



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELÉCTRICA**

**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E
INVESTIGACIÓN**

**MODELOS DE VELOCIDADES DE VIENTO
BASADOS EN ECUACIONES DIFERENCIALES
ESTOCÁSTICAS**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
ELÉCTRICA**

**PRESENTA:
JONATAN PABLO ARENAS LÓPEZ**

**DIRECTOR:
DR. MOHAMED BADAoui**



CIUDAD DE MÉXICO

DICIEMBRE, 2018

Resumen

En los últimos años, la energía eólica se ha integrado cada vez más en los sistemas de energía eléctrica en todo el mundo debido a las preocupaciones sobre el calentamiento global, el avance de la tecnología y la reducción de costos. Sin embargo, la naturaleza estocástica del viento impone nuevos desafíos en la investigación de diferentes enfoques relacionados con los sistemas eólicos. Esto conduce a la necesidad del modelado del comportamiento del viento. La velocidad de viento es el factor predominante en la potencia eólica disponible, por lo tanto, un correcto modelado de la velocidad del viento es de gran importancia para la investigación en energía eólica.

En este trabajo se desarrolla detalladamente la construcción matemática de dos modelos de velocidad de viento en escala de horas y se propone y desarrolla un modelo de velocidad de viento en escala de segundos, los tres modelos basados en ecuaciones diferenciales estocásticas. Los modelos son capaces de simular trayectorias de velocidad del viento con propiedades estadísticas similares a las observadas en los datos históricos de velocidad de viento disponibles para una ubicación del mundo real para la escala de tiempo para la cual están diseñados y son destinados a ser integrados a estudios para evaluar diferentes aspectos relacionados con los sistemas eólicos. Para las simulaciones, dichos modelos se han desarrollado en lenguaje MATLAB®.

Los modelos de velocidad de viento en escala de horas producen procesos estocásticos con distribución Weibull y una función de autocorrelación con decaimiento exponencial. Los modelos son configurados a partir de un análisis de datos de velocidades de viento registradas en dos ubicaciones de México, donde se encuentran situados los parques eólicos Oaxaca I y Eurus. Se comparan las propiedades estadísticas del proceso estocástico generado con las propiedades del conjunto de datos de velocidad de viento.

El modelo de velocidad de viento en escala de segundos es capaz de reproducir las características de intensidad de turbulencia y desviación estándar. Lo anterior es mostrado al realizar una comparación entre un conjunto de datos de velocidades de viento en segundos y una simulación mediante el modelo propuesto, así como una comparación entre las características del conjunto de datos y las características de la simulación.

Abstract

In recent years, wind energy has become increasingly integrated into electric power systems around the world due to concerns about global warming, advancing technology and reducing costs. However, the stochastic nature of wind poses new challenges in researching different approaches to wind systems. This leads to the need for modelling of wind behaviour. Wind speed is the predominant factor in the available wind power, therefore correct modelling of wind speed is of great importance for wind energy research.

In this work the mathematical construction of two hour scale wind speed models is developed in detail and a second scale wind speed model, the three models based on stochastic differential equations, is proposed and developed. The models are capable of simulating wind speed trajectories with statistical properties similar to those observed in the available historical wind speed data for a real world location for the time scale for which they are designed and are intended to be integrated into studies to evaluate different aspects related to wind systems. For the simulations, these models have been developed in MATLAB® language.

Hourly scale wind speed models produce stochastic processes with Weibull distribution and an autocorrelation function with exponential decay. The models are configured from an analysis of wind speed data recorded at two locations in Mexico, where the Oaxaca I and Eurus wind farms are located. The statistical properties of the stochastic process generated are compared with the properties of the wind speed dataset.

The second scale wind speed model is capable of reproducing the characteristics of turbulence intensity and standard deviation. This is shown by making a comparison between a set of wind speed data in seconds and a simulation using the proposed model, as well as a comparison between the characteristics of the data set and the characteristics of the simulation.

Dedicatoria

A Mariana García Olvera † (QEPD).

Por tu cariño y apoyo incondicional.

Por qué siempre tuviste las palabras correctas para motivarme.

Por haber sido la primera persona que me hizo creer que este sueño era posible.

Agradecimientos

A *Dios*, por guiar mi camino y darme la fortaleza para enfrentar cada reto que se me ha presentado en la vida.

A *mis padres*, por su apoyo, cariño, comprensión, consejos y enseñanzas.

A *mi hermano*, por su apoyo y compañía.

Al *Dr. Mohamed Badaoui*, por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimientos para desarrollar esta tesis, así como por su paciencia.

A la comisión revisora de tesis, por hacer sugerencias para el mejoramiento de este trabajo, *Dr. Daniel Olguin, Dr. David Romero, Dr. Jaime Robles, Dr. Germán Rosas y Dr. Daniel Ruiz*.

Al *Maestro Gilberto Enríquez Harper*, por su apoyo y por compartir sus conocimientos y experiencias.

Al *Dr. David Sebastián*, por su apoyo y amistad que hicieron más agradable la estancia en la maestría.

A mis compañeros de generación, *Omar, José Luis, Gume, Dante, Ismael, Alberto y Charly*, por su apoyo y compañía.

A todos aquellos que no menciono, pero que han creído en mi para la culminación de este trabajo.

Al Centro Nacional de Control de la Energía (CENACE), por haber proporcionado datos de velocidades de viento utilizados en esta tesis.

Al Sistema Meteorológico Nacional (SMN), por haber proporcionado datos de velocidades de viento utilizados en esta tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca de estudios de maestría otorgada durante dos años.

Al IPN por la Beca de Estímulo Institucional de Formación de Investigadores (BEIFI) en el proyecto de investigación apoyado por la Secretaría de Investigación y Posgrado (SIP), el cual se titula “Un modelo estocástico de velocidades de viento para plantas de generación eólica” con Clave: 20172231 y por la beca tesis otorgada durante el último semestre.

Índice general

Resumen	VII
Abstract	IX
Dedicatoria	XI
Agradecimientos	XIII
Índice de Figuras	XIX
Índice de Tablas	XXIII
Abreviaturas y Nomenclatura	XXV
1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. General	2
1.2.2. Particulares	2
1.3. Justificación	2
1.4. Antecedentes	3
1.4.1. Trabajos internacionales más relevantes	3
1.4.2. Aplicaciones en el contexto de la ingeniería eléctrica	5
1.4.3. Tesis desarrolladas en la SEPI-ESIME-Z relacionadas con aerogeneradores y generación eólica	7
1.5. Limitaciones y alcances	7
1.6. Aportaciones	8
1.6.1. Artículos derivados de la tesis	8
1.7. Estructura de la tesis	9

2. El Viento y sus Características	11
2.1. Origen del viento	11
2.2. Energía y potencia disponible en el viento	13
2.3. Medición del viento	15
2.4. Distribución de la velocidad del viento	16
2.5. Turbulencia del viento	18
3. Cálculo Estocástico	21
3.1. Procesos de Markov	21
3.2. Procesos estacionarios	22
3.3. Procesos estacionarios débiles de Markov	23
3.3.1. La Propiedad de regresión para procesos de Markov	24
3.3.2. Proceso de Ornstein-Uhlenbeck	25
3.3.3. Ecuación de Fokker-Planck	27
3.4. Transformaciones sin memoria	28
3.5. Simulación Numérica de la EDE	29
3.5.1. Métodos Implícitos	29
4. Desarrollo de los Modelos	33
4.1. Modelos de velocidad de viento en escala de horas	33
4.1.1. Modelo I	33
4.1.2. Modelo II	34
4.1.3. Representaciones Explícitas	36
4.2. Modelo de velocidad de viento en escala de segundos	39
5. Resultados	41
5.1. Modelos de velocidad de viento en escala de horas	41
5.1.1. Análisis y ajuste de datos	41
5.1.2. Modelo I	46
5.1.3. Modelo II	51
5.1.4. Comparación de los modelos	57
5.2. Modelo de velocidad de viento en escala de segundos	62
5.2.1. Pruebas de las parametrizaciones	62
5.2.2. Simulaciones de la solución I	63
5.2.3. Simulaciones de la solución II	66
5.2.4. Simulaciones de la solución III	69
5.2.5. Simulaciones de la solución IV	72
5.2.6. Comparación del modelo con datos reales	75

6. Conclusiones, Recomendaciones y Trabajos Futuros	81
6.1. Conclusiones	81
6.2. Aportaciones	82
6.3. Recomendaciones	82
6.4. Trabajos futuros	83
A. Conceptos Básicos de las Ecuaciones Diferenciales Estocásticas	93
A.1. Movimiento Browniano	93
A.2. Ecuaciones Diferenciales Estocásticas	94
A.3. Simulación de ecuaciones diferenciales estocásticas	96
A.3.1. Métodos explícitos	96
A.3.2. La Integral $b_2(X_t)$	97
B. Herramientas para el ajuste de datos	99
B.1. Pruebas de bondad de ajuste	99
B.1.1. Prueba de Kolmogorov-Smirnov	99
B.1.2. Prueba de Anderson-Darling	100
B.2. Ajuste de curva	100
C. Códigos en Matlab	103
C.1. Modelos en escala de horas	103
C.1.1. Modelo I	103
C.1.2. Modelo II	104
C.2. Modelo en escala de segundos	105
D. Velocidades de viento de OAU	111
E. Velocidades de viento de EUR	131

Índice de figuras

2.1.	Circulación atmosférica del aire. Las flechas entre las líneas de latitud indican la dirección de los vientos de superficie. La circulación cerrada que se muestra a la derecha indica el flujo vertical de aire [31] (<i>Adaptado</i>).	12
2.2.	Esquema de formación de brisas de mar y de tierra [17, 59] (<i>Adaptado</i>). . .	13
2.3.	Esquema de formación de brisas de valle y de montaña [17, 59] (<i>Adaptado</i>). . .	13
2.4.	Cilindro de aire en frente del rotor [31].	14
2.5.	Anemómetro de copa (izquierda) y veleta (derecha) [13, 31] (<i>Adaptado</i>). . .	16
2.6.	Función de densidad de probabilidad Weibull para $\lambda = 8$ m/s.	18
2.7.	Desviación estándar de la turbulencia para el modelo de turbulencia normal (MTN).	20
2.8.	Intensidad de turbulencia para el modelo de turbulencia normal (MTN). . .	20
3.1.	Gráfica de la expresión (3.12) para distintos valores de α	25
5.1.	Densidad de probabilidad de los datos horarios de velocidad media del viento de OAU y densidad de probabilidad de ajuste.	42
5.2.	Autocorrelación de los datos horarios de velocidad media del viento de OAU.	43
5.3.	Error absoluto entre la autocorrelación de los datos y el ajuste de curva de OAU.	43
5.4.	Densidad de probabilidad de los datos horarios de velocidad media del viento de EUR y densidad de probabilidad de ajuste.	44
5.5.	Autocorrelación de los datos horarios de velocidad media del viento de EUR.	45
5.6.	Error absoluto entre la autocorrelación de los datos y el ajuste de curva de EUR.	45
5.7.	Trayectoria de velocidad de viento generada por el modelo I para el caso de estudio OAU.	46
5.8.	Histograma normalizado los datos horarios de velocidad media del viento de OAU, densidad de probabilidad de ajuste e histograma normalizado de una simulación mediante el modelo I.	47
5.9.	Autocorrelación de los datos horarios de velocidad media del viento de OAU, ajuste exponencial y autocorrelación de una simulación mediante el modelo I.	47

5.10. Densidad de probabilidad de las velocidades de viento generadas por el modelo I para el caso de estudio OAU.	48
5.11. Autocorrelación de las velocidades de viento generadas por el modelo I para el caso de estudio OAU.	48
5.12. Trayectoria de velocidad de viento generada por el modelo I para el caso de estudio EUR.	49
5.13. Histograma normalizado los datos horarios de velocidad media del viento de EUR, densidad de probabilidad de ajuste e histograma normalizado de una simulación mediante el modelo I.	49
5.14. Autocorrelación de los datos horarios de velocidad media del viento de EUR, ajuste exponencial y autocorrelación de una simulación mediante el modelo I.	50
5.15. Densidad de probabilidad de las velocidades de viento generadas por el modelo I para el caso de estudio EUR.	50
5.16. Autocorrelación de las velocidades de viento generadas por el modelo I para el caso de estudio EUR.	51
5.17. Trayectoria de velocidad de viento generada por el modelo II para el caso de estudio OAU.	52
5.18. Histograma normalizado los datos horarios de velocidad media del viento de OAU, densidad de probabilidad de ajuste e histograma normalizado de una simulación mediante el modelo II.	52
5.19. Autocorrelación de los datos horarios de velocidad media del viento de OAU, ajuste exponencial y autocorrelación de una simulación mediante el modelo II.	53
5.20. Densidad de probabilidad de las velocidades de viento generadas por el Modelo II para el caso de estudio OAU.	53
5.21. Autocorrelación de las velocidades de viento generadas por el modelo II para el caso de estudio OAU.	54
5.22. Trayectoria de velocidad de viento generada por el modelo II para el caso de estudio EUR.	54
5.23. Histograma normalizado los datos horarios de velocidad media del viento de EUR, densidad de probabilidad de ajuste e histograma normalizado de una simulación mediante el modelo I.	55
5.24. Autocorrelación de los datos horarios de velocidad media del viento de EUR, ajuste exponencial y autocorrelación de la simulación.	55
5.25. Densidad de probabilidad de las velocidades de viento generadas por el Modelo II para el caso de estudio EUR.	56
5.26. Autocorrelación de las velocidades de viento generadas por el modelo II para el caso de estudio EUR.	56
5.27. Comparación de las trayectorias generadas por los modelos para el caso de estudio OAU.	57

5.28. Comparación de las densidades de probabilidad de las trayectorias generadas por ambos modelos para el caso de estudio OAU.	57
5.29. Comparación de las densidades de probabilidad de las trayectorias generadas por ambos modelos para el caso de estudio OAU.	58
5.30. Comparación de las densidades de probabilidad de las trayectorias generadas por ambos modelos para el caso de estudio OAU.	58
5.31. Comparación de las autocorrelaciones de las trayectorias generadas por ambos modelos para el caso de estudio OAU.	59
5.32. Comparación de las trayectorias generadas por los modelos para el caso de estudio EUR.	59
5.33. Comparación de las densidades de probabilidad de las trayectorias generadas por ambos modelos para el caso de estudio EUR.	60
5.34. Comparación de las densidades de probabilidad de las trayectorias generadas por ambos modelos para el caso de estudio EUR.	60
5.35. Comparación de las densidades de probabilidad de las trayectorias generadas por ambos modelos para el caso de estudio EUR.	61
5.36. Comparación de las autocorrelaciones de las trayectorias generadas por ambos modelos para el caso de estudio EUR.	61
5.37. Mediciones de velocidades medias de viento de cada 10 minutos correspondientes al mes Abril del 2013 obtenidas de la estación meteorológica Cabo Pulmo en Baja California Sur, México.	63
5.38. Simulación de un mes de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución I para una turbina de clase A.	63
5.39. Características de la simulación de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución I para una turbina de clase A.	64
5.40. Simulación de un mes de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución I para una turbina de clase B.	64
5.41. Características de la simulación de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución I para una turbina de clase B.	65
5.42. Simulación de un mes de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución I para una turbina de clase C.	65
5.43. Características de la simulación de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución I para una turbina de clase C.	66
5.44. Simulación de un mes de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución II para una turbina de clase A.	66
5.45. Características de la simulación de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución II para una turbina de clase A.	67
5.46. Simulación de un mes de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución II para una turbina de clase B.	67

5.47. Características de la simulación de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución II para una turbina de clase B.	68
5.48. Simulación de un mes de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución II para una turbina de clase C.	68
5.49. Características de la simulación de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución II para una turbina de clase C.	69
5.50. Simulación de un mes de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución III para una turbina de clase A.	69
5.51. Características de la simulación de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución III para una turbina de clase A.	70
5.52. Simulación de un mes de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución III para una turbina de clase B.	70
5.53. Características de la simulación de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución III para una turbina de clase B.	71
5.54. Simulación de un mes de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución III para una turbina de clase C.	71
5.55. Características de la simulación de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución III para una turbina de clase C.	72
5.56. Simulación de un mes de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución IV para una turbina de clase A.	72
5.57. Características de la simulación de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución IV para una turbina de clase A.	73
5.58. Simulación de un mes de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución IV para una turbina de clase B.	73
5.59. Características de la simulación de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución IV para una turbina de clase B.	74
5.60. Simulación de un mes de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución IV para una turbina de clase C.	74
5.61. Características de la simulación de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución IV para una turbina de clase C.	75
5.62. Velocidad de viento real en segundos obtenidos de [56].	76
5.63. Características de datos de velocidad de viento reales.	76
5.64. Velocidad de viento simulada.	77
5.65. Características de datos de velocidad de viento reales.	78
5.66. Comparación de la velocidad de viento real y la velocidad de viento simulada.	78
5.67. Comparación de las características de los datos de velocidad de viento reales y simulaciones.	79
5.68. Error absoluto entre la intensidad de turbulencia de los datos y la intensidad de turbulencia de la simulación.	79

Índice de tablas

4.1. Esquemas Numéricos	40
5.1. Parámetros de ajuste para los datos de velocidad de viento OAU.	42
5.2. Parámetros de ajuste para los datos de velocidad de viento EUR.	44
D.1. Datos de velocidad de viento del 1 al 10 de marzo de 2017.	112
D.2. Datos de velocidad de viento del 11 al 20 de marzo de 2017.	113
D.3. Datos de velocidad de viento del 21 al 31 de marzo de 2017.	114
D.4. Datos de velocidad de viento del 1 al 10 de abril de 2017.	115
D.5. Datos de velocidad de viento del 11 al 20 de abril de 2017.	116
D.6. Datos de velocidad de viento del 21 al 30 de abril de 2017.	117
D.7. Datos de velocidad de viento del 1 al 10 de mayo de 2017.	118
D.8. Datos de velocidad de viento del 11 al 20 de mayo de 2017.	119
D.9. Datos de velocidad de viento del 21 al 31 de mayo de 2017.	120
D.10. Datos de velocidad de viento del 1 al 10 de junio de 2017.	121
D.11. Datos de velocidad de viento del 11 al 20 de junio de 2017.	122
D.12. Datos de velocidad de viento del 21 al 30 de junio de 2017.	123
D.13. Datos de velocidad de viento del 1 al 10 de julio de 2017.	124
D.14. Datos de velocidad de viento del 11 al 20 de julio de 2017.	125
D.15. Datos de velocidad de viento del 21 al 31 de julio de 2017.	126
D.16. Datos de velocidad de viento del 1 al 10 de agosto de 2017.	127
D.17. Datos de velocidad de viento del 11 al 20 de agosto de 2017.	128
D.18. Datos de velocidad de viento del 21 al 31 de agosto de 2017.	129
E.1. Datos de velocidad de viento del 1 al 10 de marzo de 2017.	132
E.2. Datos de velocidad de viento del 11 al 20 de marzo de 2017.	133
E.3. Datos de velocidad de viento del 21 al 31 de marzo de 2017.	134
E.4. Datos de velocidad de viento del 1 al 10 de abril de 2017.	135
E.5. Datos de velocidad de viento del 11 al 20 de abril de 2017.	136
E.6. Datos de velocidad de viento del 21 al 30 de abril de 2017.	137
E.7. Datos de velocidad de viento del 1 al 10 de mayo de 2017.	138

E.8. Datos de velocidad de viento del 11 al 20 de mayo de 2017.	139
E.9. Datos de velocidad de viento del 21 al 31 de mayo de 2017.	140
E.10. Datos de velocidad de viento del 1 al 10 de junio de 2017.	141
E.11. Datos de velocidad de viento del 11 al 20 de junio de 2017.	142
E.12. Datos de velocidad de viento del 21 al 30 de junio de 2017.	143
E.13. Datos de velocidad de viento del 1 al 10 de julio de 2017.	144
E.14. Datos de velocidad de viento del 11 al 20 de julio de 2017.	145
E.15. Datos de velocidad de viento del 21 al 31 de julio de 2017.	146
E.16. Datos de velocidad de viento del 1 al 10 de agosto de 2017.	147
E.17. Datos de velocidad de viento del 11 al 20 de agosto de 2017.	148
E.18. Datos de velocidad de viento del 21 al 31 de agosto de 2017.	149

Abreviaturas y Nomenclatura

FDP	Función de densidad de probabilidad
FDA	Función de distribución acumulada
MTN	Modelo de turbulencia normal
EDO	Ecuación diferencial ordinaria
EDE	Ecuación diferencial estocástica
OU	Ornstein-Uhlenbeck
$C^2(\mathbb{R})$	Conjunto de todas las funciones reales suaves cuya segunda derivada es continua
m	Masa de aire
v	Velocidad del viento
ρ	Densidad del aire
V	Volumen de aire
P	Potencia del viento
A	Área de sección transversal de una turbina eólica
r	Radio del rotor de una turbina eólica
P_r	Potencia máxima en el rotor de una turbina eólica
C_p	Coefficiente de potencia del rotor de una turbina eólica
\bar{v}	Velocidad media del viento en un cierto periodo de tiempo
λ, k	Parámetros de escala y forma de la distribución Weibull
$p_W(\cdot)$	FDP Weibull
$F_W(\cdot)$	FDA Weibull
μ	Media
σ^2	Varianza
σ	Desviación estándar
$\Gamma(\cdot)$	Función Gamma
$\Gamma(\cdot, \cdot)$	Función Gamma Incompleta
v'	Velocidad instantánea del viento
I_v	Intensidad de turbulencia
σ_v	Desviación estándar de la velocidad del viento
$p_N(\cdot)$	FDP Gaussiana (Normal)
I_{ref}	Intensidad de turbulencia esperada a 15 m/s de velocidad del viento

X_t, Y_t	Procesos estocásticos
$\mathbb{E}[X_t]$	Esperanza del proceso X_t
$\text{Var}[X_t]$	Varianza del proceso X_t
$\text{Cov}(s, t)$	Función de autocovarianza de procesos estacionarios
$\text{Cor}(s, t)$	Función de autocorrelación de procesos estacionarios
\hat{W}_t	Proceso de Wiener
W_t	Proceso estándar de Wiener

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

Nuestro mundo ha sido impulsado principalmente por combustibles fósiles durante más de dos siglos, con cierta demanda satisfecha por las plantas de energía nuclear en las últimas décadas. Debido al creciente costo de los combustibles fósiles, los efectos nocivos de las emisiones de carbono y las crecientes preocupaciones ambientales en los últimos años sobre el cambio climático se ha creado una nueva demanda de fuentes de energía limpias y sostenibles, como la energía eólica, marítima, solar, de biomasa y geotérmica.

