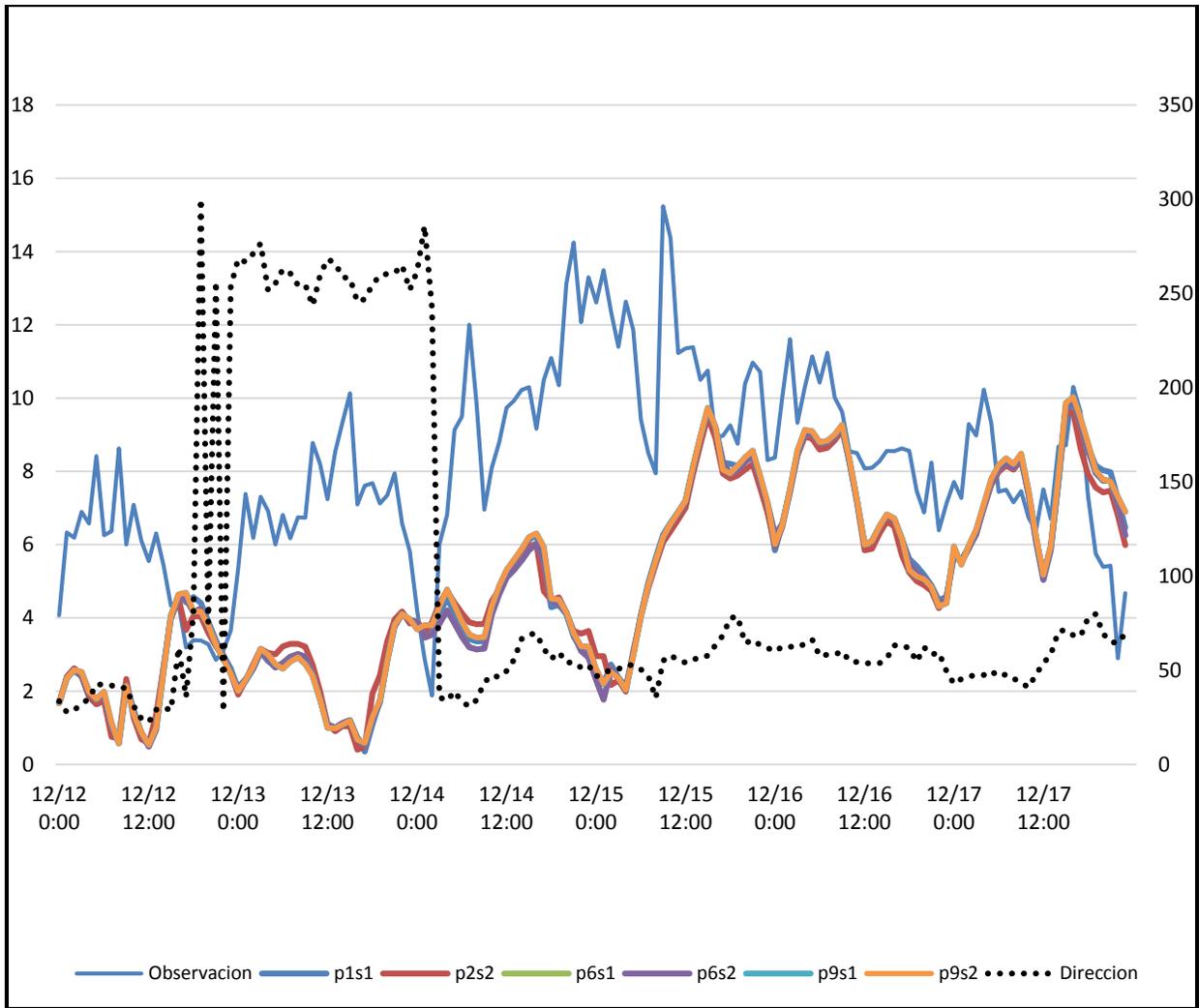


Figura 18: Observaciones y pronósticos de velocidad 11 al 17 de Diciembre 2013

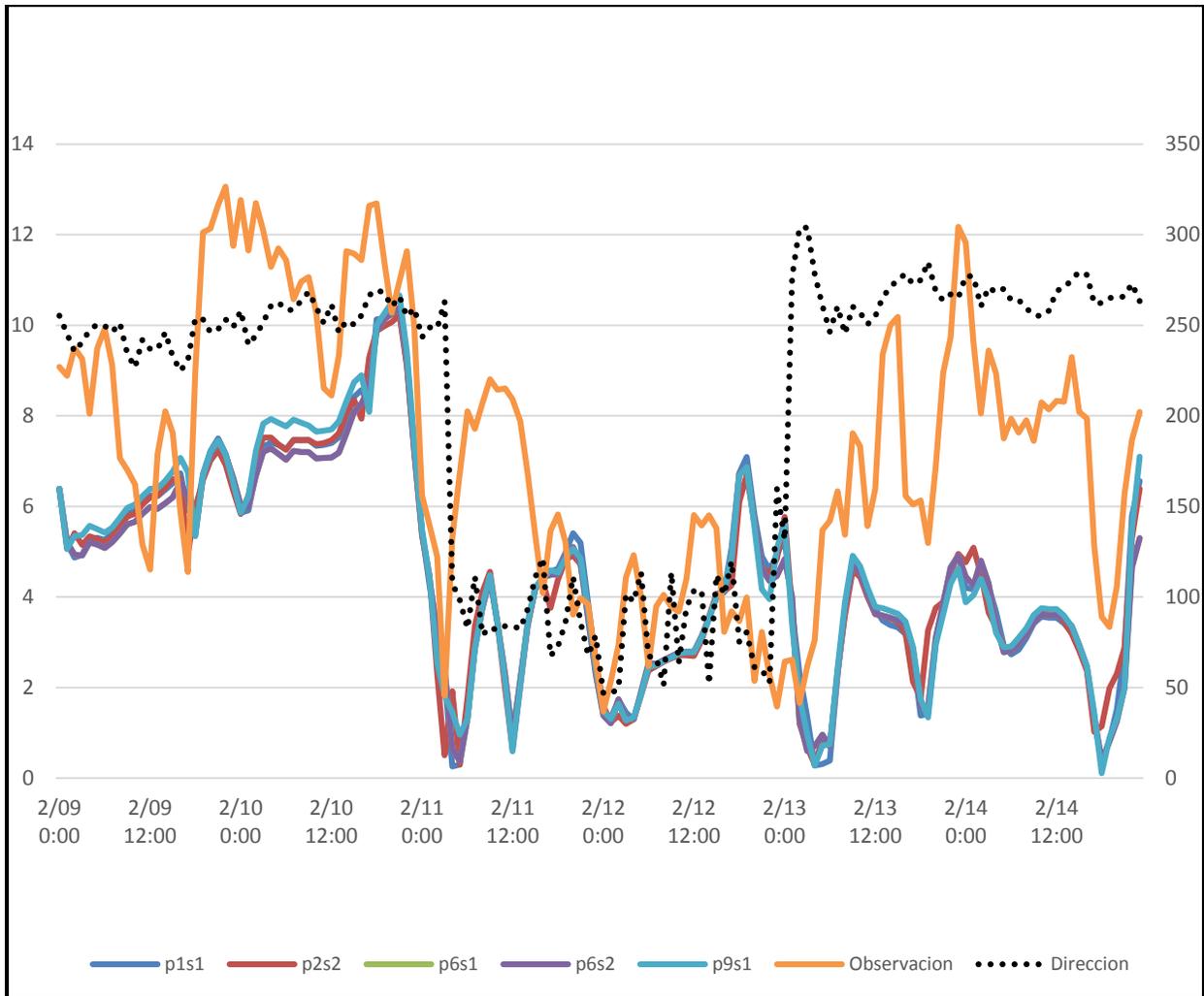


Figura 19: Observaciones y pronósticos de velocidad - 9 al 14 de Febrero 2014

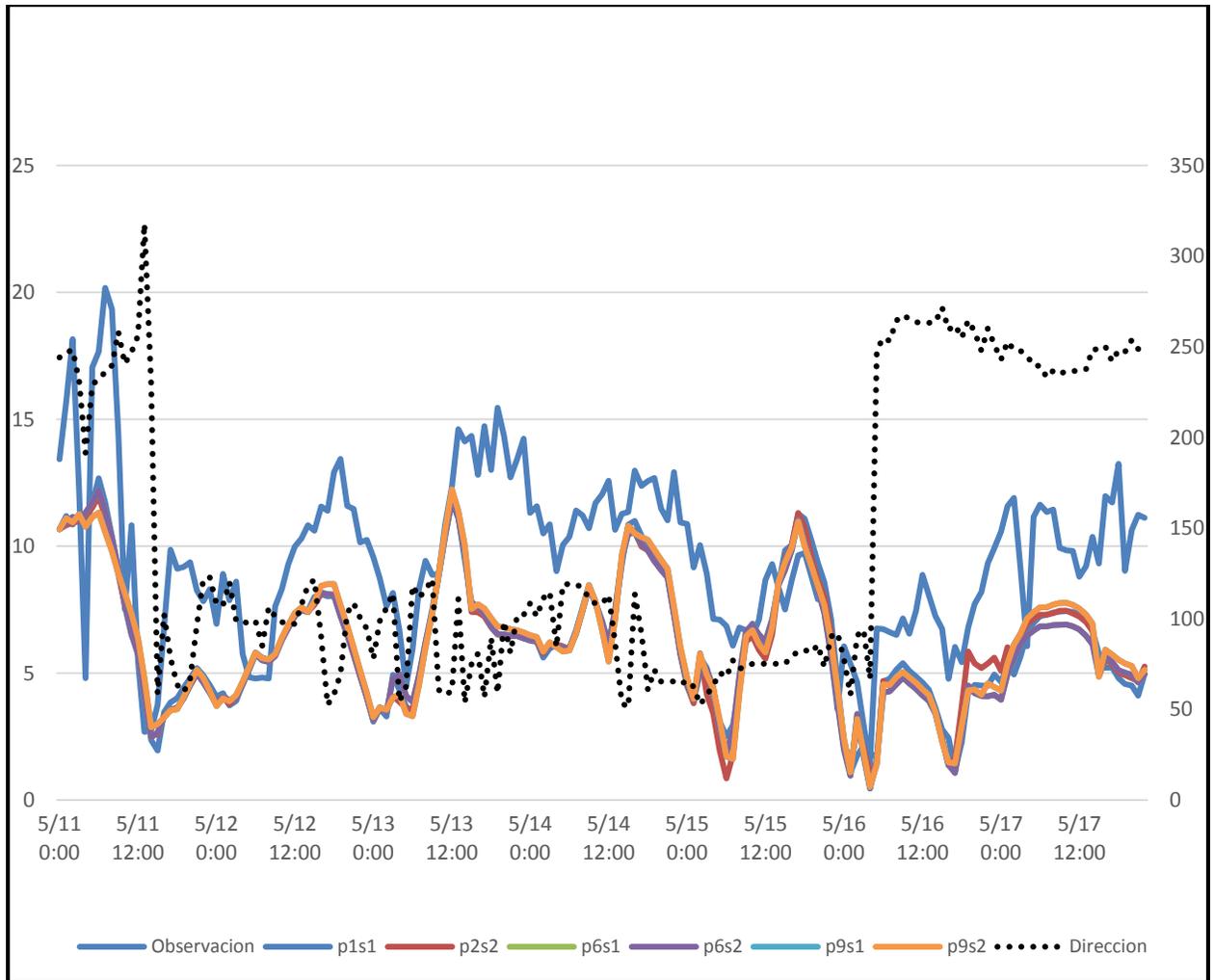


Figura 20: Observaciones y pronósticos de velocidad - 11 al 17 de Mayo 2014

En las gráficas de error (Figuras 21, 22, 23, 24) de los pronósticos se ve claramente que cuando hay cambios importantes de dirección media en el viento comienza a tener problemas para representar las velocidades observadas. El primer cambio de dirección media entre las 4 y 12 horas del día 27 de octubre y el segundo entre las 3 y 9 horas del día 28 de octubre, a partir de las 12 horas del día 28 la dirección media se mantuvo alrededor de los 230 grados y se observa que hay una tendencia a presentar más errores en el pronóstico de la velocidad en los vientos de esta dirección y el modelo requiere mucho tiempo para estabilizarse y mejorar su estimación. De nuevo se observa que las condiciones iniciales (cada 3 horas) influyen de manera significativa en el error del pronóstico.