Desde la antigüedad, el viento ha sido explotado de diferentes maneras. Las aplicaciones más antiguas de la energía eólica eran principalmente proporcionar energía mecánica para bombear agua o moler grano. La energía eólica para la producción de electricidad comenzó a tener auge en la década de 1970 después de la crisis del petróleo, con una gran inyección de dinero para la investigación y encontrar fuentes alternativas de energía [31].

La energía eólica está ganando impulso ya que es una de las fuentes renovables más esenciales y tiene un gran potencial energético sin que se genere contaminación del aire o del suelo.

En el panorama mundial, en 2017 la generación eólica aumentó un 11 % en la capacidad acumulada con 52.5 GW que conduce a una capacidad total acumulada al final del año de 539 GW [23].

En México el primer parque eólico se construyó en 1994 en La Venta, Oaxaca. Este parque, originalmente un proyecto prototipo, cuenta con siete aerogeneradores de 225 kW y fue el primero en su tipo en el país y América Latina. Actualmente México cuenta con 45 centrales eólicas cuya capacidad instalada alcanza los 4.199 MW que representa el 6 % de la capacidad total instalada [51].

La industria eólica mexicana está determinada a tener 14000 MW de capacidad eólica instalada para fines de 2022. Los parques eólicos de México están ubicados en los estados de Baja California, Zacatecas, Chiapas, Jalisco, Nuevo León, Oaxaca, San Luis Potosí,

Tamaulipas y Puebla [23].

El aumento en la capacidad de generación eólica instalada presenta desafíos para el funcionamiento del sistema de potencia debido a la intermitencia y variabilidad natural del recurso eólico. Dada su aleatoriedad, es necesario conocer sus características estadísticas. Modelos capaces de reproducir estas características estadísticas son, por lo tanto, una parte indispensable para la evaluación de diferentes aspectos del recurso eólico, el análisis de la eficiencia y el rendimiento de los sistemas de generación eólica en una ubicación.

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Desarrollar modelos de velocidad de viento basados en ecuaciones diferenciales estocásticas, capaces de reproducir las propiedades estadísticas de las velocidades de viento observadas en el mundo real.

1.2.2. Particulares

1. Desarrollar un modelo de velocidad de viento capaz de simular trayectorias en escala de horas basado en el proceso de Ornstein-Uhlenbeck.
2. Desarrollar un modelo de velocidad de viento capaz de simular trayectorias en escala de horas basado en la ecuación de Fokker-Planck.
3. Realizar un análisis de las propiedades estadísticas de las trayectorias de la velocidad de viento.
4. Proponer una metodología para simular trayectorias de velocidad de viento en escala de segundos.

1.3. Justificación

Debido a la creciente tendencia en las inversiones en energía eólica y a la intermitencia y aleatoriedad natural del recurso eólico, muchos estudios relacionados con los sistemas eólicos frecuentemente requieren un registro histórico de velocidades de viento para realizar investigaciones y evaluar diferentes aspectos del sistema. Algunas veces los datos reales requeridos de velocidad de viento para estos estudios no están disponibles y en su lugar se integran modelos de velocidad de viento, que pudieran no ser muy acertados. Por esta razón se requiere caracterizar la velocidad del viento en los sitios donde están ubicados los parques eólicos.

Las características estadísticas de la velocidad de viento en escala de horas son la distribución de probabilidad y la función de autocorrelación. Existe una variedad de funciones de densidad de probabilidad que se han propuesto en la literatura científica relacionada con las energías renovables para describir las distribuciones de frecuencia de la velocidad del viento. Se ha concluido que la distribución Weibull de dos parámetros presenta una serie de ventajas con respecto a otras funciones de densidad de probabilidad analizadas [13]. En lo que respecta a la función de autocorrelación, se ha observado a partir de los datos de velocidad media del viento por hora, que generalmente se caracteriza por un decaimiento exponencial en el intervalo de horas [10].

En escala de segundos, la distribución de probabilidad de la velocidad del viento puede considerarse aproximadamente Gaussiana [12, 41], cuya desviación estándar es una consecuencia de un parámetro conocido como intensidad de turbulencia y la velocidad media del viento en un intervalo de tiempo, generalmente 10 minutos [41, 48].

Por lo anterior, es importante contar con modelos de velocidad de viento que sean capaces de reproducir las propiedades estadísticas a las observadas en una ubicación geográfica y además puedan usarse para modelar trayectorias de velocidad de viento para diferentes escalas de tiempo, y así poder evaluar diversos aspectos relacionados con los sistemas eólicos como son los estudios de la economía y operación del sistema eléctrico ([1, 47, 65]), evaluación de confiabilidad de capacidad de generación ([8, 9, 38]) y estudios dinámicos y control de aerogeneradores ([44, 36, 28]).

1.4. Antecedentes

1.4.1. Trabajos internacionales más relevantes

Se han realizado muchos esfuerzos por obtener un modelado del comportamiento de la velocidad del viento por ser un aspecto esencial en muchos estudios relacionados con sistemas de potencia. Las técnicas utilizadas en estas áreas incluyen la caracterización del comportamiento del viento, generación de trayectorias de velocidad del viento y pronóstico de velocidad del viento entre otras.

En [4] se describe un modelo de velocidad del viento, conocido como modelo de cuatro componentes, una velocidad promedio del viento, una componente de rampa, una componente de ráfaga y una componente que representa la turbulencia.

En [14] se hace una revisión de una variedad de funciones de densidad de probabilidad que se han propuesto en la literatura científica relacionada con las energías renovables para describir las distribuciones de frecuencia de la velocidad del viento. Se concluye que la distribución Weibull de dos parámetros presenta una serie de ventajas con respecto a otras funciones de densidad de probabilidad analizadas.

En [37] se presenta una revisión bibliográfica sobre los antecedentes generales de la investigación y los desarrollos en los campos de la predicción de la velocidad del viento y la potencia generada.

En [43] se proporciona una metodología para caracterizar los procesos estocásticos relacionados con la velocidad del viento en diferentes ubicaciones geográficas a través de escenarios. Cada uno de estos escenarios incorpora dependencias de tiempo y depende espacialmente de los escenarios que describen otros procesos estocásticos de viento.

En [9] se examina e ilustra los efectos en los índices de suficiencia de la capacidad de generación de un sistema de prueba que utiliza diferentes procedimientos de modelado de la velocidad del viento en la simulación de Monte Carlo y la evaluación de confiabilidad analítica. La velocidad del viento se representa utilizando datos observados cada hora, de la velocidad media del viento por hora, series de tiempo de promedio móvil autorregresivo (ARMA), promedio móvil (MA) series de tiempo, distribución normal y modelos de cadena de Markov.

En [66] se proponen y ensayan dos procedimientos para desarrollar modelos continuos de velocidad del viento basados en ecuaciones diferenciales estocásticas. Los métodos se aplican para construir modelos capaces de simular trayectorias de velocidad del viento que se describen estadísticamente mediante la distribución de Weibull y la autocorrelación exponencial. Los modelos desarrollados son capaces de generar trayectorias de velocidad del viento con distribuciones marginales similares y funciones de autocorrelación a las observadas en datos de velocidad del viento.

En [67] se describen tres métodos para construir modelos de velocidad del viento basados en ecuaciones diferenciales estocásticas. Dichos métodos se aplican y conducen a modelos capaces de generar procesos estocásticos con distribución de Weibull y autocorrelación exponencial. Los resultados de la simulación de los modelos revelan que proporcionan trayectorias de velocidad del viento con las propiedades estadísticas para las que fueron diseñados.

En [68] se desarrolla un método sistemático para construir modelos de velocidad del viento basados en ecuaciones diferenciales estocásticas. Se aplica un nuevo enfoque analíticamente exacto para definir la formulación de los términos de deriva y volatilidad de una ecuación diferencial estocástica para reproducir la distribución de probabilidad estacionaria dada y la autocorrelación exponencial que caracteriza la velocidad del viento.

En [7] se propone un modelo dinámico que es un proceso de difusión de Markov. A

partir de consideraciones básicas, se muestra que el proceso Cox-Ingersoll-Ross (CIR) es un buen modelo para describir la norma al cuadrado de la velocidad del viento $Z = \|V\|^2$. Se exhibe el desempeño de este proceso para pronosticar la velocidad del viento en el horizonte a corto plazo.

En [30] se propone un marco de modelado basado en ecuaciones diferenciales estocásticas para describir las velocidades del viento en tiempo continuo. Se construye un modelo que captura la naturaleza limitada de la velocidad del viento y su variabilidad cambiante a lo largo del tiempo, y que incorpora predicciones numéricas del tiempo y tendencias estocásticas.

En [32] se presenta un procedimiento de cuatro pasos para producir modelos de velocidad del viento en tiempo continuo de los procesos bien conocidos de media móvil autoregresiva que conserva tanto la distribución de probabilidad como la autocorrelación de la velocidad real del viento.

En [40] se propone y prueba un modelo de movimiento browniano geométrico Ornstein-Uhlenbeck en tiempo continuo para representar la velocidad del viento, a la vez que incluye su ciclo diario a largo plazo. También ilustra un modelo de ecuación diferencial parcial de la velocidad del viento y de la producción de energía eólica resultante, con el objetivo de calcular sus estadísticas.

En [48] se analiza la intensidad de turbulencia de los parques eólicos en tierra. Los resultados del análisis muestran que el modelo de turbulencia normal definido en el estándar IEC no es consistente con las observaciones reales. El modelo de turbulencia normal sobreestima la intensidad de turbulencia. Por lo tanto, se propone un nuevo modelo de ley de potencia de tres parámetros de intensidad de turbulencia basado en observaciones reales.

1.4.2. Aplicaciones en el contexto de la ingeniería eléctrica

Los modelos de velocidad del viento se utilizan en el análisis de aspectos relacionados con sistemas de potencia, por ejemplo, en economía y operación del sistema de potencia, evaluación de confiabilidad de capacidad de generación, y estudios dinámicos y control de aerogeneradores. A continuación, se nombran algunos ejemplos destacados de estas aplicaciones.

En [1] se presenta un marco de modelos matemáticos para examinar el efecto de la generación eólica en los sistemas de energía. Se propone un modelo de mercado de energía de precio marginal local estocástico que incorpora escenarios de generación de energía eólica.

En [47] se presenta un enfoque basado en algoritmos genéticos para la solución del flujo de potencia óptimo en redes de distribución con unidades de generación distribuida, incluidas celdas de combustible, microturbinas, generadores diésel, sistemas fotovoltaicos y turbinas eólicas.

En [65] se propone un método de cálculo de flujo gas y de potencia probabilístico unificado para analizar el efecto de los factores aleatorios en el sistema acoplado de gas natural y electricidad.

En [8] se presenta una metodología para evaluar la suficiencia de capacidad de los sistemas de energía, incluida la eólica. Se presentan los resultados y discusiones sobre dos sistemas representativos que contienen unidades de generación convencionales y sistemas de conversión de energía eólica.

En [38] presenta un modelo informático para la representación probabilística de la generación de parques eólicos para estudios de confiabilidad, que puede proporcionar una estimación anual de la producción de energía y calcular varios índices de rendimiento. El modelo combina las características estocásticas de la velocidad del viento con la información operativa de las turbinas, como el índice de fallas y reparaciones, que representa el parque eólico mediante un proceso de Markov.

En [44] se presenta un controlador evolutivo que comprende un control gaussiano cuadrático lineal y un neurocontrol que actúa en conjunto para lograr un rendimiento óptimo en altas intensidades de turbulencia, para un generador de turbina eólica de velocidad variable y paso fijo. Los objetivos de control son la conversión máxima de energía y la reducción mecánica tensiones en los componentes del sistema.

En [36] se presenta un sistema inteligente de control de turbinas eólicas basado en modelos que integran los siguientes tres enfoques: minería de datos, modelo de control predictivo y cálculo evolutivo. Para mejorar la estrategia de control del sistema inteligente, se propone un modelo multi-objetivo. El modelo incluye cinco objetivos diferentes con diferentes pesos que controlan el rendimiento del aerogenerador. Estos pesos se ajustan en respuesta a las condiciones variables del viento y los requisitos operacionales. Tres factores de control, la velocidad del viento, la intensidad de la turbulencia y la demanda de electricidad se consideran en ocho escenarios computacionales.

1.4.3. Tesis desarrolladas en la SEPI-ESIME-Z relacionadas con aerogeneradores y generación eólica

En [19] se proponen metodologías tanto deterministas como probabilísticas que permitan observar los beneficios tanto en energía como en capacidad disponible debidos a la adición de una central eólica.

En [29] se analizan y se implementan, en un programa de simulación en el tiempo, modelos dinámicos simplificados de los aerogeneradores de inducción más comunes, que permitan evaluar el efecto de estas plantas en el comportamiento dinámico del sistema en estudios de estabilidad de corto plazo, los cuales se analizan la respuesta dinámica del sistema en un periodo de tiempo, después de que ocurre un disturbio.

En [3] se establecen lineamientos basados en aspectos económicos, probabilísticos y de análisis de sistemas eléctricos de potencia para diseñar la red de transmisión asociada a la generación eólica, así como su interconexión hasta la red de transmisión de la compañía suministradora.

En [28] se desarrolla un modelo detallado de los aerogeneradores de inducción de velocidad fija que puede ser empleado en simulaciones en tiempo real, además, el modelo del generador puede ser empleado en simulaciones digitales fuera de línea.

En [49] se desarrolla e implementa un emulador de turbina eólica. Se establecen las características y los parámetros necesarios para evaluar los modelos de turbinas eólicas y con esto, construir el emulador de turbina eólica, el cual debe seguir el comportamiento de los coeficientes de potencia y par de la turbina eólica.

1.5. Limitaciones y alcances

Los modelos desarrollados en el presente trabajo, son capaces de simular trayectorias de velocidad del viento con propiedades estadísticas similares a las observadas en los datos históricos de velocidad de viento disponibles para una ubicación geográfica, para la escala de tiempo para la cual están diseñados.

En este trabajo se desarrollan modelos de velocidades de viento para dos escalas de tiempo, horas y segundos y estos cuentan con características muy diferentes. A través del análisis de datos históricos registrados se puede estimar las características de cada modelo.

Para la configuración y prueba de los modelos en horas, se dispone de seis meses de datos de velocidad de viento promedio de cada hora de dos sitios donde se encuentran ubicados parques eólicos. En [67] y [68] estos modelos fueron configurados y probados con un año de datos.

Para la configuración y prueba del modelo en segundos, se dispone de una semana de datos de velocidad de viento en segundos que fueron obtenidos de [56].

Hay que tener en cuenta que la caracterización de la velocidad del viento en una ubicación particular es un problema de naturaleza diferente a la predicción de la velocidad del viento para ese sitio. Aunque algunas propiedades de los modelos presentados en este trabajo pueden ser utilizadas en herramientas de pronóstico, estos modelos son para la caracterización de velocidades de viento.

1.6. Aportaciones

Se presenta el desarrollo de dos modelos de velocidad de viento basados en ecuaciones diferenciales estocásticas en escala de horas planteados en [66, 67] y [68], y son utilizados para modelar la velocidad del viento de dos ubicaciones en México, donde se encuentran ubicados los parques eólicos Oaxaca I y Eurus.

Además, se propone un modelo de velocidades de viento basado en ecuaciones diferenciales estocásticas en escala de segundos, capaz de reproducir las propiedades de la turbulencia de viento.

Los parámetros de cada modelo se definen de acuerdo con los resultados del análisis estadístico de conjuntos de datos de velocidades de viento.

Los modelos están destinados a ser integrados a estudios para evaluar diferentes aspectos relacionados con los sistemas eléctricos.

Todos los modelos se han desarrollado en lenguaje MATLAB®.

Parte de este trabajo fue desarrollado en un proyecto de investigación apoyado por la Secretaria de Investigación y Posgrado (SIP) del IPN, el cual se titula “Un modelo estocástico de velocidades de viento para plantas de generación eólica” con Clave: 20172231.

1.6.1. Artículos derivados de la tesis

Como resultado de este trabajo se publicaron los siguientes dos artículos:

- “Generación de trayectorias de velocidad de viento con distribución Weibull y autocorrelación exponencial: Caso de estudio en Oaxaca, México”, 2018 RVP-IA, Acapulco, México.
- “Simulación de trayectorias de velocidad de viento mediante un modelo basado en la ecuación de Fokker-Planck”, 2018 CNIES, Ciudad de México.

1.7. Estructura de la tesis

Este trabajo se encuentra organizado como sigue: luego de esta introducción, en el capítulo 2 se comienza con una descripción del origen del viento, los conceptos de energía y potencia contenida en el viento y cuanta puede ser capturada por un aerogenerador. Además de la medición del viento, se describe la naturaleza estadística de la velocidad del viento y la turbulencia del viento. En el capítulo 3 se describen las herramientas matemáticas utilizadas para el desarrollo de los modelos, procesos de Markov, procesos estacionarios, transformaciones sin memoria y finalmente la simulación de ecuaciones diferenciales estocásticas. En el capítulo 4 se describe la construcción de los modelos de velocidad de viento para escalas de horas y segundos. En el capítulo 5 se muestran los resultados del análisis de los datos por medio de los cuales son parametrizados los modelos, simulaciones, así como las propiedades estadísticas de las simulaciones. En el capítulo 6 se dan las conclusiones del trabajo, recomendaciones y posibles trabajos futuros. Además, esta tesis incluye cinco apéndices. En el apéndice A se describen conceptos básicos de ecuaciones diferenciales estocásticas que hace más entendible algunos temas abordados en el capítulo 2. El apéndice B se presenta las herramientas utilizadas en los procesos de ajuste de datos. En el apéndice C se proporcionan los códigos con los cuales se llevaron a cabo las simulaciones. En los apéndices D y E se presentan los datos de velocidad de viento promedio de cada hora utilizados en esta tesis de dos sitios donde se encuentran ubicados parques eólicos.

Capítulo 2

El Viento y sus Características

2.1. Origen del viento

Los vientos globales son causados por el calentamiento desigual de la Tierra por la radiación solar. Se recibe una mayor cantidad de radiación solar en el ecuador que en los polos, lo que da lugar a diferentes zonas térmicas que provocan diferencias de densidad en las masas de aire [13, 31].

En un modelo de flujo simple, en el ecuador, el aire al calentarse se hace más ligero y asciende a las capas altas de la atmósfera y se mueve hacia los polos. En los polos, el aire es más pesado y desciende. Si la Tierra no girase y su superficie fuese homogénea el aire simplemente seguiría un ciclo en cada hemisferio en el que se movería desde los polos al ecuador por las capas bajas de la atmósfera y del ecuador a los polos por las capas altas [13].

Si se toma en cuenta el movimiento de rotación de la Tierra, el modelo se complica. El movimiento de rotación de la Tierra da lugar a la aparición de la fuerza de Coriolis. La fuerza de Coriolis impide que el flujo de aire del modelo simple descrito anteriormente continúe más allá de alrededor de los 30° de latitud en ambos hemisferios. En esta latitud, hay un área de alta presión, ya que el aire comienza a descender nuevamente. A medida que el viento sube desde el ecuador, hay un área de baja presión cerca del nivel del suelo que atrae los vientos del norte y del sur. En los polos, hay una alta presión debido al enfriamiento del aire. La figura 2.1 ilustra la dirección del viento predominante debido a las diferencias de radiación solar y la fuerza de Coriolis en cada banda de 30° de latitud [13, 31].

Lo anterior describe solo la circulación global del viento, aunque es mucho más compleja, ya que intervienen más factores como la composición de la Tierra en océanos y continentes, el movimiento de traslación de la Tierra, la topografía de los continentes, entre otras.

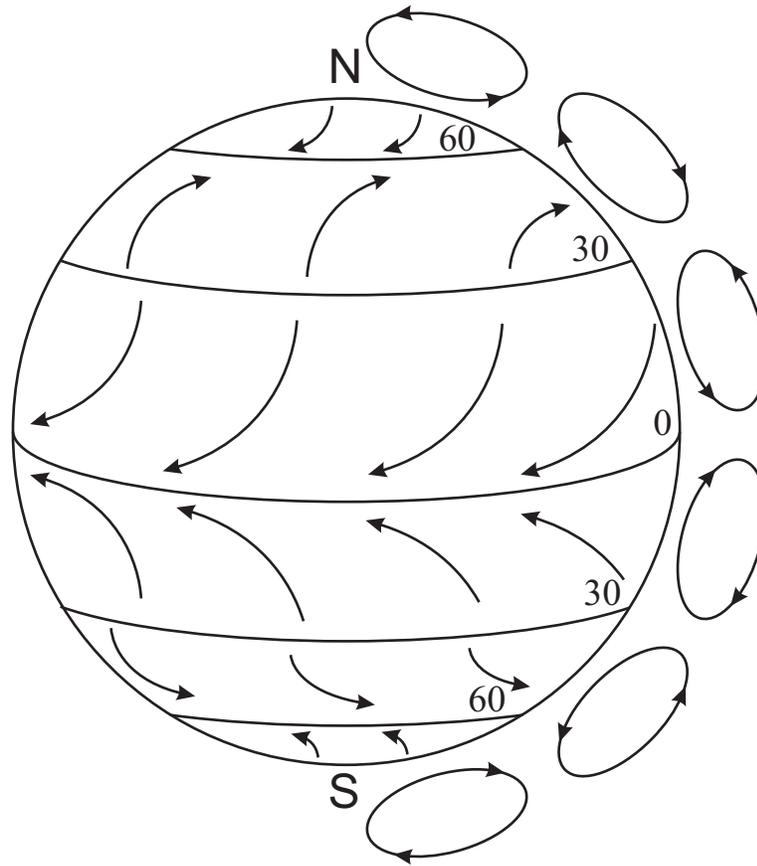


Figura 2.1: Circulación atmosférica del aire. Las flechas entre las líneas de latitud indican la dirección de los vientos de superficie. La circulación cerrada que se muestra a la derecha indica el flujo vertical de aire [31] (*Adaptado*).

A todo lo anterior también se puede incluir efectos locales, algunos de los principales son [17, 59]:

- Brisas de mar y brisas de tierra (figura 2.2). La tierra se calienta y enfría más rápido que el mar. Esto provoca que el viento sople del mar a la tierra durante el mediodía y la tarde, con flujo inverso durante la noche y el amanecer.
- Brisas de valle y de montaña (figura 2.3). Al anochecer, el aire en contacto con el terreno más elevado se enfría más rápidamente que el aire situado sobre el valle, por lo que tiende a descender hacia el valle. Durante el día, y por efecto de la radiación solar, el proceso se invierte y es el viento situado en la proximidad de los valles, el que tiende a ascender por la ladera.



Figura 2.2: Esquema de formación de brisas de mar y de tierra [17, 59] (*Adaptado*).

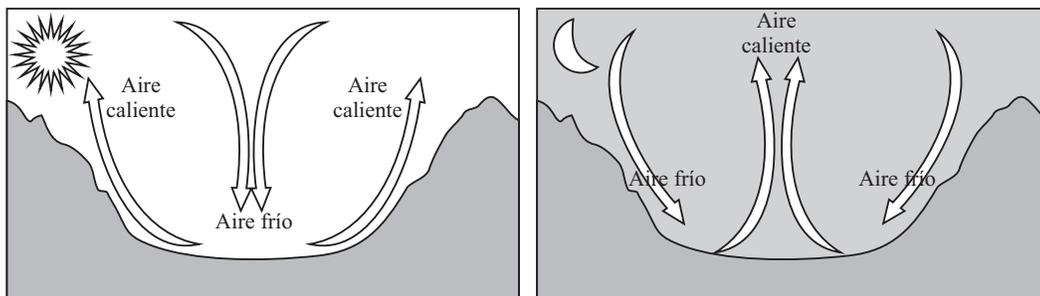


Figura 2.3: Esquema de formación de brisas de valle y de montaña [17, 59] (*Adaptado*).

2.2. Energía y potencia disponible en el viento

En esta sección se introducen algunos conceptos básicos del viento. La energía cinética del viento está dada por [31]:

$$E = \frac{1}{2}mv^2, \quad (2.1)$$

donde m es la masa del aire y v la velocidad con la que se mueve dicha masa.

La masa m contenida en un volumen de aire V que fluye a través del rotor, está dada en términos de la densidad ρ por [31]:

$$m = \rho V. \quad (2.2)$$

Para una turbina eólica de eje horizontal, el volumen de aire es cilíndrico, como se muestra en la figura 2.4.

La energía cinética por unidad de tiempo, o potencia contenida en el viento está dada por [31]:

$$P = \dot{E} = \frac{1}{2}\dot{m}v^2, \quad (2.3)$$

donde \dot{E} y \dot{m} son respetivamente la derivada de E y m . Además \dot{m} está dada por [31]:

$$\dot{m} = \rho\dot{V} = \rho Av, \quad (2.4)$$

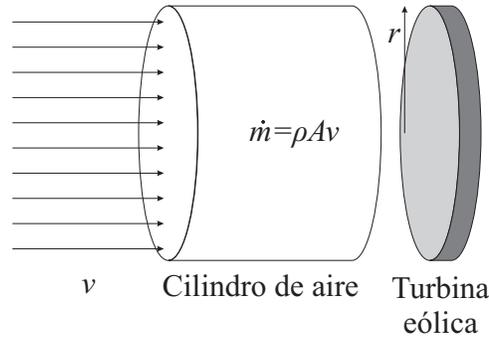


Figura 2.4: Cilindro de aire en frente del rotor [31].

donde A es el área de la sección transversal. De las ecuaciones (2.3) y (2.4) se obtiene [24, 31]:

$$P = \frac{1}{2}(\rho Av)v^2 = \frac{1}{2}\rho Av^3. \quad (2.5)$$

De la ecuación (2.5), es evidente que el factor predominante en la potencia eólica disponible es la velocidad de viento. Aumentando la velocidad de 5 a 6 m/s , aumenta la potencia eólica disponible en un 73% [24].

Para una turbina eólica de eje horizontal, $A = \pi r^2$, donde r es el radio del rotor, por lo tanto [31]:

$$P = \frac{1}{2}\rho\pi r^2 v^3. \quad (2.6)$$

Dos sitios con potencial de viento se comparan en términos de la potencia eólica específica. También se conoce como la densidad de potencia del sitio, y está dada por la siguiente expresión [24]:

$$\text{potencia específica del sitio} = \frac{1}{2}\rho v^3. \quad (2.7)$$

El físico alemán Albert Betz, publicó en 1919 una teoría, conocida como ley de Betz. Según esta ley no puede convertirse más del 16/27 (el 59.3%) de la energía cinética del

viento en energía mecánica mediante una turbina eólica. La demostración de dicha ley puede encontrarse en [41].

La potencia máxima en el rotor de una turbina eólica viene dada por [13]:

$$P_r = \frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \rho A v^3 \right). \quad (2.8)$$

En (2.8) el factor $16/27$ se denomina límite de Betz.

Para una turbina eólica de eje horizontal, la potencia del rotor de una turbina eólica está dada por [13]:

$$P_r = C_p \left(\frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 \right), \quad (2.9)$$

donde el coeficiente de potencia del rotor C_p (que depende de la forma aerodinámica de la pala y que en los rotores modernos alcanza valores en el rango de 0.4 a 0.5).

2.3. Medición del viento

Como ya se mostró, la densidad de potencia en un sitio es proporcional al cubo de la velocidad media del viento. Esto implica que pequeños cambios en las estimaciones de la velocidad del viento pueden resultar en grandes cambios en las estimaciones de la energía eólica. Por lo tanto, el régimen del viento en un sitio se debe determinar lo más exacto posible. Existen altos requisitos en los dispositivos de medición del viento, los sensores y la instrumentación para el registro de datos. Además, los instrumentos utilizados deben ser robustos y acumular datos de manera confiable durante períodos prolongados sin mantenimiento [21, 58].

Desde la perspectiva de un proyecto de energía eólica, las dos cantidades de importancia son la velocidad del viento resultante en el plano horizontal y la dirección en el mismo plano. La turbina eólica de eje vertical captura energía independientemente de la dirección del viento en el plano horizontal. La turbina eólica de eje horizontal tiene un mecanismo de guiñada que alinea el plano de rotación para que sea perpendicular a la dirección del viento. Debido a la naturaleza estocástica de la velocidad del viento, hay un componente significativo de aleatoriedad a la velocidad del viento en un punto en el espacio y en un momento en el tiempo. Por lo tanto, el promedio temporal se realiza para informar la velocidad del viento. Para aplicaciones de energía eólica, la velocidad del viento se mide generalmente cada pocos segundos y se calculan estadísticas de 10 minutos como promedio, mínimo, máximo y desviación estándar, y se descartan los datos de muestra de pocos segundos [31].

La mayoría de las mediciones de la velocidad del viento en el plano horizontal y la dirección en el mismo plano en el sitio se realizan utilizando el anemómetro de copa y la veleta (figura 2.5).

Los anemómetros de copa están diseñados principalmente para medir la componente horizontal de la velocidad del viento en lugar de la velocidad real del viento tridimensional. Esto es razonable para aplicaciones de energía eólica porque es el viento horizontal que está disponible para la conversión de energía por una turbina eólica [31].

La veleta consiste de un dispositivo montado sobre un eje vertical y de giro libre, de modo que se mueve cuando el viento cambia de dirección y se acopla a transductores que generan una señal [13].

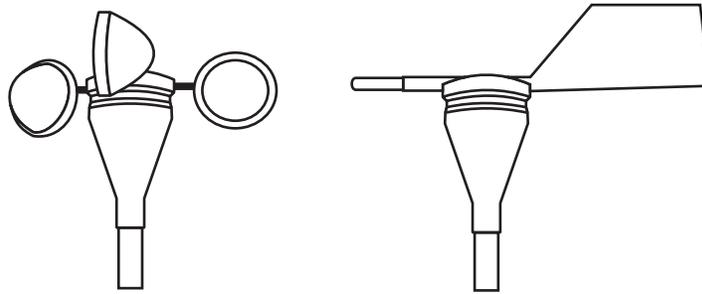


Figura 2.5: Anemómetro de copa (izquierda) y veleta (derecha) [13, 31] (*Adaptado*).

2.4. Distribución de la velocidad del viento

Para la industria eólica, es muy importante poder describir la variación de las velocidades del viento en un intervalo de tiempo determinado.

Generalmente se recopilan muestras de la velocidad del viento en intervalos aproximadamente de 1 a 10 segundos y luego se obtiene las velocidades medias de viento \bar{v} en un cierto periodo de tiempo por medio de la siguiente expresión:

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i, \quad (2.10)$$

donde n es el número de muestras y v_i es la serie de muestras de la velocidad del viento [41].

Las velocidades medias de viento durante un tiempo prolongado (es costumbre hablar en términos de horas en un año) suelen tener una cola derecha larga, es decir, asimetría positiva. Esto significa que los valores de velocidad de viento están limitados a un lado. Además, los valores de velocidad del viento no pueden ser negativos. La frecuencia relativa de ocurrencia para cada velocidad del viento es muy importante para determinar el recurso en el sitio. Si la velocidad del viento es 20 m/s , la potencia disponible es muy grande en ese instante, pero si sopla a esa velocidad por solo 10 horas al año y el resto del tiempo la velocidad del viento es cercana a cero, el recurso para el año es pequeño [24].

Dadas las características de las velocidades medias del viento en términos de horas en un año, la distribución Weibull de dos parámetros, que lleva el nombre del matemático Waloddi Weibull (1887-1979) es la más frecuentemente utilizada para las variaciones de la velocidad del viento, aunque se han propuesto múltiples tipos de densidades [14].

La función de densidad de probabilidad (FDP) Weibull de dos parámetros y su función de distribución acumulada (FDA) están dadas por:

$$p_W(u) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{u}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{u}{\lambda}\right)^k}, \quad \forall u \geq 0 \quad (2.11)$$

$$F_W(u) = 1 - e^{-\left(\frac{u}{\lambda}\right)^k}, \quad \forall u \geq 0 \quad (2.12)$$

donde $\lambda, k > 0$, representan los parámetros de escala y forma, respectivamente de la distribución Weibull.

La media y la varianza de la distribución Weibull están dadas por:

$$\mu_W = \lambda \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right), \quad (2.13)$$

$$\sigma_W^2 = \lambda^2 \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \mu_W^2. \quad (2.14)$$

Donde $\Gamma(\cdot)$ es la función Gamma y está dada por:

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt. \quad (2.15)$$

Algunas propiedades de la distribución Weibull para diferentes valores de k son [31]:

- $k = 1$, la distribución Weibull se convierte en una distribución exponencial.
- $k = 2$, la distribución Weibull se convierte en una distribución Rayleigh.
- $k > 3$, la distribución Weibull se aproxima a una distribución Gaussiana.

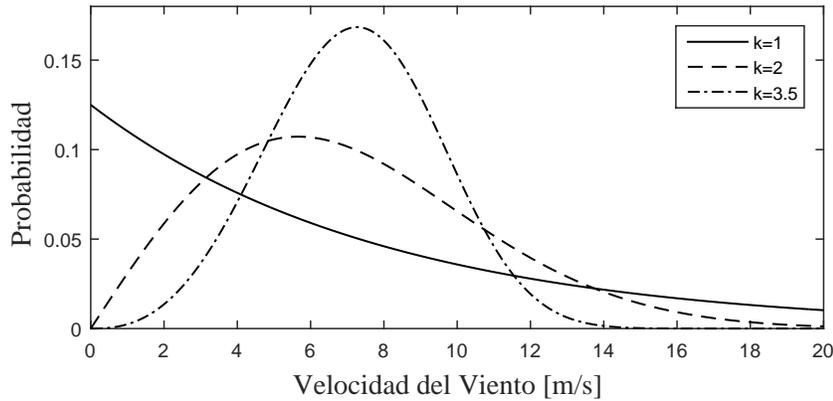


Figura 2.6: Función de densidad de probabilidad Weibull para $\lambda = 8$ m/s.

OBSERVACIÓN 2.1 Cuando u representa la velocidad media de viento, λ tiene las mismas unidades que u .

2.5. Turbulencia del viento

La turbulencia del viento se refiere a las fluctuaciones en la velocidad del viento en escalas de tiempo cortas, especialmente para la componente de velocidad horizontal. La velocidad del viento v en cualquier momento puede considerarse que tiene dos componentes: la velocidad media del viento \bar{v} y la fluctuación de velocidad instantánea v' , es decir [41, 58]:

$$v = \bar{v} + v'. \quad (2.16)$$

Se pueden identificar dos fuentes naturales de turbulencia [12, 58]:

- Mecánica. Es causada por la fricción con la superficie de la tierra y características topográficas como colinas y montañas, así como características más locales como árboles o edificios.
- Térmica. Es causada por diferencias de temperatura, por ejemplo, si el aire cerca del suelo es más cálido que a niveles más altos, y la temperatura disminuye relativamente rápido con la altura, el aire caliente se elevará hacia arriba y el viento horizontal se encontrará con el aire que se mueve en una dirección vertical, esto crea turbulencia.

A menudo estos efectos pueden estar interconectados. Es claro esperar una disminución de turbulencia a medida que aumenta la altura sobre el suelo ya que los efectos de los procesos impulsados por las interacciones en la superficie de la tierra se vuelven más débiles.

La intensidad de turbulencia es una medida general de turbulencia. La intensidad de turbulencia se define como [12, 41]:

$$I_v = \frac{\sigma_v}{\bar{v}}, \quad (2.17)$$

donde σ_v es la desviación estándar de las variaciones de la velocidad de viento y \bar{v} es la velocidad media del viento, lo anterior para un mismo periodo de tiempo. En la industria de la energía eólica el análisis de la intensidad de turbulencia típicamente se basa en observaciones de 10 minutos. En la ecuación (2.17) σ_v está dada por:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}. \quad (2.18)$$

Las variaciones de velocidad del viento turbulento pueden considerarse aproximadamente Gaussianas con desviación estándar σ_v , [12, 41]. La FDP Gaussiana para datos continuos en términos de las variables utilizadas aquí está dada por:

$$p_N(v) = \frac{1}{\sigma_v \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(v - \bar{v})^2}{2\sigma_v^2}}. \quad (2.19)$$

Normalmente, la desviación estándar de la velocidad del viento en una ubicación determinada aumenta más lentamente que la velocidad media del viento, en otras palabras, una mayor velocidad del viento en una ubicación dada generalmente va acompañada de una menor intensidad de turbulencia [69].

La turbulencia disminuye la posibilidad de usar la energía en el viento de forma efectiva ya que tiene un fuerte impacto en la fluctuación de la potencia de salida de la turbina eólica. La turbulencia también puede generar grandes cargas de fatiga que actúan sobre la turbina que reducen la vida útil esperada de la turbina o provocan la falla de la turbina [60, 69]. Por lo anterior, en la selección de sitios de parques eólicos, el conocimiento de la intensidad de turbulencia es de vital importancia para la estabilidad de la producción de energía eólica. La intensidad de turbulencia se usa para determinar la categoría de turbina apropiada para el sitio.

La norma IEC 61400-1 se puede considerar como el estándar de diseño de turbina eólica fundamental. Su objetivo es especificar “los requisitos de diseño para garantizar la integridad de la ingeniería de la turbina eólica [y]. . . para proporcionar un nivel adecuado de protección contra el daño de todos los peligros durante la vida útil planificada”, [41].

La IEC 61400-1 especifica tres categorías de turbinas A, B y C con valores de $I_{ref} = 0.16, 0.14$ y 0.12 , respectivamente. I_{ref} es la intensidad de turbulencia esperada a 15 m/s de velocidad del viento. En el modelo de turbulencia normal (MTN), la desviación estándar de la velocidad del viento se describe como [31]:

$$\sigma_v = I_{ref}(0.75\bar{v} + 5.6), \quad (2.20)$$

entonces

$$I_v = \frac{\sigma_v}{\bar{v}} = I_{ref}(0.75 + 5.6/\bar{v}). \quad (2.21)$$

En las figuras 2.7 y 2.8 muestra las gráficas del MTN representadas por las ecuaciones (2.20) y (2.21), para diferentes valores de I_{ref} .

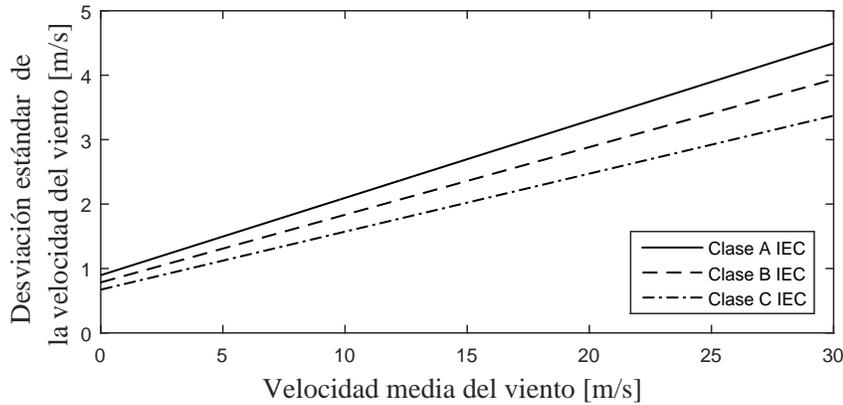


Figura 2.7: Desviación estándar de la turbulencia para el modelo de turbulencia normal (MTN).