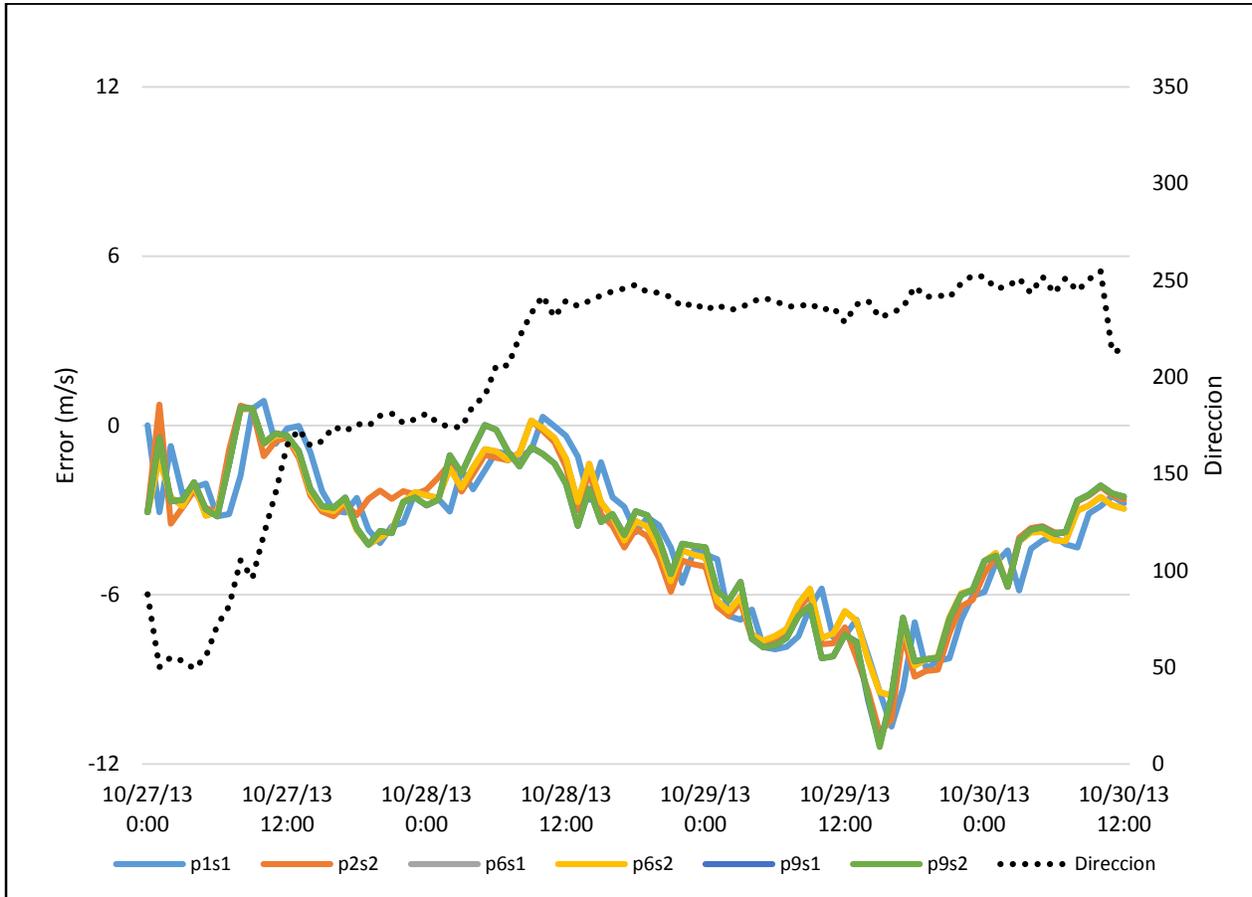


Figura 21: Error de pronostico y Dirección - 27 al 31 de octubre 2013

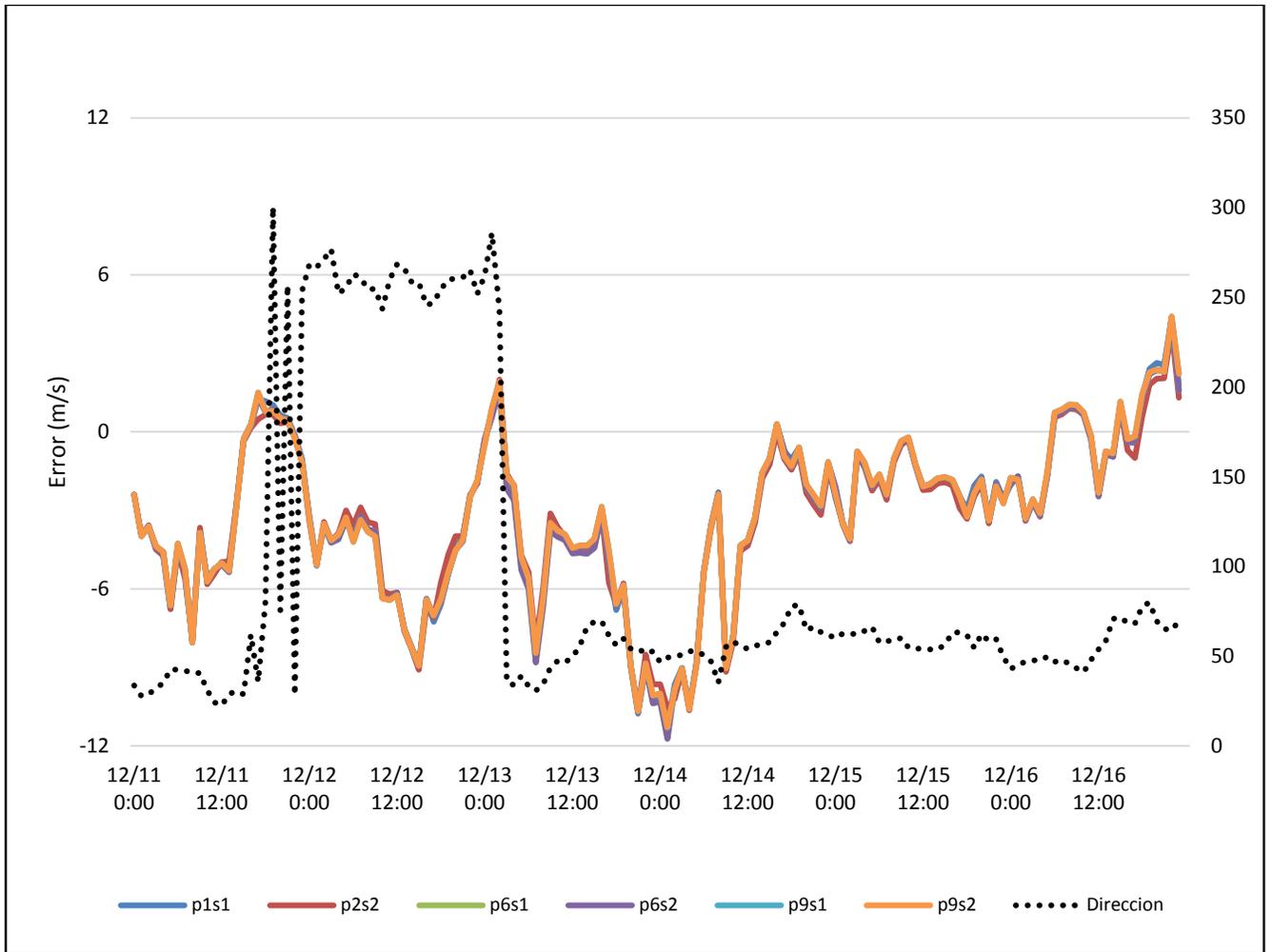


Figura 22: Error de pronostico y Dirección - 11 al 17 de Diciembre 2013

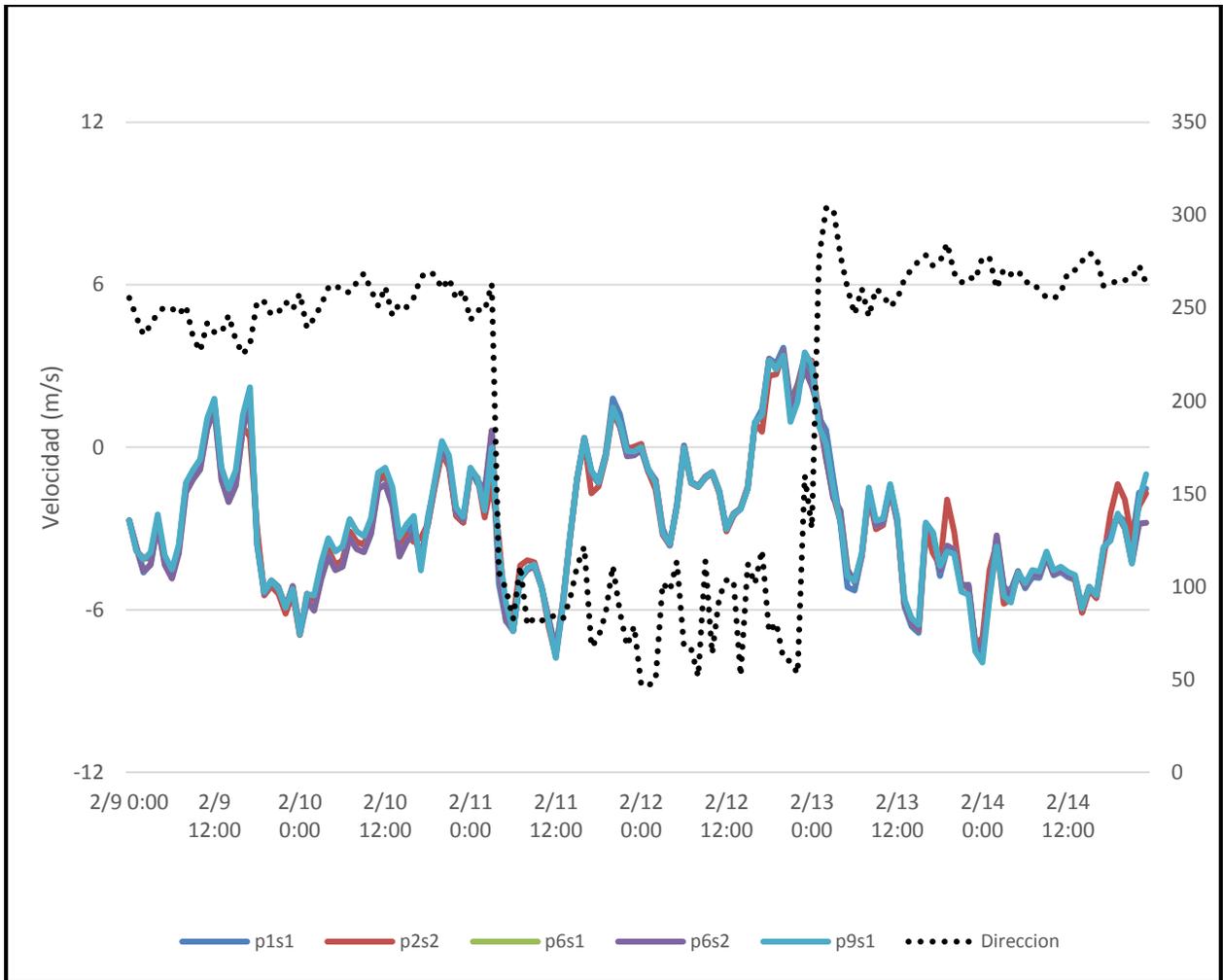


Figura 23: Error de pronostico y Dirección - 9 al 14 de Febrero 2014

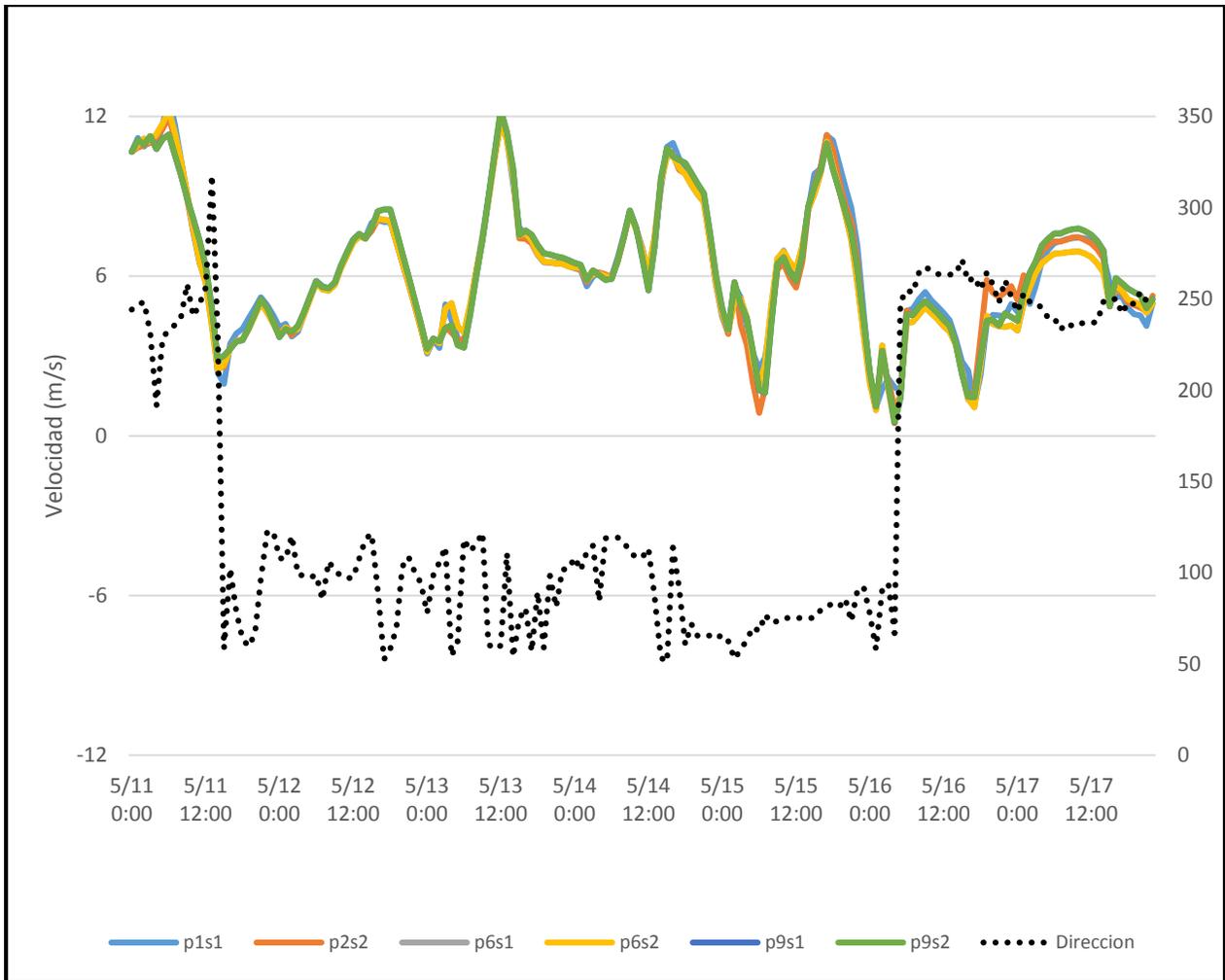


Figura 24: Error de pronostico y Dirección - 11 al 17 de Mayo 2014

Para poder diferenciar entre las diferentes pruebas con las combinaciones de parametrización antes mencionadas de pronóstico en la siguiente (tabla 9), se presenta el error medio, error media cuadrada (MSE) y raíz del error medio cuadrado (RMSE). Se puede observar que entre las diferentes pruebas no existe diferencia significativa.