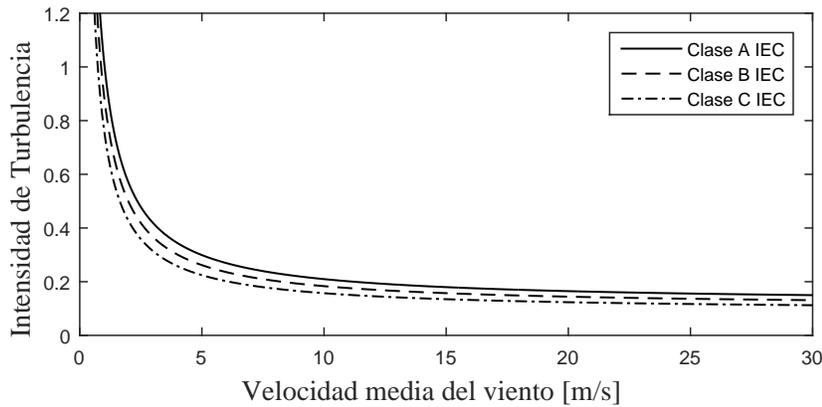


Figura 2.8: Intensidad de turbulencia para el modelo de turbulencia normal (MTN).

Capítulo 3

Cálculo Estocástico

3.1. Procesos de Markov

Un proceso estocástico se define como una familia de variables aleatorias $\{X_t, t \in T\}$, es decir, para cada t fijo X_t es una variable aleatoria definida en un espacio de probabilidad. El parámetro t generalmente representa el tiempo, por lo que X_t denota el valor asumido por la variable aleatoria en el tiempo t . T se denomina como el conjunto de índices o espacio parametral y es un subconjunto de $(-\infty, \infty)$. Si el conjunto de índices es discreto, entonces, $T = \{0, 1, 2, \dots\}$, de esta manera se tiene un proceso estocástico en tiempo discreto; de lo contrario, si T es continuo, $T = \{t : 0 \leq t < \infty\}$, entonces al proceso X_t se le llama un proceso estocástico en tiempo continuo. Los valores tomados por las variables aleatorias X_t se llaman estados. El conjunto de todos los estados posibles forma el espacio de estado del proceso, el cual puede ser discreto o continuo [55]. En el mundo real, los procesos estocásticos se consideran como una clase de modelos matemáticos que describen los fenómenos aleatorios que evolucionan en el tiempo.

Del otro lado, un proceso de Markov representa una clase especial de procesos estocásticos. Los procesos de Markov modelan fenómenos aleatorios en donde el estado futuro de un sistema dado depende únicamente del estado presente del sistema, es decir, el estado futuro del sistema es independiente del pasado. La siguiente definición proporciona una formalización matemática en términos probabilísticos del proceso [39]:

DEFINICIÓN 3.1 *Un proceso estocástico X_t es un proceso de Markov si el futuro del proceso dado el presente es independiente del pasado, es decir, si para tiempos arbitrarios $t_1 < t_2 < \dots < t_n < t_{n+1}$ se tiene:*

$$\mathbb{P}(X_{t_{n+1}} = x_{t_{n+1}} | X_{t_n} = x_{t_n}, \dots, X_{t_1} = x_{t_1}) = \mathbb{P}(X_{t_{n+1}} = x_{t_{n+1}} | X_{t_n} = x_{t_n})$$

3.2. Procesos estacionarios

En esta sección se introduce una clase de procesos estocásticos que se caracterizan por tener la propiedad de invarianza con respecto a una traslación en el tiempo. Resulta que muchos procesos estocásticos poseen esta propiedad que permite tener información valiosa respecto al comportamiento futuro del proceso. Esta clase de procesos se les llama procesos estacionarios, es decir, una observación del proceso estacionario en el intervalo de tiempo (t_0, t_1) tiene las mismas propiedades estadísticas de una observación del proceso en el intervalo de tiempo $(t_0 + \tau, t_1 + \tau)$ donde τ representa una traslación en el tiempo.

OBSERVACIÓN 3.1 *Desde un punto de vista estadístico, la estacionariedad afirma que las muestras del proceso no dependen del instante en que se tomaron las observaciones. En términos probabilísticos, esto significa que las probabilidades de las muestras tomadas en los momentos t_1, \dots, t_n son iguales a las tomadas en $t_1 + \tau, \dots, t_n + \tau$, [39].*

En esta sección la propiedad de estacionariedad se introduce mediante dos definiciones que caracterizarán a los procesos estocásticos que serán objeto de análisis en las siguientes secciones. Debido que un proceso estocástico es considerado como una familia de variables aleatorias, para estudiar su distribución de probabilidad, se requiere de la siguiente definición que también será de gran utilidad para definir la propiedad de estacionariedad.

DEFINICIÓN 3.2 *Se llaman distribuciones finito-dimensionales de un proceso estocástico X_t a las distribuciones de probabilidad del siguiente vector aleatorio:*

$$(X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_n})$$

para cualquier colección de t_1, t_2, \dots, t_n en T .

DEFINICIÓN 3.3 *Se dice que un proceso estocástico X_t es Gaussiano si todas sus distribuciones finito-dimensionales son Gaussianas.*

DEFINICIÓN 3.4 *Un proceso estocástico X_t , es estacionario en sentido estricto o estacionario si*

$$(X_{t_1}, \dots, X_{t_n}) \stackrel{d}{=} (X_{t_1+\tau}, \dots, X_{t_n+\tau}) \quad (3.1)$$

para cualquier $n \geq 1$, tiempos distintos $t_i, i = 1, \dots, n$, y cambio de tiempo τ .

DEFINICIÓN 3.5 *Se dice que un proceso estocástico es estacionario débil si satisface las siguientes propiedades:*

- El segundo momento del proceso X_t es finito, es decir, $\mathbb{E}[X_t^2] < \infty$.
- $\mathbb{E}[X_t] = \mu_t = \mu$, es decir, la media es independiente del tiempo.

- $Cov(X_s, X_t) = Cov(X_{s+\tau}, X_{t+\tau})$, es decir, la autocovarianza depende únicamente del retardo τ para todo $t \geq s$ en T .

OBSERVACIÓN 3.2

1. La estacionariedad se puede definir en varios grados, pero se reserva el término “proceso estacionario” para una definición estricta [26].
2. Las distribuciones finito-dimensionales son invariantes bajo una traslación en el tiempo.
3. Un proceso Gaussiano X_t que satisface la condición de la ecuación (3.1) se llama proceso Gaussiano estacionario.
4. Un proceso Gaussiano estacionario débil es estrictamente estacionario.
5. Un proceso estacionario con segundo momento finito es estacionario débil.

3.3. Procesos estacionarios débiles de Markov

En esta sección, considerando las definiciones de la sección anterior, se introducen propiedades de los procesos estacionarios débiles de Markov. En primer lugar estos procesos son Markovianos y cumplen con las características 3.1 y las propiedades de la definición 3.5, por lo tanto X_t tiene las siguientes propiedades:

- La media y la varianza

$$\mathbb{E}[X_t] = \mu_t = \mu, \quad (3.2)$$

y

$$Var[X_t] = \mathbb{E}[(X_t - \mu)^2] = \sigma_t^2 = \sigma^2. \quad (3.3)$$

Debido a la propiedad de la covarianza para los procesos estacionarios débiles se deduce que la varianza no depende de t .

- La autocovarianza y la autocorrelación

Además de la media y la varianza, otros parámetros importantes para el análisis de los procesos de Markov son la autocovarianza 3.4 y la autocorrelación 3.5. Para facilitar la notación se definen como sigue:

$$Cov(s, t) := Cov(X_s, X_t) = \mathbb{E}[(X_s - \mu_s)(X_t - \mu_t)], \quad (3.4)$$

$$Cor(s, t) := Cor(X_s, X_t) = \frac{\mathbb{E}[(X_s - \mu_s)(X_t - \mu_t)]}{\sqrt{Var(X_s)}\sqrt{Var(X_t)}}. \quad (3.5)$$

Se observa que para procesos de Markov estacionarios débiles, las ecuaciones (3.4) (3.5) solo dependen del tiempo de retardo $\tau = t - s$, por lo tanto la autocovarianza y la autocorrelación estarán dadas como sigue:

$$Cov(\tau) := \mathbb{E}[(X_{t-\tau} - \mu)(X_t - \mu)], \quad (3.6)$$

$$Cor(\tau) := \frac{\mathbb{E}[(X_{t-\tau} - \mu)(X_t - \mu)]}{\sigma^2}. \quad (3.7)$$

3.3.1. La Propiedad de regresión para procesos de Markov

En la teoría de los procesos estocásticos, el teorema de la regresión establece que los valores esperados de los procesos de Markov obedecen la ecuación de la evolución, es decir: [20, 68]:

$$\frac{d\mathbb{E}[X_t]}{dt} = -\alpha\mathbb{E}[X_t], \quad \alpha \in \mathbb{R}. \quad (3.8)$$

Lo cual implica que la solución de la ecuación (3.8) está dada por:

$$\mathbb{E}[X_t] = \mathbb{E}[X_0]e^{-\alpha t}. \quad (3.9)$$

Del otro lado y en estado estacionario, se deriva la ecuación (3.6) con respecto a τ . Entonces resulta que la función estacionaria de autocovarianza $Cov(\tau)$ satisface la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dCov(\tau)}{d\tau} = -\alpha Cov(\tau) \quad (3.10)$$

con la condición inicial $Cov(0) = \sigma^2$. Ahora procediendo de la misma manera que arriba se obtiene:

$$Cov(\tau) = Cov(0)e^{-\alpha\tau} = \sigma^2 e^{-\alpha\tau}. \quad (3.11)$$

OBSERVACIÓN 3.3

1. De la ecuación (3.7) se obtiene que la autocorrelación está dada como sigue:

$$Cor(\tau) = Cor(0)e^{-\alpha\tau}. \quad (3.12)$$

Debido a que los procesos de Markov considerados en este trabajo son estacionarios, el análisis de autocorrelación considera que $Cor(0) = 1$, un hecho que se adoptará a lo largo de todos los modelos presentados.

2. Las funciones $\mathbb{E}[X_t]$, $Cov(\tau)$ y $Cor(\tau)$ poseen la propiedad de decaimiento exponencial como lo muestran las expresiones (3.9), (3.11), (3.12).

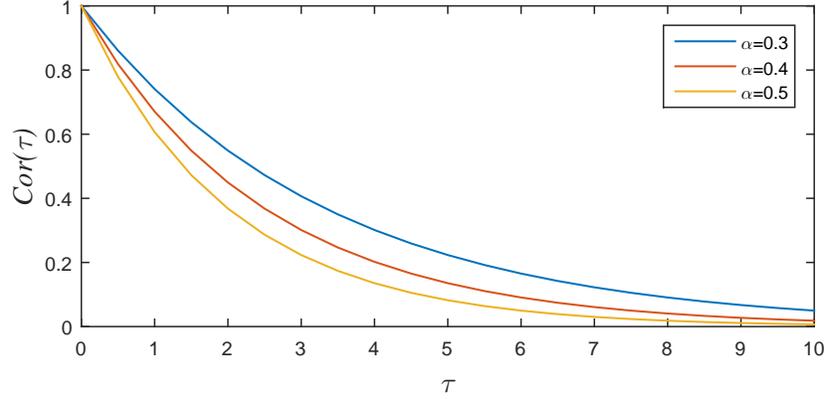


Figura 3.1: Gráfica de la expresión (3.12) para distintos valores de α .

En la siguiente sección se introduce un proceso estocástico de Markov Gaussiano y estacionario.

3.3.2. Proceso de Ornstein-Uhlenbeck

Esta sección está dedicada a estudiar las propiedades probabilísticas del llamado proceso de Ornstein-Uhlenbeck (OU), que es uno de los ingredientes importantes para el desarrollo de los modelos presentados en esta tesis. De acuerdo al apéndice A una ecuación diferencial estocástica está dada por (A.5) como sigue:

$$dX_t = a(t, X_t)dt + b(t, X_t)dW_t$$

si $a(t, X_t) = -\alpha X_t$ y $b(t, X_t) = \theta$ donde α y θ son dos constantes positivas, entonces el proceso de OU se define como la solución de la siguiente ecuación diferencial estocástica:

$$dX_t = -\alpha X_t dt + \theta dW_t \quad (3.13)$$

con condición inicial X_0 . $-\alpha X_t$ y θ son el término de deriva y volatilidad respectivamente (véase apéndice A).

Para resolver la EDE (3.13), se considera la función:

$$\begin{aligned} f : [0, \infty) \times \mathbb{R} &\longrightarrow \mathbb{R} \\ (t, x) &\longmapsto x e^{\alpha t}. \end{aligned}$$

Se observa que las derivadas parciales de f están dadas por:

$$\frac{\partial f}{\partial t}(t, x) = \alpha x e^{\alpha t}, \quad \frac{\partial f}{\partial x}(t, x) = e^{\alpha t} \text{ y } \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(t, x) = 0. \quad (3.14)$$

Ahora definiendo el proceso estocástico Y_t mediante la siguiente transformación:

$$Y_t = f(t, X_t) = X_t e^{\alpha t}, \quad (3.15)$$

y aplicando la fórmula de Itô (A.7) y las ecuaciones (3.14) se obtiene lo siguiente:

$$dY_t = \alpha e^{\alpha X_t} X_t dt + e^{\alpha t} dX_t. \quad (3.16)$$

Ahora sustituyendo la ecuación (3.13) en la ecuación anterior se obtiene:

$$dY_t = \alpha e^{\alpha t} X_t dt + e^{\alpha t} (-\alpha X_t dt + \theta dW_t), \quad (3.17)$$

entonces

$$dY_t = \theta e^{\alpha t} dW_t. \quad (3.18)$$

La solución de la ecuación estocástica (3.18) admite la siguiente representación integral:

$$Y_t = X_0 + \theta \int_0^t e^{\alpha s} dW_s. \quad (3.19)$$

Ahora utilizando la transformación (3.15) y despejando se obtiene el proceso de OU:

$$X_t = X_0 e^{-\alpha t} + \theta \int_0^t e^{-\alpha(t-s)} dW_s. \quad (3.20)$$

Ahora utilizando las propiedades de la integral estocástica [45, 20], el proceso de Ornstein-Uhlenbeck está caracterizado por las siguientes propiedades:

- Esperanza

$$\mathbb{E}[X_t] = X_0 e^{-\alpha t}. \quad (3.21)$$

- Varianza

$$\text{Var}[X_t] = \frac{\theta^2}{2\alpha} (1 - e^{-2\alpha t}). \quad (3.22)$$

- Autocovarianza

$$\text{Cov}(\tau) = \frac{\theta^2}{2\alpha} (e^{-\alpha\tau} - e^{-\alpha(2t-\tau)}). \quad (3.23)$$

OBSERVACIÓN 3.4

1. De las ecuaciones (3.21)-(3.23), es fácil de observar que cuando $t \rightarrow \infty$, se tiene

$$\mathbb{E}[X_t] \rightarrow 0 \quad \text{y} \quad \text{Var}[X_t] \rightarrow \frac{\theta^2}{2\alpha} \quad (3.24)$$

lo último justifica que el proceso de OU (3.13) es estacionario en el límite.

2. La función de autocovarianza tiene la siguiente propiedad en el límite:

$$\text{Cov}(\tau) \longrightarrow \frac{\theta^2}{2\alpha} e^{-\alpha\tau}, \quad (3.25)$$

por lo tanto la autocorrelación estacionaria está dada por:

$$\text{Cor}(\tau) = e^{-\alpha\tau}. \quad (3.26)$$

3. El proceso de OU representa la forma más general de un proceso estacionario de Markov Guassiano [62].

3.3.3. Ecuación de Fokker-Planck

La ecuación de Fokker-Planck es una ecuación diferencial parcial que modela la densidad de probabilidad de un proceso estocástico. Desde su introducción por Fokker y Planck para modelar el movimiento Browniano de las partículas, se le han encontrado varias aplicaciones en teoría de circuitos, física entre otras ramas de la ciencia. Para más detalles sobre la ecuación de Fokker-Planck véase [2, 50].

Ahora para derivar la ecuación de Fokker-Planck se utilizan argumentos del cálculo estocástico. Se Considera la forma general de una ecuación diferencial estocástica (A.5) y sea f una función de clase $C^2(\mathbb{R})$, aplicando la fórmula de Itô dada por (A.7) a $f(X_t)$ se tiene:

$$df(X_t) = \frac{\partial f(X_t)}{\partial x} (a(t, X_t)dt + b(t, X_t)dW_t) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f(X_t)}{\partial x^2} b^2(t, X_t)dt, \quad (3.27)$$

entonces

$$df(X_t) = \left(\frac{\partial f(X_t)}{\partial x} a(t, X_t) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f(X_t)}{\partial x^2} b^2(t, X_t) \right) dt + \frac{\partial f(X_t)}{\partial x} b(t, X_t) dW_t. \quad (3.28)$$

Se sabe que el valor esperado de una integral estocástica es igual a cero, entonces:

$$\mathbb{E} \left[\int_0^t \frac{\partial f(X_s)}{\partial x} dW_s \right] = 0, \quad (3.29)$$

por lo tanto, la ecuación (3.28) queda como sigue:

$$\frac{d\mathbb{E}(f(X_t))}{dt} = \mathbb{E} \left[\frac{\partial f(X_t)}{\partial x} a(t, X_t) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f(X_t)}{\partial x^2} b^2(t, X_t) \right]. \quad (3.30)$$

De acuerdo a las condiciones del teorema (A.1) la solución de la EDE (A.5) X_t existe, entonces sea $p(t, x)$ su densidad de probabilidad. Ahora expresando ambos lados de la

ecuación (3.30) utilizando la función de densidad $p(t, x)$, la ecuación (3.30) queda como sigue:

$$\frac{d\mathbb{E}(f(X_t))}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{\infty} p(t, x) f(x) dx \quad (3.31)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{\infty} p(t, x) f(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} p(t, x) \left[\frac{\partial f(x)}{\partial x} a(t, x) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} b^2(t, x) \right] dx. \quad (3.32)$$

Aplicando la fórmula de integración por partes se obtiene:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) \left[\frac{\partial p(t, x)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [a(t, x)p(t, x)] - \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} [b^2(t, x)p(t, x)] \right] dx = 0. \quad (3.33)$$

Como la ecuación anterior es válida para cualquier $f \in C^2(\mathbb{R})$, entonces se puede deducir que:

$$\frac{\partial p(t, x)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} [a(t, x)p(t, x)] + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} [b^2(t, x)p(t, x)] \quad (3.34)$$

con una condición inicial $p(0, x) = p_0(x)$. La ecuación (3.34) se conoce como la ecuación diferencial parcial de Fokker-Planck o la ecuación de Kolmogorov hacia adelante.

3.4. Transformaciones sin memoria

En esta sección se introduce un método para generar procesos de difusión con distribuciones marginales específicas. Este método está basado en las transformaciones sin memoria, estas últimas se definen como sigue:

DEFINICIÓN 3.6 [25] *Se considera un proceso estocástico Gaussiano X_t y $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, una función real y sea Y_t dado por $Y_t = g(X_t)$ un proceso estocástico. Se dice que g es una transformación sin memoria si el valor de Y_t en un instante arbitrario t depende solo del valor de X_t en t .*

OBSERVACIÓN 3.5

1. Si g es una transformación lineal entonces Y_t es un proceso Gaussiano.
2. Como X_t es un proceso Gaussiano, entonces Y_t se define por las funciones de media y covarianza, y la transformación g .
3. Y_t es un proceso estacionario si X_t es estacionario

Sea X_t es un proceso Gaussiano con media cero y varianza 1 y sea g una transformación sin memoria dada por $g = F^{-1}(\Phi(\cdot))$ donde F es una función de distribución acumulada arbitraria y Φ denota la función de distribución acumulada de $\mathcal{N}(0,1)$. El proceso Y_t queda como sigue:

$$Y_t = F^{-1}(\Phi(X_t)) \quad (3.35)$$

se le llama proceso de traslación, [25, 26, 27]. Se puede observar que la función de distribución acumulada de Y_t está dada por F como lo muestra el siguiente argumento:

$$\begin{aligned} F_Y(y) &= \mathbb{P}(Y_t \leq y) \\ &= \mathbb{P}(F^{-1}(\Phi(X_t)) \leq y) \\ &= \mathbb{P}(X_t \leq \Phi^{-1}(F(y))) \\ &= F_X(\Phi^{-1}(F(y))) = \Phi(\Phi^{-1}(F(y))) \\ &= F(y). \end{aligned}$$

OBSERVACIÓN 3.6 *La transformación sin memoria no garantiza que la autocorrelación de Y_t sea igual que la autocorrelación del proceso original X_t definida por (3.26), [66, 67].*

3.5. Simulación Numérica de la EDE

Las ecuaciones diferenciales estocásticas en general no tienen una solución explícita, este hecho, motiva la implementación de esquemas numéricos que son aproximaciones a la solución exacta de la EDE. La siguiente sección describe un método numérico basado en el esquema implícito de Milstein.

3.5.1. Métodos Implícitos

Se considera el proceso estocástico X_t descrito por la EDE:

$$dX_t = a(t, X_t)dt + b(t, X_t) dW_t. \quad (3.36)$$

Para obtener la solución numérica de la EDE (3.36) se tienen que realizar una serie de pasos:

- **Discretización del dominio**

El proceso estocástico X_t evoluciona en un dominio de tiempo $D := [0, T_f]$ donde T_f es el tiempo máximo (T_f se fija por razones de estabilidad y convergencia). La discretización de D se realiza como sigue:

$$0 = t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n < t_N = T_f,$$

con un tamaño de paso $h = t_{n+1} - t_n = T/N$ para un número entero N y $n = 1, 2, \dots, N - 1$.

• **Aproximación de la solución**

Después de discretizar el dominio se consideran los valores del proceso estocástico X_t en los puntos discretizados, es decir, $X_n := X(t_n)$. Aproximando las diferenciales en (3.36), la solución numérica queda como sigue:

$$X_{n+1} = X_n + a(t_n, X_n)h + b(t_n, X_n)\Delta W_n, \quad (3.37)$$

donde

$$\Delta W_n = W_{t_{n+1}} - W_{t_n},$$

representa el incremento del movimiento Browniano. De la definición A.1 del apéndice A, se sabe que ΔW_n tiene distribución $\mathcal{N}(0, \sqrt{h})$. El esquema numérico discreto por la ecuación (3.37) se conoce como el método estocástico de Euler ó el método de Euler-Maruyama, para más detalles sobre este esquema véase el apéndice A.

Ahora en lugar de utilizar la aproximación $b(t_n, X_n)\Delta W_n$ en (3.37), se propone la siguiente aproximación [35]:

$$b(t_n, X_n)\Delta W_n + \frac{1}{2}b(t_n, X_n)\frac{\partial b}{\partial x}(t_n, X_n)((\Delta W_n)^2 - h), \quad (3.38)$$

entonces se obtiene el esquema explícito de Milstein descrito como sigue:

$$X_{n+1} = X_n + a(t_n, X_n)h + b(t_n, X_n)\Delta W_n + \frac{1}{2}b(t_n, X_n)\frac{\partial b}{\partial x}(t_n, X_n)((\Delta W_n)^2 - h). \quad (3.39)$$

Cuando los coeficientes de la EDE satisfacen las condiciones del Teorema A.1 del apéndice A, se observan las siguientes propiedades de los esquemas numéricos descritos arriba

OBSERVACIÓN 3.7

1. *El esquema de Milstein(3.39) converge con el orden fuerte de $\gamma = 1.0$, el cual se considera una mejora al orden fuerte de $\gamma = \frac{1}{2}$ del esquema estocástico de Euler (3.36),[15].*
2. *Para la convergencia débil, los esquemas de Euler como Milstein tienen un orden débil de $\beta = 1.0$, por lo tanto, no hay ninguna mejora en la velocidad de convergencia [15].*
3. *Cuando el ruido en la EDE (3.36) es aditivo, es decir, $\frac{\partial b}{\partial x}(t, x) = 0$, se observa que los esquemas estocásticos de Euler y Milstein coinciden [15].*

Continuando con la presentación de los esquemas numéricos implícitos, se considera una clase más general llamada esquemas implícitos con grado ψ . El esquema implícito más simple es el esquema implícito de Euler descrito a continuación:

$$X_{n+1} = X_n + \{\psi a(t_{n+1}, X_{n+1}) + (1 - \psi)a(t_n, X_n)\}\Delta + b(t_n, X_n)\Delta W_n. \quad (3.40)$$

El esquema implícito de Milstein con grado ψ es una generalización del esquema implícito de Euler (3.40) y está definido como sigue:

$$\begin{aligned} X_{n+1} = X_n + & \left(\psi a(t_{n+1}, X_{n+1}) + (1 - \psi)a(t_n, X_n) \right) h + b(t_n, X_n)\Delta W_n \\ & + \frac{1}{2}b(t_n, X_n)\frac{\partial b}{\partial x}(t_n, X_n) (\Delta W_n)^2 - h, \end{aligned} \quad (3.41)$$

donde $\psi \in [0, 1]$ denota el grado de implícidad.

OBSERVACIÓN 3.8

1. Para llevar a cabo el esquema implícito de Milstein, es necesario resolver una ecuación algebraica adicional en cada iteración. Este último se realiza con el método de Newton-Raphson.
2. Para $\psi = 0$, el esquema numérico dado por (3.41) se reduce al esquema de Milstein explícito (3.39).
3. Para $\psi = 1$, el esquema numérico dado por (3.41) es completamente implícito.
4. Para $\psi = 0.5$ en (3.39), el esquema implícito de Milstein se considera como una generalización del método trapezoidal determinista. Para más detalles sobre los métodos implícitos véase [15, 34, 35].

Capítulo 4

Desarrollo de los Modelos

El presente capítulo está dedicado a la descripción y el desarrollo de los modelos de velocidades de viento basados en ecuaciones diferenciales estocásticas.

Se desarrollan tres modelos, dos en escala de horas, planteados en [66, 67] y [68], y se propone y desarrolla un modelo de velocidades de viento en escala de segundos.

Dichos modelos son capaces de simular trayectorias de velocidades de viento con propiedades estadísticas similares a las observadas en datos históricos disponibles para una ubicación geográfica, para la escala de tiempo para la cual están diseñados.

Es importante mencionar que los resultados reportados en el capítulo 5 se derivan de los modelos que se describirán en las siguientes secciones.

4.1. Modelos de velocidad de viento en escala de horas

4.1.1. Modelo I

El modelo I considera el proceso de Ornstein-Uhlenbeck (3.20) con $\theta = \sqrt{2\alpha}$, es decir:

$$dX_t = -\alpha X_t dt + \sqrt{2\alpha} dW_t. \quad (4.1)$$

Con esta consideración el proceso de OU es un proceso estacionario Gaussiano con distribución de probabilidad $\mathcal{N}(0, 1)$ y autocorrelación exponencial que depende únicamente del retardo.

Posteriormente, a la solución de (4.1) se le aplica una transformación sin memoria del tipo (3.35)

$$Y_t = F_D^{-1}(\Phi(X_t)), \quad (4.2)$$

donde $\Phi(\cdot)$ es la FDA de la distribución $\mathcal{N}(0, 1)$, y $F_D(\cdot)$ es el FDA de la distribución deseada dada.

- **Esquema Numérico**

Es necesario utilizar técnicas de integración numérica para dar solución a la EDE (4.1). En este trabajo se aplica el esquema implícito de Milstein a (4.1) con $\psi = 0.5$:

$$X_{n+1} = X_n + \frac{h}{2}(-\alpha X_{n+1} - \alpha X_n) + \sqrt{2\alpha}\Delta W_n, \quad (4.3)$$

donde h es el paso del tiempo de integración, y $\Delta W \sim \mathcal{N}(0, \sqrt{h})$ son incrementos aleatorios del proceso de Wiener.

Particularmente, para este caso, $F_D = F_W$ y está dada por (2.12). Finalmente:

$$Y_n = F_D^{-1}(\Phi(X_n)) \text{ para todo } n = 1, \dots, N. \quad (4.4)$$

OBSERVACIÓN 4.1

1. *Para llevar a cabo la simulación numérica del modelo I, se considera es una EDE y una ecuación algebraica.*
2. *Debido a que no existen resultados analíticos que garantizan la propiedad de autocorrelación exponencial, esta última se analiza numéricamente.*

4.1.2. Modelo II

El modelo II se basa en la ecuación de Fokker-Planck (3.34) como un modelo para la densidad de probabilidad de X_t . Debido a que el proceso de OU es estacionario entonces, la ecuación de Fokker-Planck se reduce a la siguiente representación:

$$-\frac{\partial}{\partial x}[a(X_t)p(X_t)] + \frac{1}{2}\frac{\partial^2}{\partial x^2}[b^2(X_t)p(X_t)] = 0. \quad (4.5)$$

La metodología basada en la Ecuación de Fokker-Planck consiste en encontrar una EDE mediante la cual se pueden generar trayectorias que son exponencialmente autocorrelacionadas, además las propiedades estadísticas de estas trayectorias siguen una distribución de probabilidad dada (Weibull). Para llevar a cabo esta tarea, se aplican argumentos analíticos a la ecuación de Fokker-Planck con la finalidad de encontrar los términos de deriva y volatilidad, mediante los cuales las trayectorias del proceso X_t poseen la distribución de probabilidad deseada.

Ahora supóngase que la ecuación (4.5) satisface las siguientes condiciones [26]:

$$\begin{aligned}
\lim_{|X_t| \rightarrow \infty} [a(X_t)p(X_t)] &= 0 \\
\lim_{|X_t| \rightarrow \infty} [b^2(X_t)p(X_t)] &= 0 \\
\lim_{|X_t| \rightarrow \infty} \left[\frac{\partial}{\partial x} [b^2(X_t)p(X_t)] \right] &= 0
\end{aligned} \tag{4.6}$$

Observamos que la ecuación (4.5) se puede reescribir como sigue:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[-a(X_t)p(X_t) + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} [b^2(X_t)p(X_t)] \right] = 0, \tag{4.7}$$

además

$$-a(X_t)p(X_t) + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} [b^2(X_t)p(X_t)] = C, \tag{4.8}$$

donde la constante C es igual a cero de acuerdo a las condiciones dadas por (4.6).

Para encontrar la función de deriva $a(X_t)$ y la función de volatilidad $b(X_t)$ se procede como sigue:

- **Función de deriva**

Se resuelve la ecuación (4.8) considerando a $a(X_t)$ como la variable dependiente:

$$-a(X_t)p(X_t) + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} [b^2(X_t)p(X_t)] = 0. \tag{4.9}$$

Realizando la derivada parcial en (4.9) y dividiendo entre $p(X_t)$ se obtiene:

$$a(X_t) = b(X_t) \frac{\partial b(X_t)}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{b^2(X_t)}{p(X_t)} \frac{\partial p(X_t)}{\partial x}, \tag{4.10}$$

por lo tanto la función de deriva $a(X_t)$ se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$a(X_t) = b(X_t) \frac{\partial b(X_t)}{\partial x} + \frac{1}{2} b^2(X_t) \frac{\partial \ln(p(X_t))}{\partial x}. \tag{4.11}$$

- **Función de volatilidad**

Para encontrar la función de volatilidad $b(X_t)$ se reescribe la ecuación (4.8) como sigue:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} [b^2(X_t)p(X_t)] = a(X_t)p(X_t). \tag{4.12}$$

Mediante un proceso de integración, la ecuación (4.12) queda resuelta para la variable dependiente $b(X_t)$ como sigue:

$$b(X_t) = \sqrt{\frac{2}{p(X_t)} \int_{-\infty}^{X_t} a(Z_s)p(Z_s)dZ_s}, \quad (4.13)$$

donde Z_s tiene la misma trayectoria que X_t para $0 \leq s \leq t$.

OBSERVACIÓN 4.2

1. *El procedimiento descrito arriba muestra que en la primera etapa se obtiene la función de deriva que garantiza la propiedad de decaimiento exponencial de la autocorrelación, con un coeficiente de decaimiento fijo. En la segunda etapa se obtiene la función de volatilidad para una función de densidad de probabilidad $p(X_t)$ dada.*
2. *El caso $p(X_t) = 0$ se reduce al caso $b(X_t) = 0$, es decir, una ecuación diferencial determinista, para más detalles sobre el análisis de este caso véase [67].*

La siguiente sección está dedicada a encontrar representaciones explícitas para la función de deriva y la función de volatilidad.

4.1.3. Representaciones Explícitas

Para encontrar la función de deriva deseada y la función de volatilidad objeto de la presente tesis, se implementa el procedimiento descrito arriba.

- **Representación explícita de la deriva**

Se aplica la fórmula de Itô (A.7) al siguiente proceso estocástico:

$$Y_t = f(X_t) = (X_s - \mu)(X_t - \mu) \text{ con } s < t, \quad (4.14)$$

con f una función de clase $C^2(\mathbb{R})$. Calculando las derivadas parciales de f y utilizando el hecho de que X_t es de Markov:

$$\frac{\partial f(X_t)}{\partial x} = (X_s - \mu), \quad \frac{\partial^2 f(X_t)}{\partial x^2} = 0. \quad (4.15)$$

La fórmula de Itô se reduce a lo siguiente:

$$dY_t = (X_s - \mu)[a(X_t)dt + b(X_t)dW_t], \quad (4.16)$$

con una condición inicial $(X_s - \mu)^2$, pues se está suponiendo que el proceso se está empezando al instante s .

Integrando la ecuación (4.16) de s a t y aplicando el valor esperado a ambos lados de la ecuación utilizando el hecho de que el valor esperado de una integral estocástica es igual a cero se obtiene lo siguiente:

$$\mathbb{E}[Y_t] = \mathbb{E}[(X_s - \mu)(X_t - \mu)] = \mathbb{E}[(X_s - \mu)^2] + \int_s^t \mathbb{E}[a(X_u)(X_s - \mu)] du. \quad (4.17)$$

Se observa que el término del lado izquierdo de la ecuación (4.17) representa la función de autocovarianza.

$$\frac{d\mathbb{E}[(X_s - \mu)(X_t - \mu)]}{dt} = \mathbb{E}[a(X_t)(X_s - \mu)]. \quad (4.18)$$

Utilizando las propiedades de regresión de los procesos de Markov desarrolladas en la sección 3.3.1, es natural proponer la siguiente representación cerrada para la deriva $a(X_t)$:

$$a(X_t) = -\alpha(X_t - \mu) \quad (4.19)$$

y finalmente (4.18) se puede expresar como sigue:

$$\frac{dCov(s, t)}{dt} = -\alpha Cov(s, t). \quad (4.20)$$

Ahora después de sustituir la expresión (4.19) en la EDE (A.8) se obtiene:

$$X_t = X_0 + \int_0^t -\alpha(X_u - \mu)du + \int_0^t b(X_u)dW_u. \quad (4.21)$$

Aplicando el operador esperanza a ambos lados de la ecuación (4.21), y teniendo en cuenta que la esperanza de una integral estocástica de Itô es cero, se obtiene

$$\mathbb{E}[X_t] = \mathbb{E}[X_0] + \int_0^t -\alpha\mathbb{E}[(X_u - \mu)]du \quad (4.22)$$

la cual queda en forma diferencial como sigue:

$$\frac{d\mathbb{E}[X_t]}{dt} = -\alpha\mathbb{E}[X_t] + \alpha\mu. \quad (4.23)$$

Para modelar un proceso estocástico estacionario con la función de distribución de probabilidad dada por $p(X_t)$ y una autocorrelación exponencial, una condición suficiente es representar la función de deriva en la siguiente forma:

$$a(X_t) = -\alpha(X_t - \mu). \quad (4.24)$$

- **Representación explícita de la volatilidad**

Ahora para encontrar la función de volatilidad $b(X_t)$, se utilizan las ecuaciones (4.13) y (4.24) por lo tanto:

$$b(X_t) = \sqrt{\frac{-2}{p(X_t)} \int_{-\infty}^{X_t} \alpha(Z_s - \mu) p(Z_s) dZ_s}. \quad (4.25)$$

Considerando el caso particular en dónde la distribución de probabilidad $p(\cdot)$ es de Weibull (2.13) con media μ_W dada por la expresión (2.13), el Modelo II desarrollado en esta sección tiene los siguientes parámetros:

$$a(X_t) = -\alpha(X_t - \mu_W) \quad (4.26)$$

Al sustituir (2.11) y (4.26) en (4.25) se obtiene la siguiente expresión para $b(X_t)$:

$$b(X_t) = \sqrt{\frac{-2\alpha}{\frac{k}{\lambda} \left(\frac{X_t}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{X_t}{\lambda}\right)^k}} \int_0^{X_t} \left(Z_s - \lambda \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right) \frac{k}{\lambda} \left(\frac{Z_s}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{Z_s}{\lambda}\right)^k} dZ_s}. \quad (4.27)$$

Se puede observar que la ecuación (4.27) se puede representar como:

$$b(X_t) = \sqrt{b_1(X_t) b_2(X_t)} \quad (4.28)$$

donde:

$$b_1(X_t) = \frac{2\alpha}{\frac{k}{\lambda} \left(\frac{X_t}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{X_t}{\lambda}\right)^k}} \quad (4.29)$$

y

$$b_2(X_t) = -\frac{k}{\lambda^k} \int_0^{X_t} \left(Z_s - \lambda \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right) Z_s^{k-1} e^{-\left(\frac{Z_s}{\lambda}\right)^k} dZ_s \quad (4.30)$$

Utilizando integraciones por partes (véase apéndice A), se obtiene una expresión cerrada para la función de volatilidad:

$$b_2(X_t) = \left(X_t - \lambda \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right) e^{-\left(\frac{X_t}{\lambda}\right)^k} + \frac{\lambda \Gamma\left(\frac{1}{k}, \left(\frac{X_t}{\lambda}\right)^k\right)}{k}, \quad (4.31)$$

donde $\Gamma(\cdot, \cdot)$ es la función Gamma Incompleta (véase apéndice A).

- **Esquema numérico**

La última etapa en el desarrollo del modelo II y de igual forma que en el caso del modelo I, para obtener las trayectorias de velocidad del viento es necesario utilizar técnicas de integración numérica mediante la implementación del esquema implícito de Milstein a (3.41) con $\psi = 0.5$ y con términos de deriva y volatilidad (4.26) y (4.28) respectivamente y considerando que el la propiedad de estacionariedad, se obtiene lo siguiente:

$$X_{n+1} = X_n + \frac{h}{2}(a(X_{n+1}) + a(X_n)) + b(X_n)\Delta W + \frac{1}{2}b(X_n)\frac{\partial b(X_n)}{\partial X_t}((\Delta W)^2 - h), \quad (4.32)$$

en donde la función de deriva y la función de volatilidad quedan discretizadas como sigue:

$$a(X_n) = -\alpha(X_n - \mu_W), \quad (4.33)$$

$$b_1(X_n) = \frac{2\alpha}{\frac{k}{\lambda} \left(\frac{X_n}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{X_n}{\lambda}\right)^k}}, \quad (4.34)$$

$$b_2(X_n) = \left(X_n - \lambda\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right) e^{-\left(\frac{X_n}{\lambda}\right)^k} + \frac{\lambda\Gamma\left(\frac{1}{k}, \left(\frac{X_n}{\lambda}\right)^k\right)}{k}, \quad (4.35)$$

y

$$b(X_n) = \sqrt{b_1(X_n)b_2(X_n)}. \quad (4.36)$$

4.2. Modelo de velocidad de viento en escala de segundos

En esta sección se desarrolla un modelo de velocidad de viento en una escala de segundo. Motivados por una metodología publicada en [46], que consiste en modelar la carga de un sistema eléctrico de potencia (Suecia) mediante el proceso de OU, se adopta la metodología antes mencionada para construir diferentes esquemas numéricos para modelar la velocidad de viento, lo cual se realiza para cuatro escenarios de la intensidad de turbulencia I_v y la velocidad media del viento \bar{v} .

La metodología propuesta para modelar las velocidades de viento en una escala de segundos se describe como sigue:

- El proceso estocástico Y_t es el modelo matemático de las velocidades de viento en segundos y se construye como el resultado de una perturbación de las velocidades de viento por el proceso de OU X_t (3.20):

$$Y_t = m_t + X_t \quad (4.37)$$

m_t es una función a pedazos construida a partir de mediciones reales de velocidades medias de viento en cada diez minutos.

- Los parámetros de deriva y volatilidad de X_t se obtienen para cada periodo de simulación como sigue;

$$I_v \bar{v} = \frac{\theta}{\sqrt{2\alpha}} \quad (4.38)$$

donde \bar{v} es la media de cada par de mediciones de velocidad de viento utilizadas para construir m_t y I_v está dada por (2.21).