Tabla 9: Variables estadísticas de los pronósticos de velocidad

Parametrización p=PBL s=Superficie OCTUBRE 2013	ERROR MEDIO (m/s)	MSE	RMSE
p1s1	-3.93	22.46	4.74
p2s2	-3.95	23.09	4.81
p6s1	-3.87	21.21	4.61
p6s2	-3.87	21.21	4.61
p9s1	-3.91	22.33	4.73
p9s2	-3.91	22.31	4.72

Parametrización p=PBL s=Superficie DICIEMBRE 2013	ERROR MEDIO (m/s)	MSE	RMSE
p1s1	-3.23	20.33	4.51
p2s2	-3.28	19.89	4.46
p6s1	-3.28	20.58	4.54
p6s2	-3.28	20.58	4.54
p9s1	-3.21	20.15	4.49
p9s2	-3.21	20.14	4.49

Parametrización p=PBL s=Superficie FEBRERO 2014	ERROR MEDIO (m/s)	MSE	RMSE
p1s1	-2.75	13.88	3.73
p2s2	-2.76	13.38	3.66
p6s1	-2.82	13.89	3.73
p6s2	-2.82	13.89	3.73
p9s1	-2.69	13.35	3.65
p9s2	NA	NA	NA

Parametrización p=PBL s=Superficie MAYO 2014	ERROR MEDIO (m/s)	MSE	RMSE
p1s1	6.27	45.56	6.75
p2s2	6.20	44.71	6.69
p6s1	6.13	43.83	6.62
p6s2	6.13	43.83	6.62