Ahora, de acuerdo a las ecuaciones (3.41) y (4.38) se tienen los siguientes cuatro esquemas numéricos para modelar X_t como lo muestra la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Esquemas Numéricos

Número	θ	α	X_{n+1}
I	I_v	$\frac{1}{2\bar{v}^2}$	$X_n + \frac{h}{2} \left(-\frac{1}{2\bar{v}^2} X_{n+1} - \frac{1}{2\bar{v}^2} X_n \right) + I_v \Delta W_n$
II	\bar{v}	$\frac{1}{2I_v^2}$	$X_n + \frac{h}{2} \left(-\frac{1}{2I_v^2} X_{n+1} - \frac{1}{2I_v^2} X_n \right) + \bar{v} \Delta W_n$
III	$I_v \bar{v}$	0.5	$X_n + \frac{h}{2} (-0.5 X_{n+1} - 0.5 X_n) + I_v \bar{v} \Delta W_n$
IV	1	$\frac{1}{2(I_v \bar{v})^2}$	$X_n + \frac{h}{2} \left(-\frac{1}{2(I_v \bar{v})^2} X_{n+1} - \frac{1}{2(I_v \bar{v})^2} X_n \right) + \Delta W_n$

Finalmente, se obtiene la velocidad de viento para cada caso descrito en la Tabla 4.1:

$$Y_n = m_n + X_n \text{ para todo } n = 1, \dots, N. \quad (4.39)$$

OBSERVACIÓN 4.3

1. El modelo descrito arriba se construye para cada periodo de simulación no mayor a 600 segundos (10 minutos) debido a que este es el tiempo típico en el que se hace el análisis de la turbulencia de viento.
2. En el contexto de la ecuación (2.16), m_t representa la función de velocidad media y el proceso X_t representa la fluctuación instantánea de la velocidad de viento v' .

Capítulo 5

Resultados

5.1. Modelos de velocidad de viento en escala de horas

Los modelos propuestos en la sección 4.1 son utilizados para modelar la velocidad de viento de dos ubicaciones. Tales ubicaciones son Santo Domingo Ingenio, Oaxaca donde se encuentra ubicado el parque eólico llamado Oaxaca I (a partir de ahora denominada OAU) y Juchitán de Zaragoza, Oaxaca donde se encuentra ubicado el parque eólico llamado Eurús (a partir de ahora denominada EUR).

Los datos fueron proporcionados por el Centro Nacional de Control de la Energía (CENACE) y consisten de 4416 valores que pertenecen al promedio de velocidad de viento de cada hora de los meses de marzo a agosto de 2017 de cada ubicación.

5.1.1. Análisis y ajuste de datos

En esta sección se describe el procedimiento realizado para el análisis de los datos y la obtención de los parámetros de ajuste a los datos de cada ubicación.

Para el análisis de los datos de velocidades de viento proporcionados por el CENACE, primeramente, se lleva a cabo la construcción de un histograma normalizado de dichos datos. Un histograma normalizado es la representación gráfica de la probabilidad de una variable mediante barras, donde el tamaño de las barras es proporcional a la probabilidad de la variable representada. El histograma normalizado de cada ubicación, se construye mediante la siguiente expresión:

$$\mathbb{P}(\bar{v}_i) = \frac{\#\bar{v}_i}{M}, \quad (5.1)$$

donde $\#\bar{v}_i$ es el número de registros de velocidades de viento entre cada intervalo de velocidad $(i - 1, i]$ con $i \in \mathbb{N}$, M es el número de muestras totales, en este caso $M = 4416$

y $\mathbb{P}(\bar{v}_i)$ es la probabilidad de que las muestras se encuentran en dicho intervalo.

En segundo lugar se obtiene la autocorrelación de los datos de velocidades de viento por medio de la ecuación (3.7).

Por otro lado, para obtener los parámetros de ajuste de los datos de velocidad de viento, se utilizó el software Easyfit® 5.5 (el cual realiza pruebas de bondad de ajuste, véase Apéndice B, [18, 63]) y se encontró que ambos conjuntos de datos siguen una FDP Weibull.

En lo que al ajuste de la autocorrelación se refiere, se realizó un ajuste de curva (apéndice B, [64]).

• Caso de estudio OAU

En la tabla 5.1 se muestran los valores de los parámetros de la distribución Weibull obtenidos en el proceso de bondad de ajuste y el coeficiente de autocorrelación obtenido del ajuste exponencial para el caso de estudio OAU.

Tabla 5.1: Parámetros de ajuste para los datos de velocidad de viento OAU.

Ubicación	λ	k	α
OAU	6.751262	1.821892	0.0274

La figura 5.1 muestra el histograma normalizado del conjunto de datos OAU y la distribución Weibull a la que se ajustaron los datos.

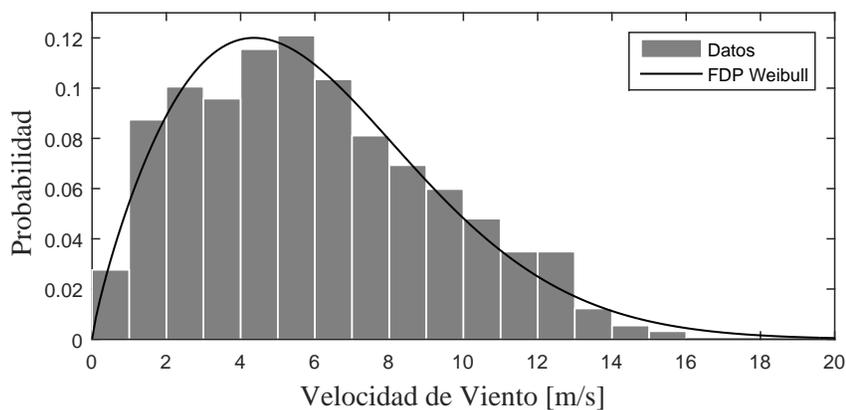


Figura 5.1: Densidad de probabilidad de los datos horarios de velocidad media del viento de OAU y densidad de probabilidad de ajuste.

La figura 5.2 muestra la autocorrelación del conjunto de datos OAU para retardos de tiempo de hasta 84 horas y el ajuste exponencial según la expresión (3.26).

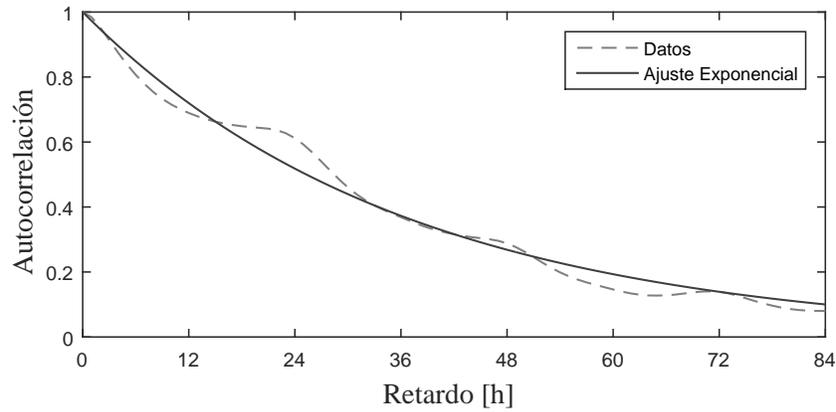


Figura 5.2: Autocorrelación de los datos horarios de velocidad media del viento de OAU.

En la figura 5.3 se muestra la gráfica del error absoluto entre la autocorrelación de los datos y el ajuste de curva para el caso de estudio OAU, siendo el error absoluto máximo 0.0943.

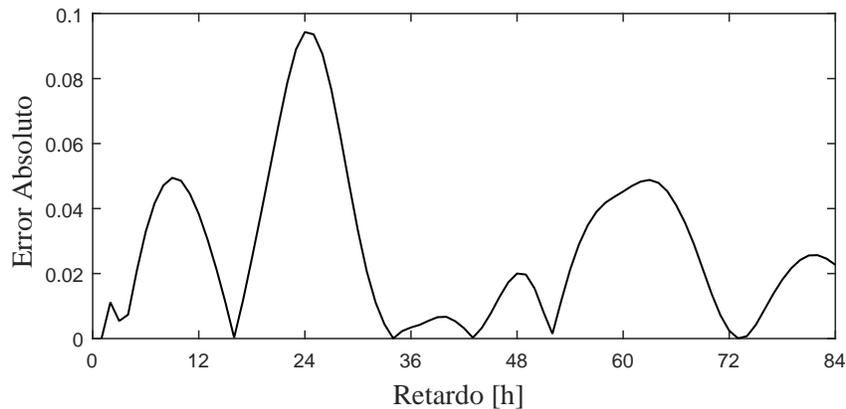


Figura 5.3: Error absoluto entre la autocorrelación de los datos y el ajuste de curva de OAU.

OBSERVACIÓN 5.1

1. La distribución Weibull y la función exponencial resultan ser buenos ajustes para el

histograma normalizado y la autocorrelación del conjunto de datos de velocidad de viento como puede observarse en las figuras 5.1 y 5.2 para el caso de estudio OAU.

2. En la figura 5.2 se muestra la autocorrelación de los datos para un tiempo de retardo de hasta 84 horas, ya que es el tiempo en el que se puede observar una buena aproximación entre la autocorrelación de los datos y el ajuste exponencial, como se ilustra en la figura 5.3.

• Caso de estudio EUR

En la tabla 5.2 se muestran los valores de los parámetros de la distribución Weibull obtenidos en el proceso de bondad de ajuste y el coeficiente de autocorrelación obtenido del ajuste exponencial para el caso de estudio EUR.

Tabla 5.2: Parámetros de ajuste para los datos de velocidad de viento EUR.

Ubicación	λ	k	α
EUR	7.279205	1.668606	0.0257

La figura 5.4 muestra el histograma normalizado del conjunto de datos EUR y la distribución Weibull a la que se ajustaron los datos.

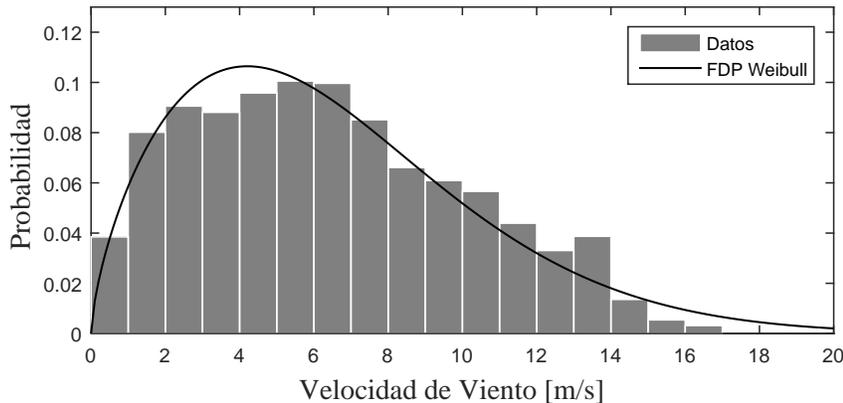


Figura 5.4: Densidad de probabilidad de los datos horarios de velocidad media del viento de EUR y densidad de probabilidad de ajuste.

La figura 5.5 muestra la autocorrelación del conjunto de datos OAU para retardos de tiempo de hasta 84 horas y el ajuste exponencial según la expresión (3.26).

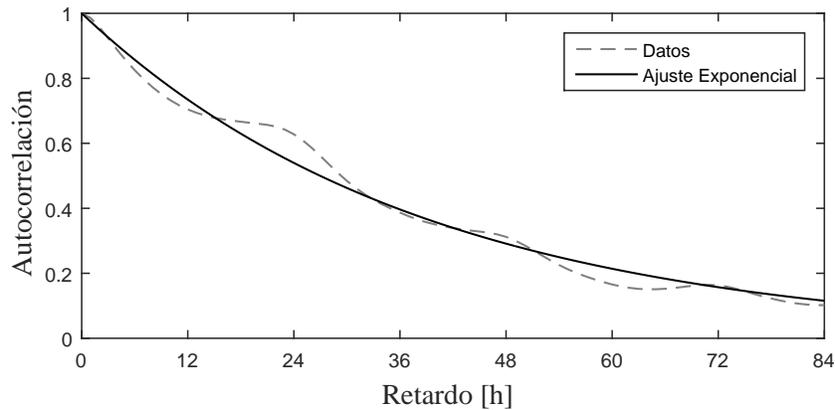


Figura 5.5: Autocorrelación de los datos horarios de velocidad media del viento de EUR.

En la figura 5.3 se muestra la gráfica del error absoluto entre la autocorrelación de los datos y el ajuste de curva para el caso de estudio EUR, siendo el error absoluto máximo 0.0882.

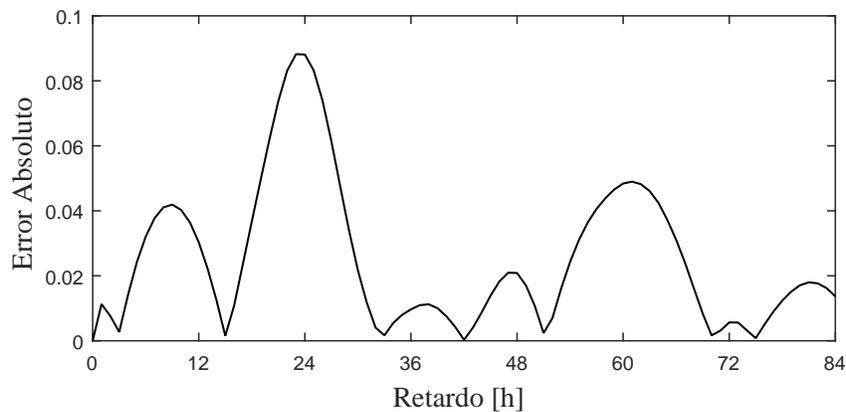


Figura 5.6: Error absoluto entre la autocorrelación de los datos y el ajuste de curva de EUR.

OBSERVACIÓN 5.2

1. La distribución Weibull y la función exponencial resultan ser buenos ajustes para el histograma normalizado y la autocorrelación del conjunto de datos de velocidad de viento como puede observarse en las figuras 5.4 y 5.5 para el caso de estudio EUR.

2. En la figura 5.5 se muestra la autocorrelación de los datos para un tiempo de retardo de hasta 84 horas, ya que es el tiempo en el que se puede observar una aproximación correcta entre la autocorrelación de los datos y el ajuste exponencial, como se ilustra en la figura 5.6.

5.1.2. Modelo I

En esta sección, los parámetros obtenidos en el análisis de datos se utilizan para configurar el modelo I para los dos casos de estudio. Primero se realiza una comparación entre el conjunto de datos OAU y una simulación de 4416 horas del modelo I con los parámetros obtenidos para el caso de estudio OAU. Posteriormente, se muestran las propiedades estadísticas de 1000 trayectorias de velocidad de viento generadas con el modelo I. Lo mismo se realiza para el caso de estudio EUR.

• Caso de estudio OAU

En la figura 5.7 se muestra la trayectoria de velocidad de viento generada solo hasta un tiempo de 84 horas, que es el tiempo en el que se puede observar la aproximación entre la autocorrelación de los datos y el ajuste exponencial.

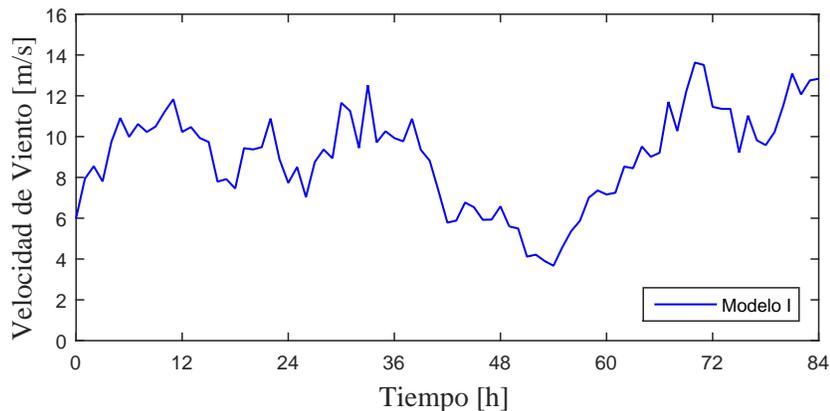


Figura 5.7: Trayectoria de velocidad de viento generada por el modelo I para el caso de estudio OAU.

Las figuras 5.8 y 5.9 muestran el histograma y la autocorrelación respectivamente, correspondientes a los valores obtenidos en esta simulación.

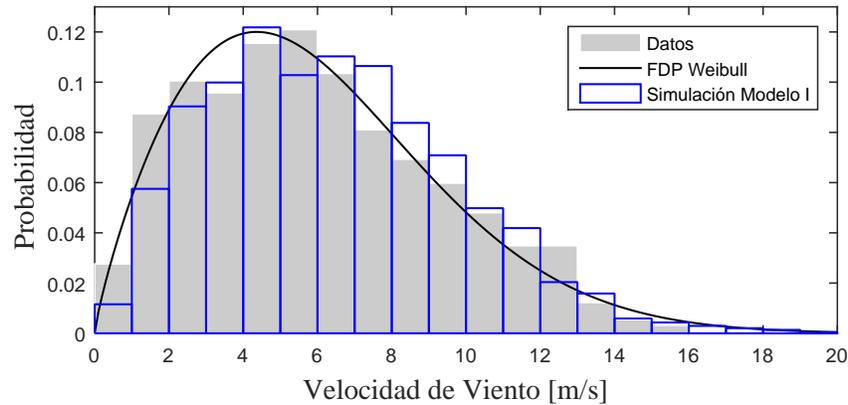


Figura 5.8: Histograma normalizado los datos horarios de velocidad media del viento de OAU, densidad de probabilidad de ajuste e histograma normalizado de una simulación mediante el modelo I.

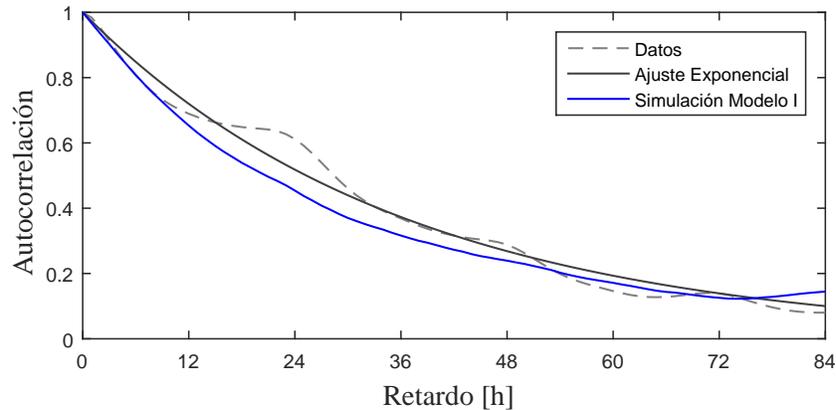


Figura 5.9: Autocorrelación de los datos horarios de velocidad media del viento de OAU, ajuste exponencial y autocorrelación de una simulación mediante el modelo I.

OBSERVACIÓN 5.3 *Las propiedades estadísticas de la simulación son similares a las observadas en el conjunto de datos.*

En la figura 5.10 se muestra la función de densidad de probabilidad Weibull a la que se ajustaron los datos y densidad de probabilidad de las 1000 trayectorias de viento generadas mediante el modelo I.

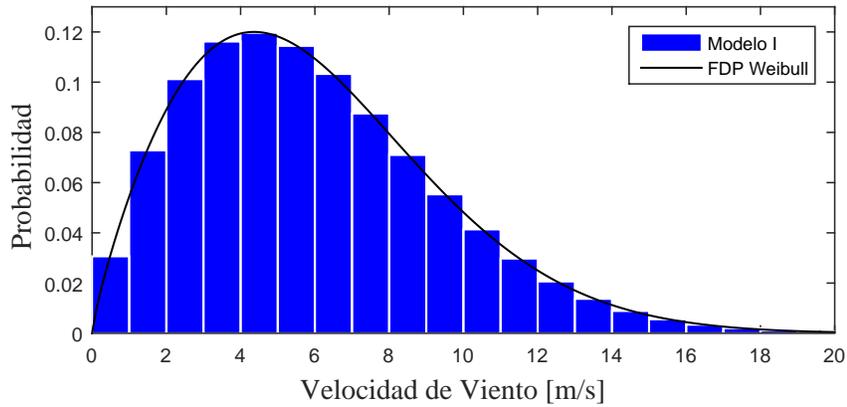


Figura 5.10: Densidad de probabilidad de las velocidades de viento generadas por el modelo I para el caso de estudio OAU.