p9s1	6.26	45.47	6.74
p9s2	6.26	45.47	6.74

Pronostico de energía eólica

Para calcular la potencia eólica se promediaron los pronósticos de velocidad y utilizando la curva de potencia del aerogenerador Gamesa modelo G87 (figura 14) que se obtuvo de la página del fabricante. [17]. Para obtener una función de la curva de potencia se utilizó la herramienta de Matlab “curve fitting tool” (figura 15) obteniendo una función de Gauss para así poder evaluar las velocidades del pronóstico. Es de esperarse que el pronóstico de potencia presente fallos, puesto que el pronóstico de velocidad tiene errores importantes.

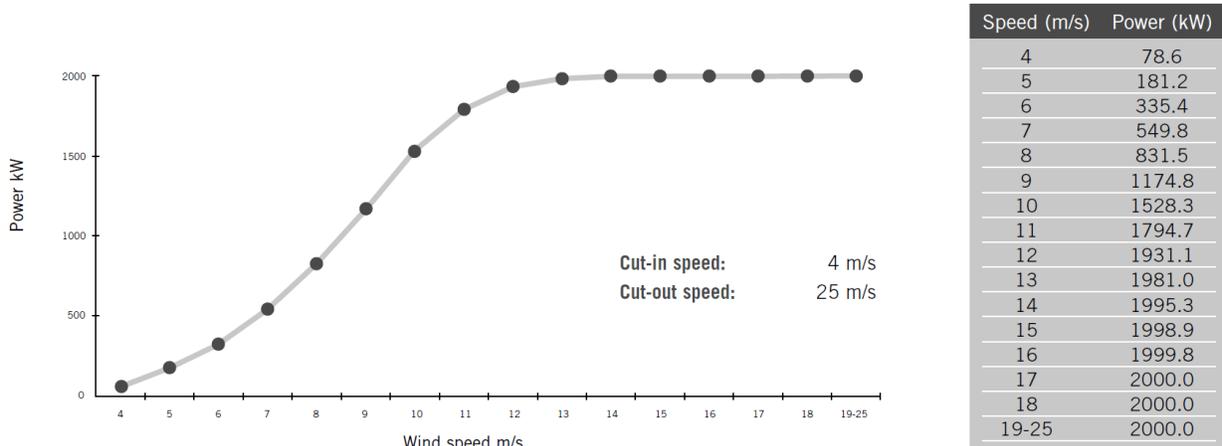


Figura 25: (Curva de potencia basada en los siguientes parámetros: Frecuencia de red 50Hz; Angulo pitch regulado; Velocidad de rotor variable entre 9.0-19.0 rpm)

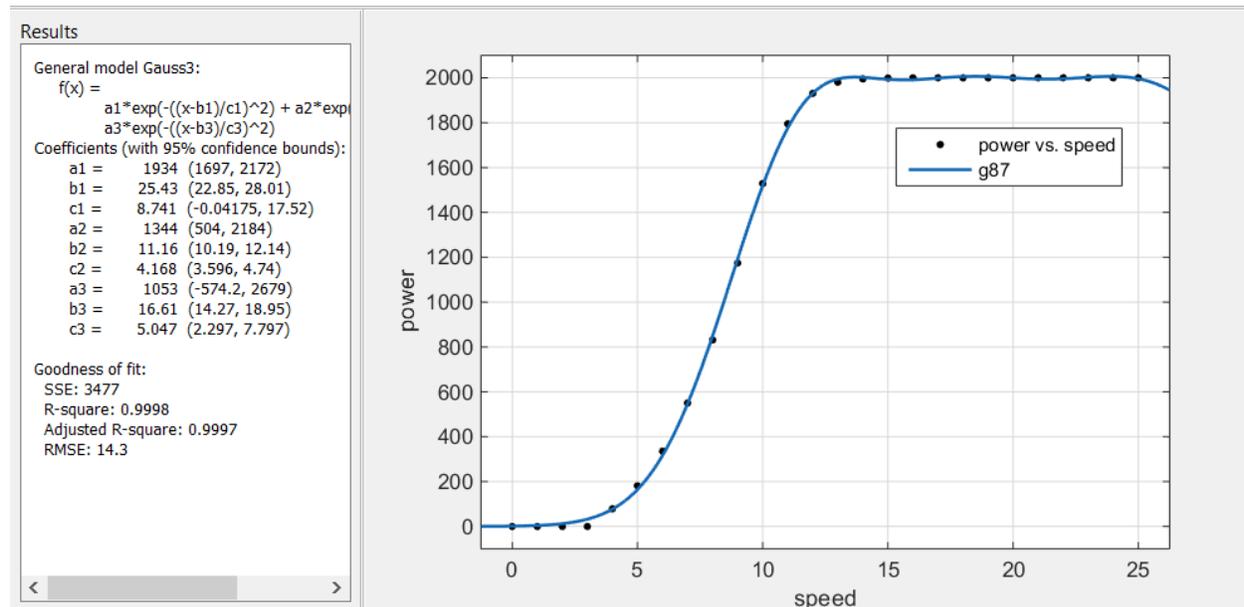


Figura 26: Herramienta curve fitting tool de Matlab, En el panel de la izquierda la función de gauss y sus parámetros, a la izquierda la gráfica de la función de gauss.