La figura 5.11 muestra el promedio de las autocorrelaciones de las 1000 trayectorias de viento generadas mediante el modelo I.

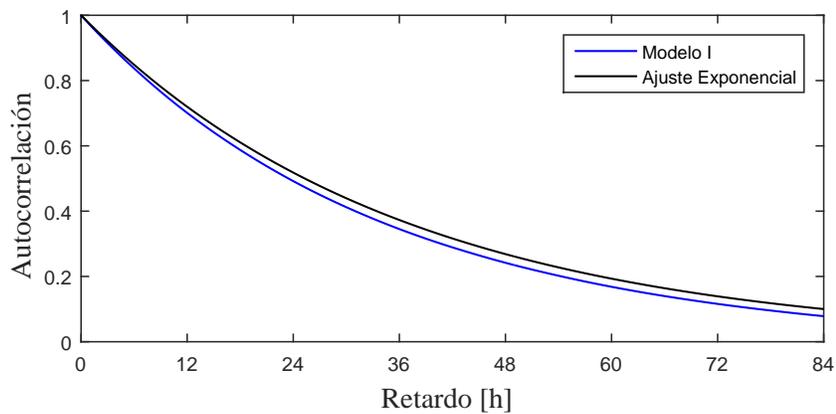


Figura 5.11: Autocorrelación de las velocidades de viento generadas por el modelo I para el caso de estudio OAU.

• Caso de estudio EUR

En la figura 5.12 se muestra la trayectoria de velocidad de viento generada solo hasta un tiempo de 84 horas, que es el tiempo en el que se puede observar la aproximación entre la autocorrelación de los datos y el ajuste exponencial.

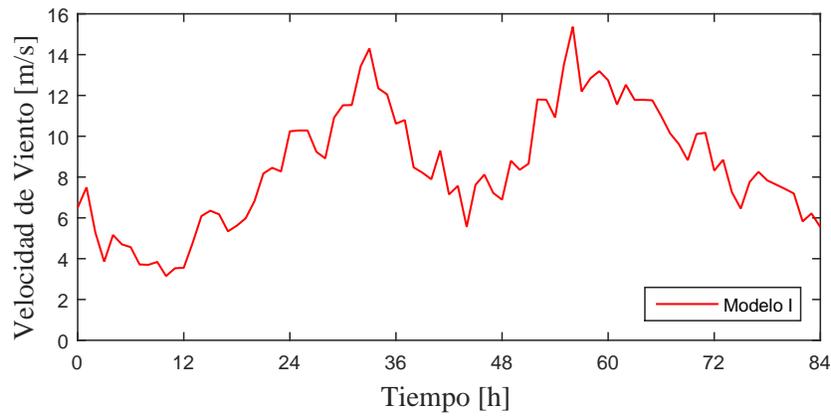


Figura 5.12: Trayectoria de velocidad de viento generada por el modelo I para el caso de estudio EUR.

Las figuras 5.13 y 5.14 muestran el histograma y la autocorrelación respectivamente, correspondientes a los valores obtenidos en esta simulación.

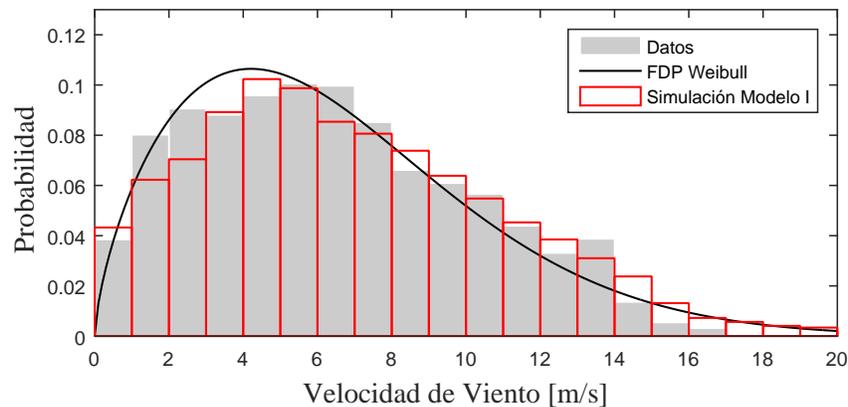


Figura 5.13: Histograma normalizado los datos horarios de velocidad media del viento de EUR, densidad de probabilidad de ajuste e histograma normalizado de una simulación mediante el modelo I.

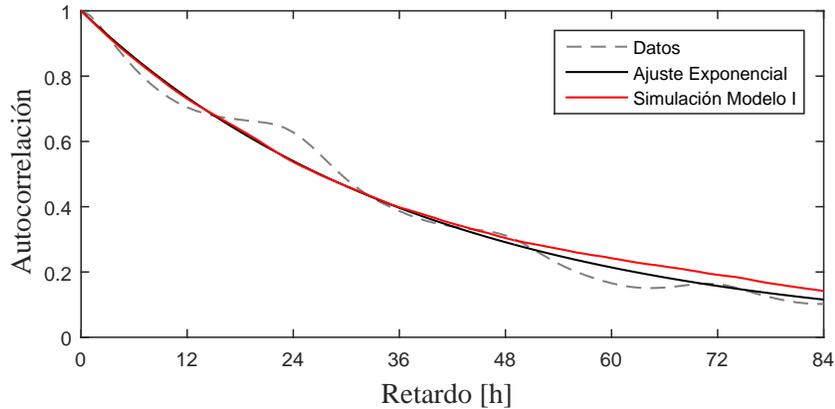


Figura 5.14: Autocorrelación de los datos horarios de velocidad media del viento de EUR, ajuste exponencial y autocorrelación de una simulación mediante el modelo I.

OBSERVACIÓN 5.4 Las propiedades estadísticas de la simulación son similares a las observadas en el conjunto de datos.

En la figura 5.15 se muestra la función de densidad de probabilidad Weibull a la que se ajustaron los datos y densidad de probabilidad de las 1000 trayectorias de viento generadas mediante el modelo I para el caso de estudio EUR.

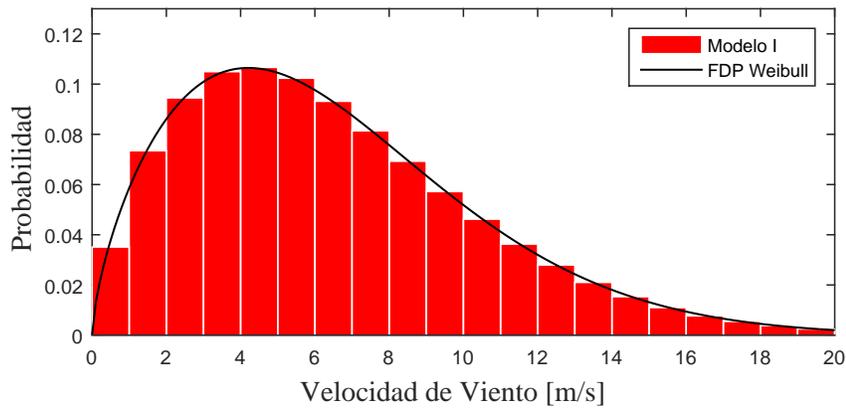


Figura 5.15: Densidad de probabilidad de las velocidades de viento generadas por el modelo I para el caso de estudio EUR.

La figura 5.16 muestra el promedio de las autocorrelaciones de 1000 trayectorias de viento generadas mediante el modelo I.

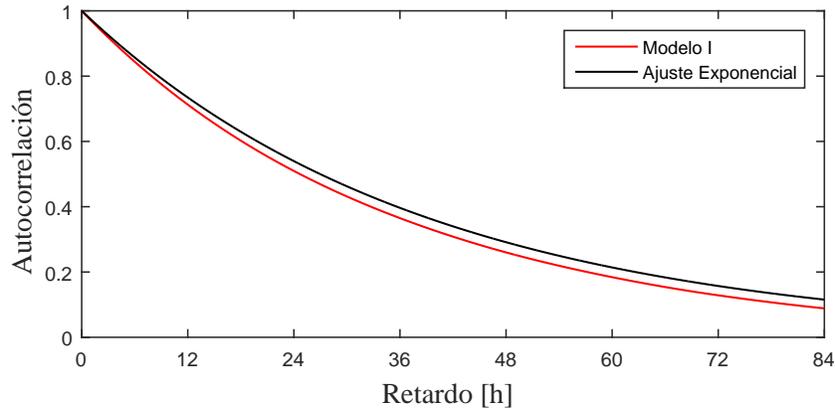


Figura 5.16: Autocorrelación de las velocidades de viento generadas por el modelo I para el caso de estudio EUR.

OBSERVACIÓN 5.5 En análisis estadístico de las 1000 trayectorias de velocidad de viento generadas mediante el modelo I para el caso de estudio OAU (figuras 5.10 y 5.11) y EUR (figuras 5.15 y 5.16), muestra que el modelo es capaz de generar trayectorias de velocidad del viento con propiedades estadísticas muy similares para las que fue diseñado.

5.1.3. Modelo II

En esta sección, los parámetros obtenidos en el análisis de datos se utilizan para configurar el modelo II para los dos casos de estudio. Primero se realiza una comparación entre el conjunto de datos OAU y una simulación de 4416 horas del modelo II con los parámetros obtenidos para el caso de estudio OAU. Posteriormente, se muestran las propiedades estadísticas de 1000 trayectorias de velocidad de viento generadas con el modelo II. Lo mismo se realiza para el caso de estudio EUR.

• Caso de estudio OAU

En la figura 5.17 se muestra la trayectoria de velocidad de viento generada solo hasta un tiempo de 84 horas, tiempo en el que se puede observar la aproximación entre la autocorrelación de los datos y el ajuste exponencial.

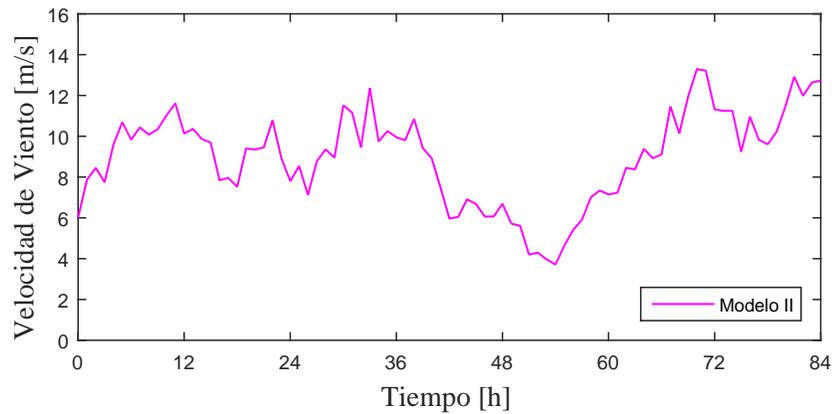


Figura 5.17: Trayectoria de velocidad de viento generada por el modelo II para el caso de estudio OAU.

Las figuras 5.18 y 5.19 muestran el histograma y la autocorrelación respectivamente, correspondientes a los valores obtenidos en esta simulación.

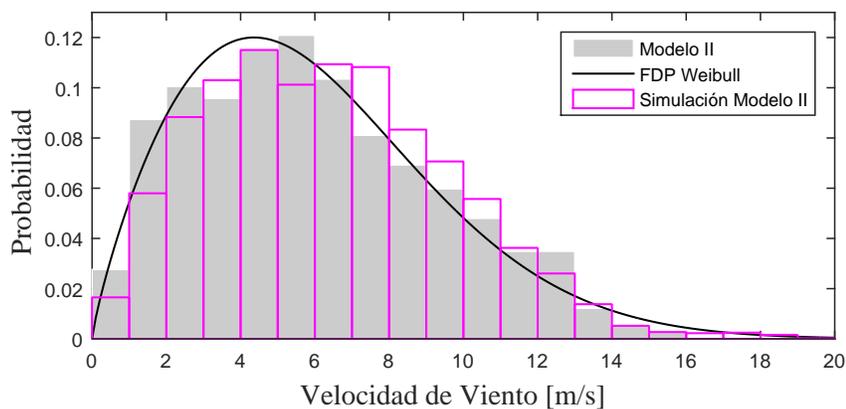


Figura 5.18: Histograma normalizado los datos horarios de velocidad media del viento de OAU, densidad de probabilidad de ajuste e histograma normalizado de una simulación mediante el modelo II.

OBSERVACIÓN 5.6 *Las propiedades estadísticas de la simulación son similares a las observadas en el conjunto de datos.*

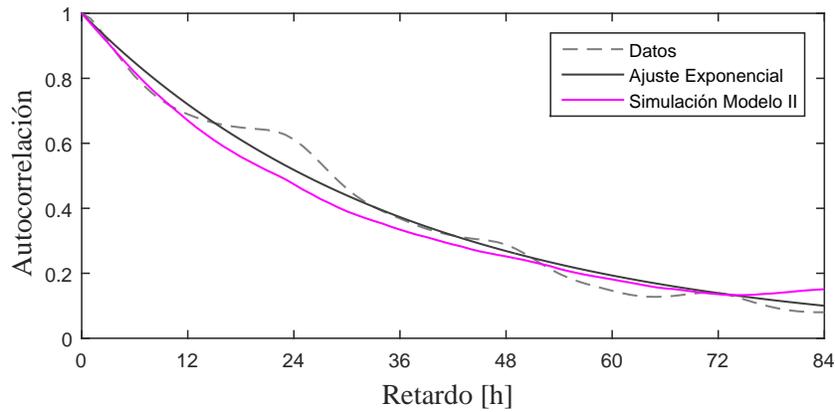


Figura 5.19: Autocorrelación de los datos horarios de velocidad media del viento de OAU, ajuste exponencial y autocorrelación de una simulación mediante el modelo II.

En la figura 5.20 se muestra la función de densidad de probabilidad Weibull a la que se ajustaron los datos y densidad de probabilidad de las 1000 trayectorias de viento generadas mediante el modelo II.

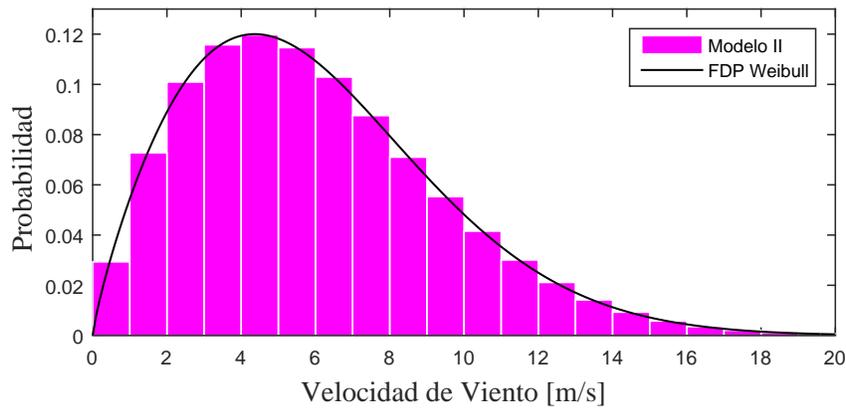


Figura 5.20: Densidad de probabilidad de las velocidades de viento generadas por el Modelo II para el caso de estudio OAU.

La figura 5.21 muestra el promedio de las autocorrelaciones de las 1000 trayectorias de viento generadas mediante el modelo II.

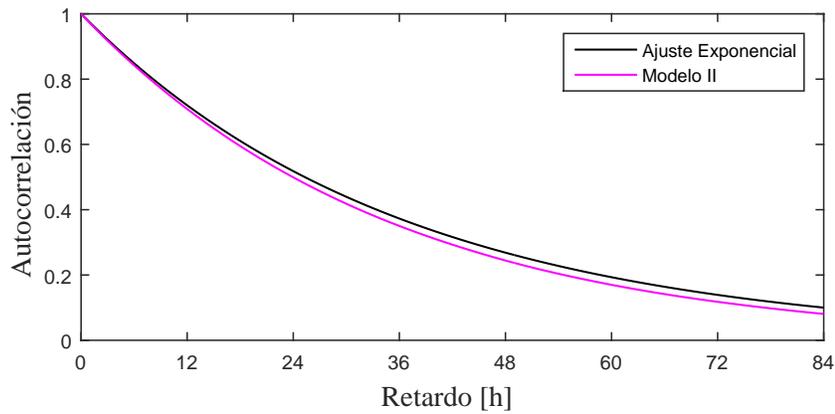


Figura 5.21: Autocorrelación de las velocidades de viento generadas por el modelo II para el caso de estudio OAU.

• Caso de estudio EUR

En la figura 5.22 se muestra la trayectoria de velocidad de viento generada solo hasta un tiempo de 84 horas, que es el tiempo en el que se puede observar la aproximación entre la autocorrelación de los datos y el ajuste exponencial.

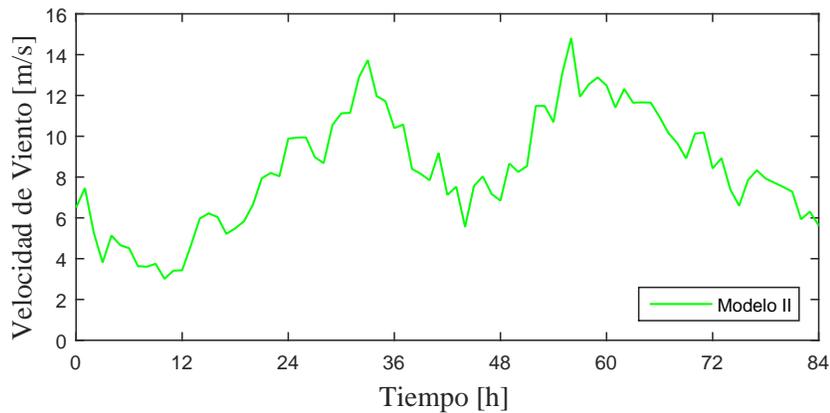


Figura 5.22: Trayectoria de velocidad de viento generada por el modelo II para el caso de estudio EUR.

Las figuras 5.23 y 5.24 muestran el histograma y la autocorrelación respectivamente, correspondientes a los valores obtenidos en esta simulación.

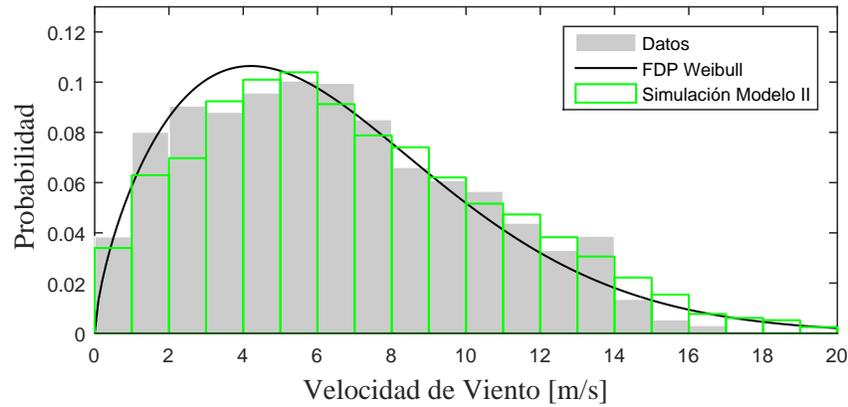


Figura 5.23: Histograma normalizado los datos horarios de velocidad media del viento de EUR, densidad de probabilidad de ajuste e histograma normalizado de una simulación mediante el modelo I.

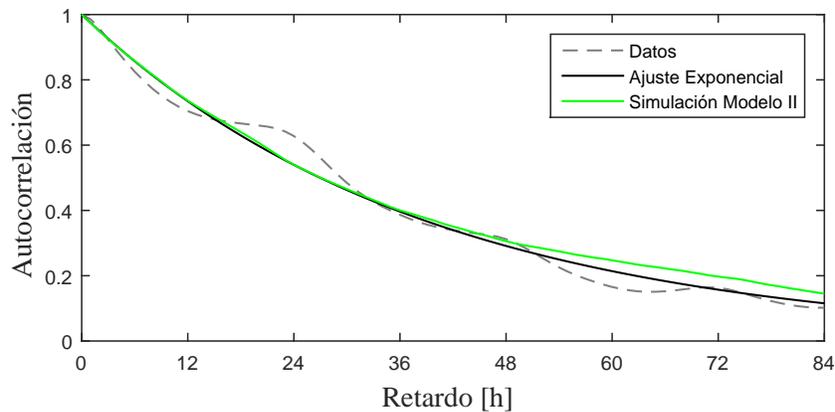


Figura 5.24: Autocorrelación de los datos horarios de velocidad media del viento de EUR, ajuste exponencial y autocorrelación de la simulación.