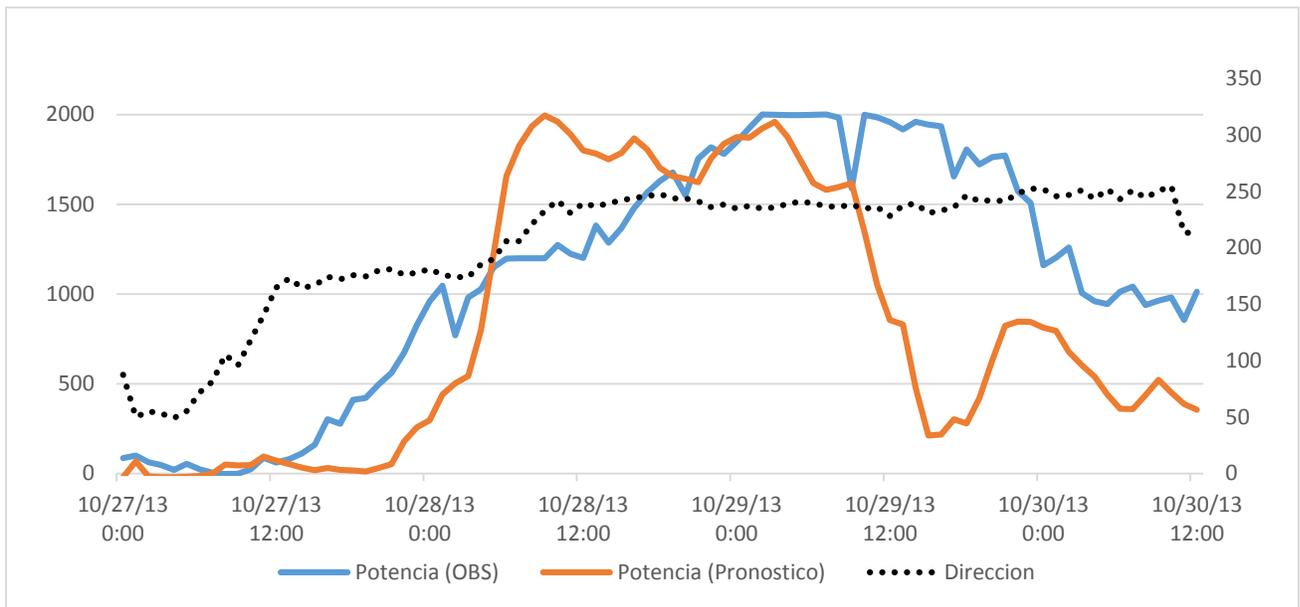


Figura 27: Pronostico de Potencia Eólica 27 al 30 de Octubre

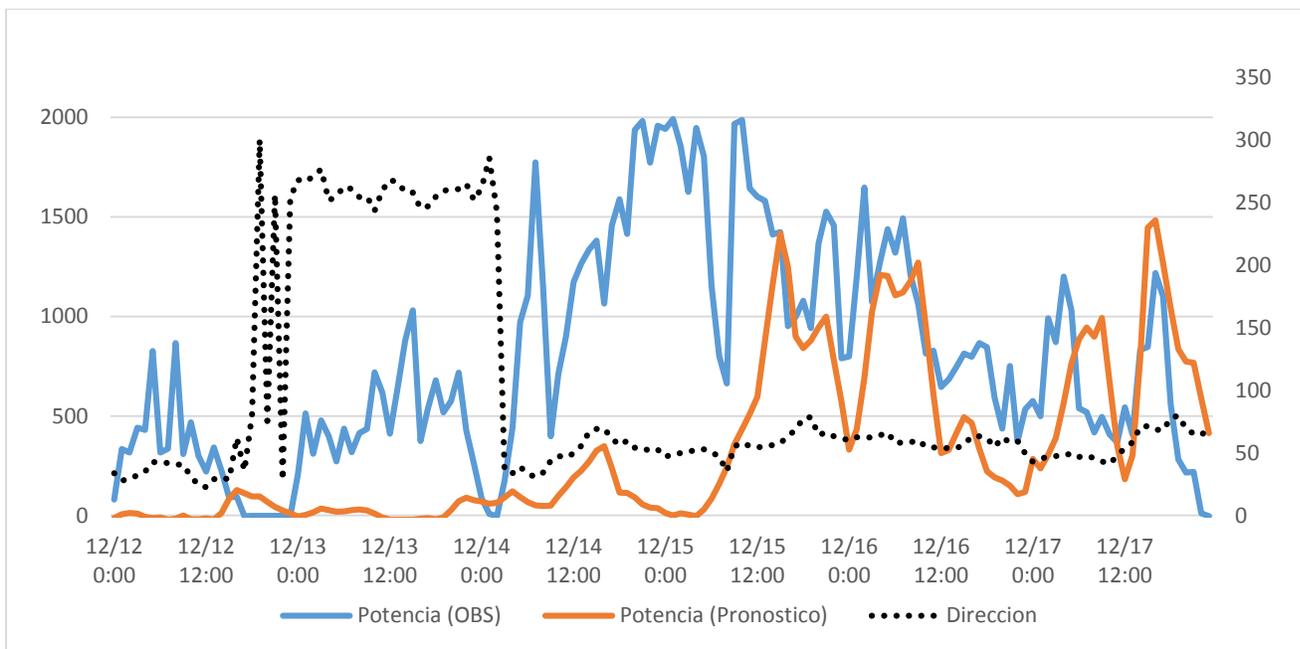


Figura 28: Pronostico de Potencia Eólica 12 al 17 de Diciembre 2013

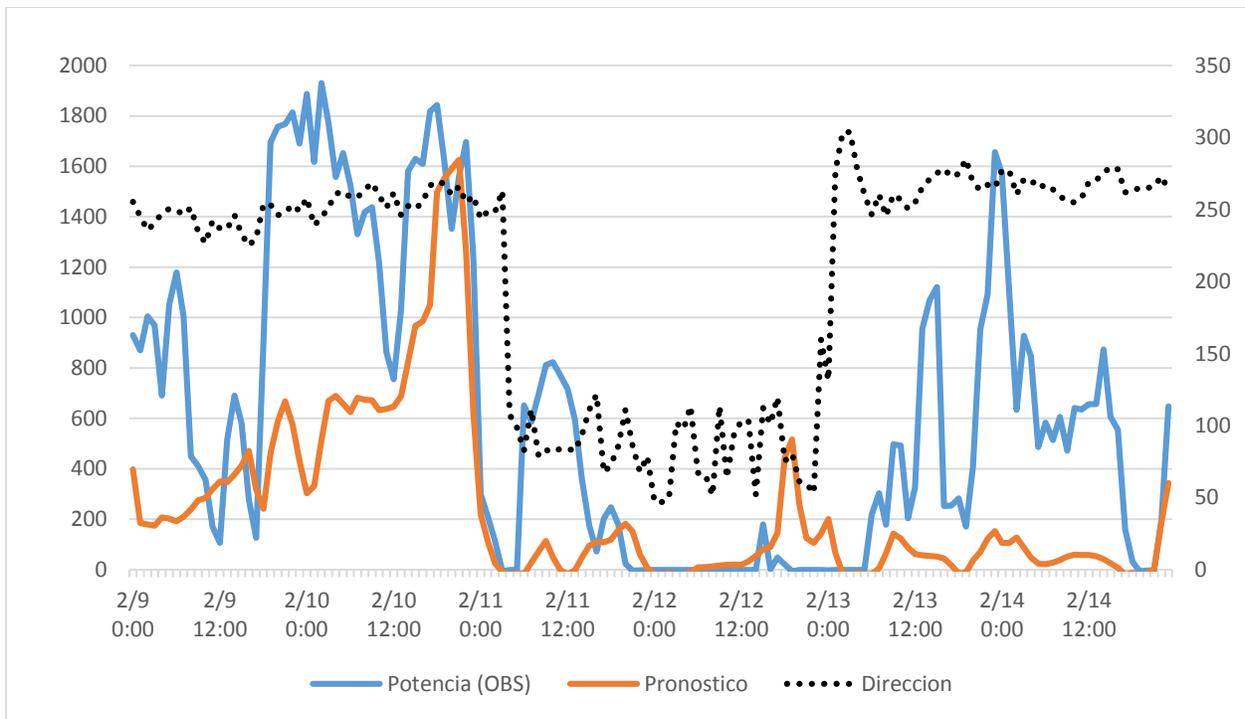


Figura 29: Pronostico de Potencia Eólica 9-14 de Febrero 2014

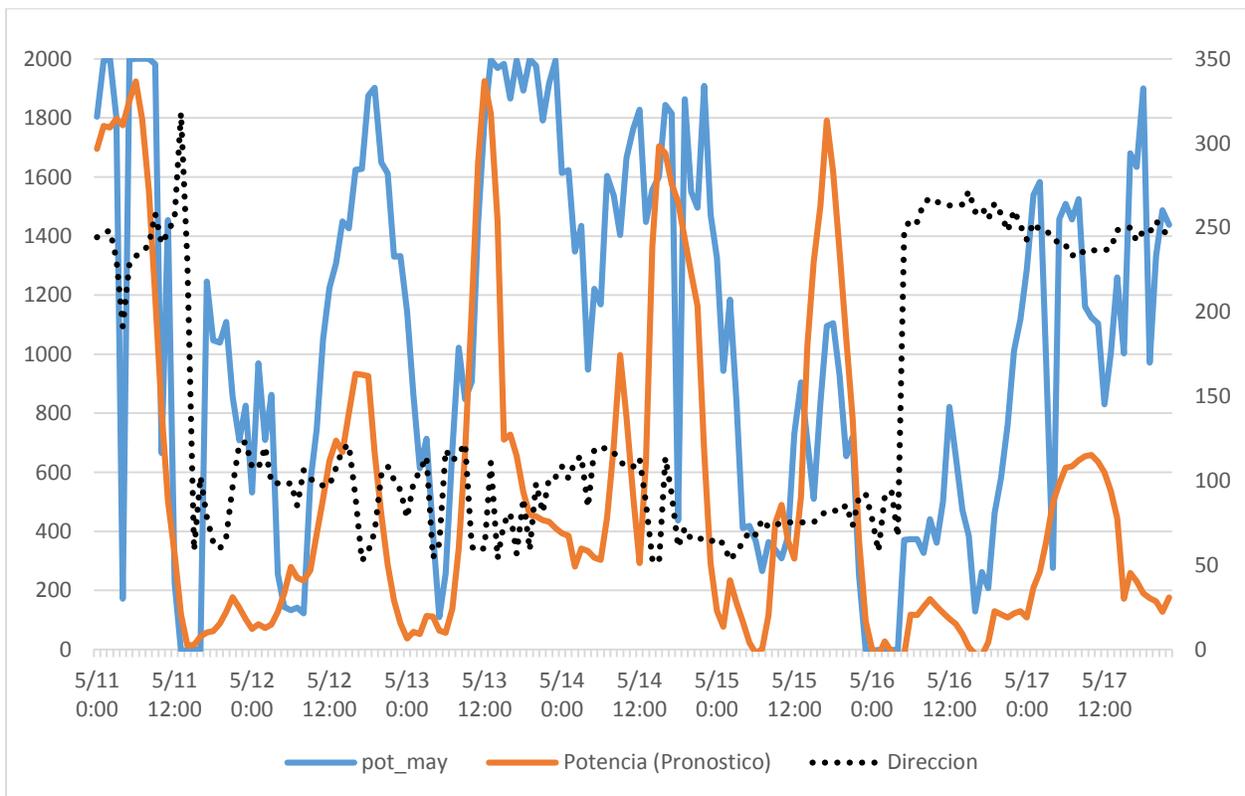


Figura 30: Pronostico de Potencia Eólica 11-17 Mayo 2014

Capítulo 5. CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones

Aunque en algunos casos los resultados fueron prometedores para una herramienta de predicción, no se logró la suficiente precisión o reducir el error para poder utilizar este modelo en el área de La Rumorosa B.C., los resultados mostraron que el modelo no responde lo suficientemente rápido a los cambios de dirección del viento y falla demasiado cuando la dirección del viento se acerca a los 250 grados (Cuando los vientos vienen del Este-Suroeste) que coinciden con los vientos más fuertes de la región y la mayor producción de energía eólica. El autor cree que se pueden mejorar los pronósticos con este modelo en la medida en que se puedan representar mejor las características físicas del terreno como rugosidad, uso de suelo, vegetación y fenómenos atmosféricos locales) que tal vez el modelo no logra capturar.

Cabe mencionar que en la medida que se puedan mejorar las condiciones iniciales para correr el pronóstico, mejorara la predicción del viento y eso es lo que puede hacer muy valiosa esta herramienta.

Capítulo 6. TRABAJO FUTURO

6.1 Trabajo futuro

Es evidente que para realizar una mejor representación de la atmósfera y así poder hacer mejores pronósticos, es necesario comprender los procesos dinámicos que ocurren en la capa límite de la atmósfera a micro escala de tal manera que se pueda manejar mejor el modelo WRF y entender cuáles serían los efectos de probar otras parametrizaciones y otras opciones que influyen en el comportamiento del modelo. Sería ideal lograr un pronóstico de energía eólica que sirva para las necesidades de operación y de producción eléctrica y a las condiciones de los parques eólicos.

Como se comentó en los resultados, las condiciones iniciales influyen de manera muy importante en los resultados del modelo. Sería interesante implementar mediciones de perfil vertical del viento e incluirlas en las condiciones iniciales para probar si esto puede mejorar el modelo.

Bibliografía

- [1] R. Wiser y M. Bolinger, «2013 Wind Technologies Market Report,» 2013. [En línea]. Available: http://emp.lbl.gov/sites/all/files/2013_Wind_Technologies_Market_Report_Final3.pdf. [Último acceso: 05 02 2015].
- [2] P. Guo, W. Xiaochen y X. Huang, «A Review of Wind Power Forecasting Models,» September 2011.
- [3] C. Monteiro, R. Bessa, V. Miranda, A. Botterud, J. Wang y a. G. Conzelmann, «Wind Power Forecasting: State-of-the-Art 2009,» Decision and Information Sciences Division, Argonne National Laboratory, UChicago Argonne, 2009.
- [4] P. C. Fowler, «Tesis: Understanding the Strengths and Weaknesses of a New-generation Numerical Weather Prediction Model for Application to Short-term Wind Energy Prediction,» 2012.
- [5] eWind, «www.ewindsolutions.com,» [En línea]. Available: <http://www.ewindsolutions.com/technology/>. [Último acceso: 22 01 2015].
- [6] «enfor,» [En línea]. Available: <http://www.enfor.dk/products/wppt.html>. [Último acceso: 22 01 2015].
- [7] M. Marquis, J. Wilczak, M. Ahlstrom, J. Sharp, A. Stern, J. C. Smith y S. Calvert, «FORECASTING THE WIND TO REACH SIGNIFICANT PENETRATION LEVELS OF WIND ENERGY,» *BAMS, American Meteorological Society*, Septiembre 2011.
- [8] USAID, «Estudio del Potencial de Exportacion de Energia Eolica de Mexico a EU,» 2009.
- [9] L. Bianco, «Surface layer parameterization in WRF, ATOC 7500: Mesoscale Meteorological Modeling,» 2008.
- [10] W. C. Skamarock, J. Klemp, J. Duhia y e. al, A Description of the Advanced Research Weather Forecast Version 3, 2008.
- [11] R. B. Stull, An Introduction to Boundary Layer Meteorology, Kuwer Academic, 1988.
- [12] G L Geernaert, Surface Layer, Los Alamos, NM, USA: Los Alamos National Laboratory, 2003.
- [13] WRF Users page, «<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>,» [En línea]. Available: http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/users_guide_chap5.htm#Phys. [Último acceso: 27 01 2015].
- [14] Unidata, «Unidata,» [En línea]. Available: <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/docs/faq.html#whatisit>. [Último acceso: 22 01 2015].

- [15] World Meteorological Organisation, «<http://www.wmo.int>,» [En línea]. Available: <http://www.wmo.int/pages/prog/www/WDM/Guides/Guide-binary-2.html>. [Último acceso: 22 1 2015].
- [16] NARR, «www.emc.ncep.noaa.gov,» [En línea]. Available: http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/rreanl/narr_bams.pdf. [Último acceso: 1 2 2014].
- [17] Gamesa, «<http://www.gamesacorp.com>,» [En línea]. Available: <http://www.gamesacorp.com/en/products-and-services/wind-turbines/gamesa-g87-20-mw-en.html>. [Último acceso: 25 02 2015].
- [18] CRE, «TABLA DE PERMISOS DE GENERACIÓN E IMPORTACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA ADMINISTRADOS AL 31 DE MARZO DE 2013,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.cre.gob.mx/articulo.aspx?id=171>. [Último acceso: 7 MAYO 2013].
- [19] AMDEE, «www.amdee.org/,» [En línea]. Available: <http://www.amdee.org/preguntas-frecuentes>. [Último acceso: 22 1 2015].
- [20] P. G. X. H. Xiaochen Wang, «A Review of Wind Power Forecasting Models,» *Energy procedia*, 2011.
- [21] National Center for Atmospheric Research, «A Description of the Advanced Research WRF Version 3,» Boulder, 2008.