En la figura 5.25 se muestra la función de densidad de probabilidad Weibull a la que se ajustaron los datos y densidad de probabilidad de las 1000 trayectorias de viento generadas mediante el modelo II.

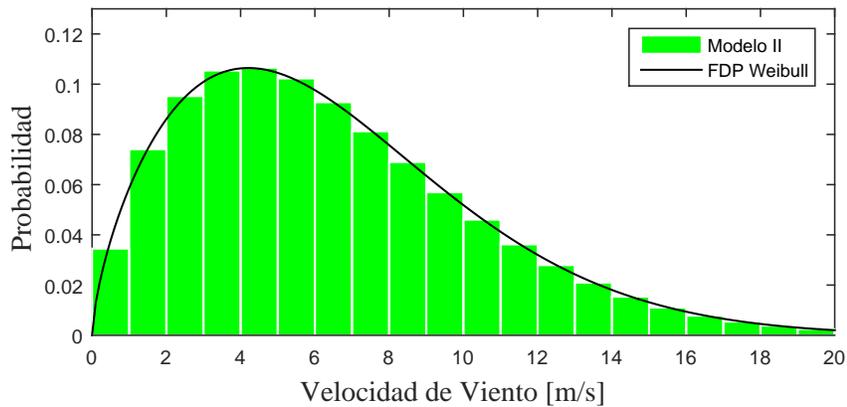


Figura 5.25: Densidad de probabilidad de las velocidades de viento generadas por el Modelo II para el caso de estudio EUR.

La figura 5.26 muestra el promedio de las autocorrelaciones de 1000 trayectorias de viento generadas mediante el modelo II.

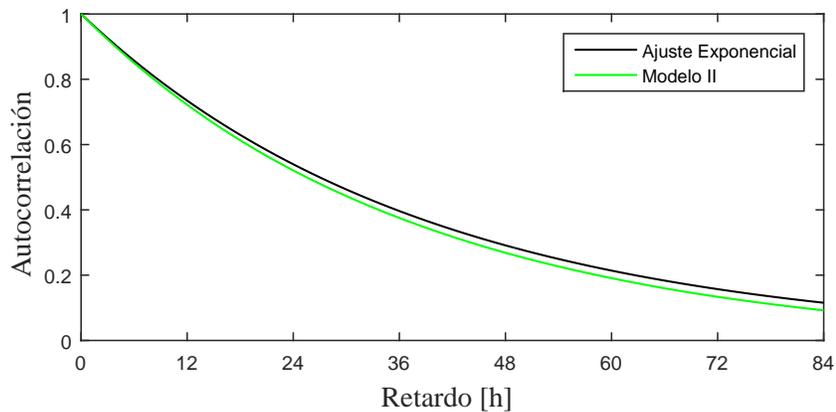


Figura 5.26: Autocorrelación de las velocidades de viento generadas por el modelo II para el caso de estudio EUR.

OBSERVACIÓN 5.7 *En análisis estadístico de las 1000 trayectorias de velocidad de viento generadas mediante el modelo II para el caso de estudio OAU (figuras 5.20 y 5.21) y EUR (figuras 5.25 y 5.26), muestra que el modelo es capaz de generar trayectorias de velocidad del viento con propiedades estadísticas muy similares para las que fue diseñado.*

5.1.4. Comparación de los modelos

- Caso de estudio OAU

En las figuras 5.27, 5.28 y 5.29 se comparan las trayectorias, densidades de probabilidad y autocorrelaciones respectivamente de una simulación generada con el mismo proceso Wiener por los modelos I y II para el caso de estudio OAU.

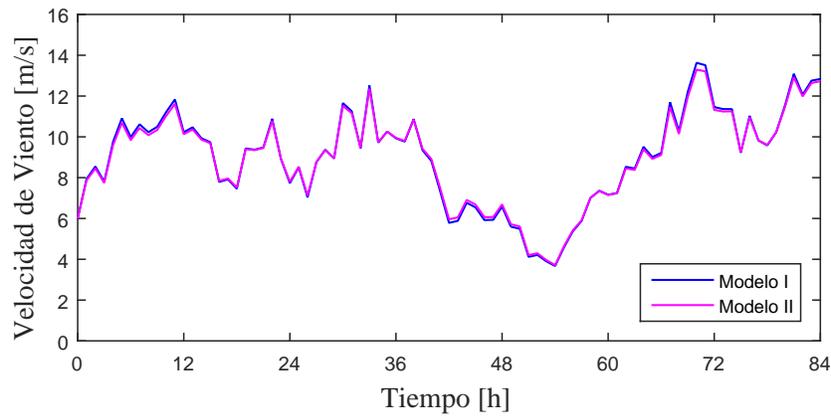


Figura 5.27: Comparación de las trayectorias generadas por los modelos para el caso de estudio OAU.

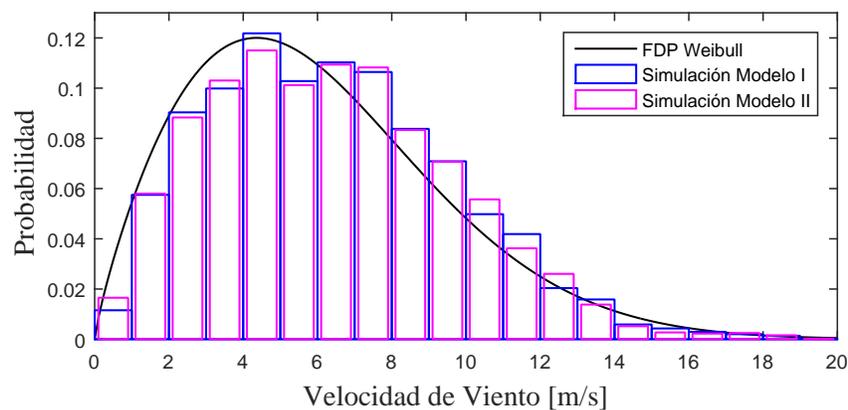


Figura 5.28: Comparación de las densidades de probabilidad de las trayectorias generadas por ambos modelos para el caso de estudio OAU.

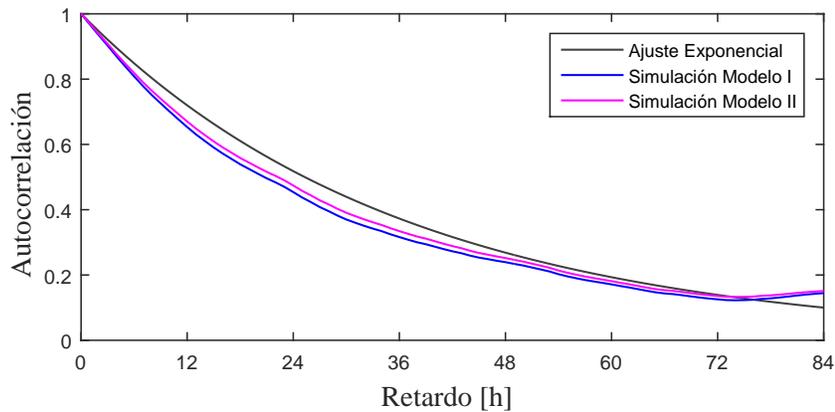


Figura 5.29: Comparación de las densidades de probabilidad de las trayectorias generadas por ambos modelos para el caso de estudio OAU.

En la figura (5.30) se compara la densidad de probabilidad de las trayectorias generadas por los modelos I y II con la FDP de la distribución Weibull a la que se ajustaron los datos para el caso de estudio OAU.

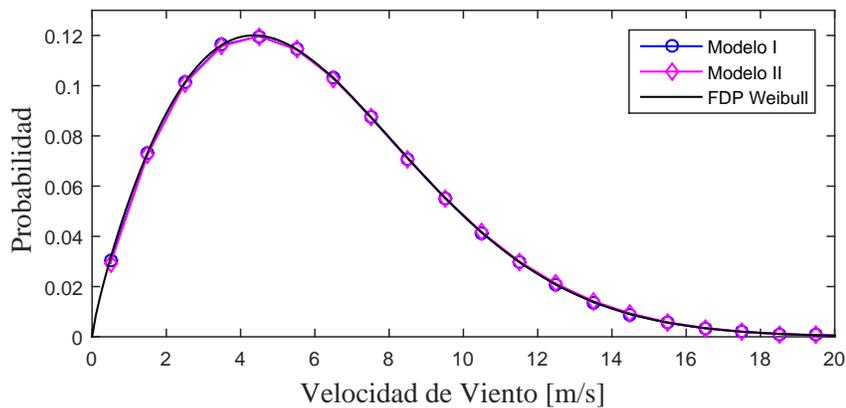


Figura 5.30: Comparación de las densidades de probabilidad de las trayectorias generadas por ambos modelos para el caso de estudio OAU.

En la figura (5.31) se hace la comparación entre la función exponencial ajustada a la autocorrelación del conjunto de datos de velocidad del viento y la autocorrelación de las trayectorias generadas por los modelos I y II para el caso de estudio OAU.

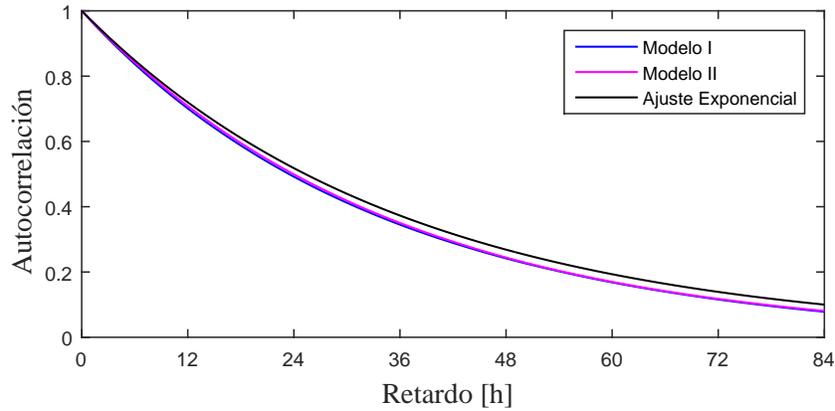


Figura 5.31: Comparación de las autocorrelaciones de las trayectorias generadas por ambos modelos para el caso de estudio OAU.

• Caso de estudio EUR

En las figuras 5.32, 5.33 y 5.34 se comparan las trayectorias, densidades de probabilidad y autocorrelaciones respectivamente de una simulación generadas con el mismo proceso Wiener por los modelos I y II para el caso de estudio EUR.

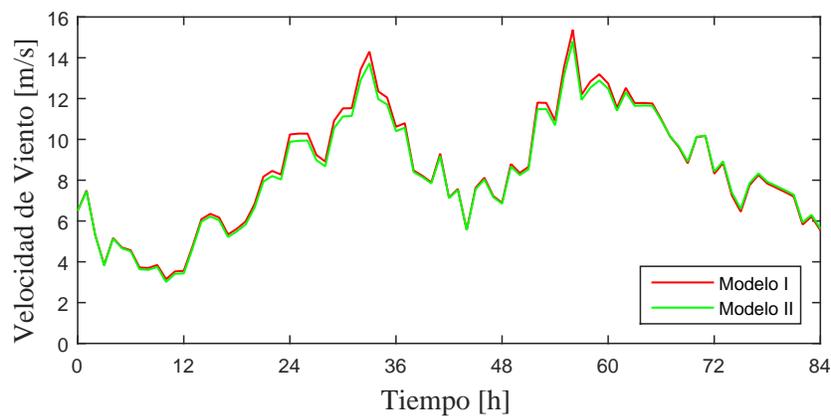


Figura 5.32: Comparación de las trayectorias generadas por los modelos para el caso de estudio EUR.

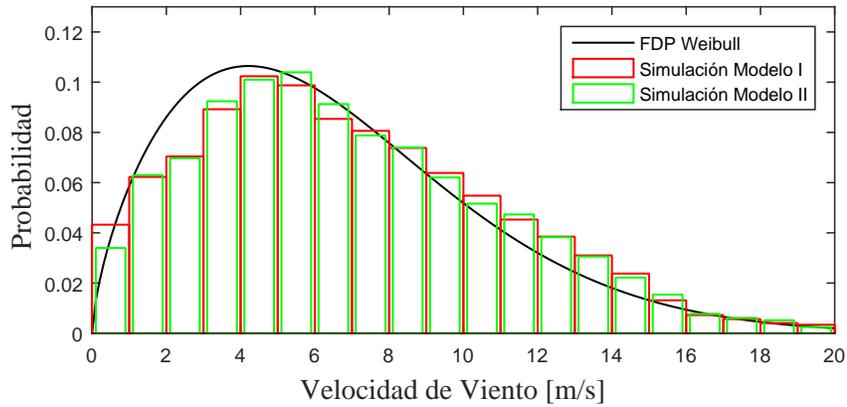


Figura 5.33: Comparación de las densidades de probabilidad de las trayectorias generadas por ambos modelos para el caso de estudio EUR.

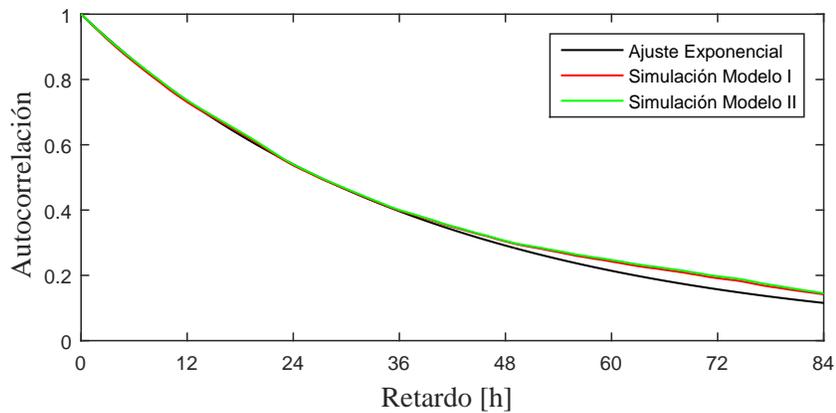


Figura 5.34: Comparación de las densidades de probabilidad de las trayectorias generadas por ambos modelos para el caso de estudio EUR.

En la figura (5.35) se compara la densidad de probabilidad de las trayectorias generadas por los modelos I y II con la FDP de la distribución Weibull a la que se ajustaron los datos para el caso de estudio EUR.

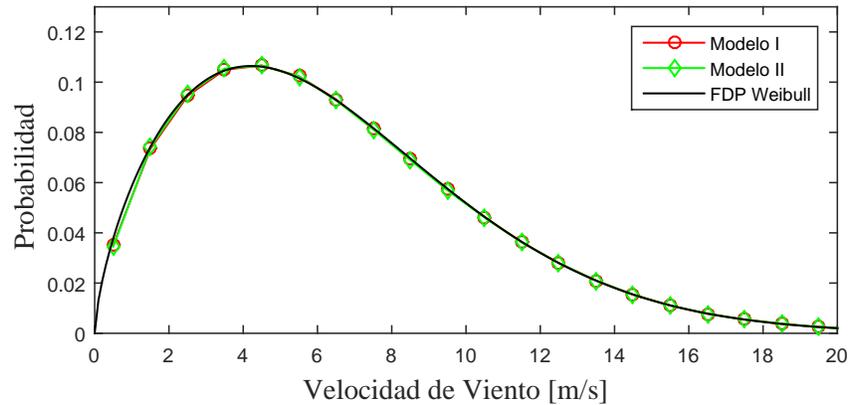


Figura 5.35: Comparación de las densidades de probabilidad de las trayectorias generadas por ambos modelos para el caso de estudio EUR.

En la figura (5.36) se hace la comparación entre la función exponencial ajustada a la autocorrelación del conjunto de datos de velocidad del viento y la autocorrelación de las trayectorias generadas por los modelos I y II para el caso de estudio EUR.

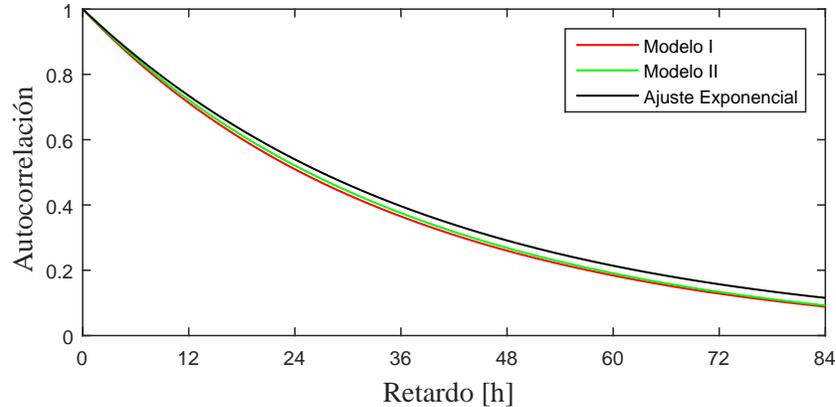


Figura 5.36: Comparación de las autocorrelaciones de las trayectorias generadas por ambos modelos para el caso de estudio EUR.

OBSERVACIÓN 5.8

1. En la comparación entre las trayectorias de velocidades de viento de los dos modelos de velocidad de viento para los dos casos de estudio puede observarse pequeñas diferencias, lo que genera pequeñas diferencias entre los histogramas normalizados y las funciones de autocorrelación.

2. *Con respecto a la autocorrelación, se observa ligeramente una mejora por parte del modelo II, lo cual resulta esperado debido a las diferencias en la formulación.*
3. *La comparación entre las propiedades estadísticas de las 1000 trayectorias de velocidades de viento son muy similares entre ambos modelos.*

5.2. Modelo de velocidad de viento en escala de segundos

5.2.1. Pruebas de las parametrizaciones

Para evaluar los 4 posibles modelos propuestos en la tabla (4.1) de la sección 4.2, con cada modelo se simula un mes de velocidades de viento con tamaño de paso de un segundo, parametrizándolos por medio de las ecuaciones dadas por el MTN (2.20) y (2.21) para cada valor de I_{ref} y se realiza un análisis de intensidad de turbulencia, graficando las siguientes características para cada simulación:

- Velocidad media del viento (ecuación (2.10))
- Flujo de turbulencia (obtenida a partir de la ecuación (2.16))
- Intensidad de turbulencia (ecuación (2.17))
- Desviación estándar (ecuación (2.18))

Para lo anterior se utilizan 4320 mediciones de velocidades medias de viento de cada 10 minutos más una condición inicial para la construcción de la función a trozos m_t (figura 5.37) y con lo que se obtiene un total de 31 días de simulación. Estos datos fueron proporcionados por el Sistema Meteorológico Nacional y corresponden al mes de abril del 2013 obtenidos en una estación meteorológica ubicada en Cabo Pulmo, Baja California Sur, México.

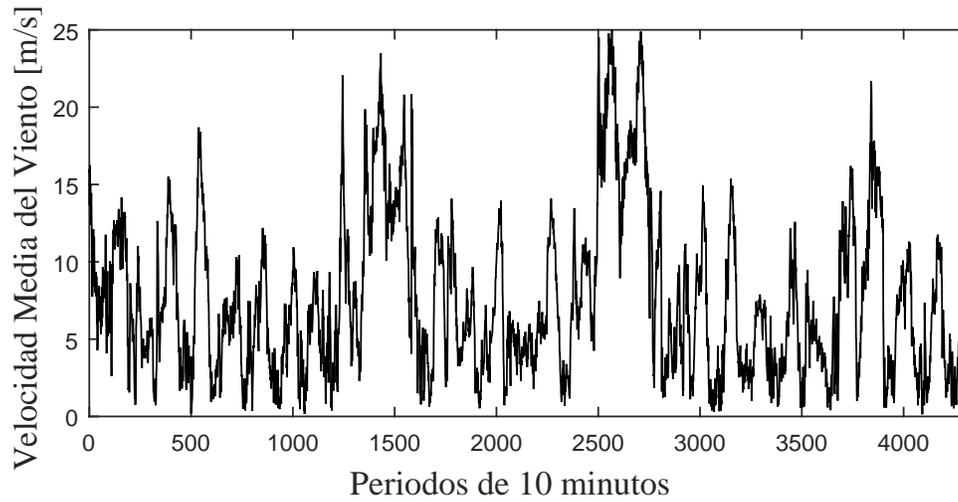


Figura 5.37: Mediciones de velocidades medias de viento de cada 10 minutos correspondientes al mes Abril del 2013 obtenidas de la estación meteorológica Cabo Pulmo en Baja California Sur, México.

5.2.2. Simulaciones de la solución I

Clase A IEC

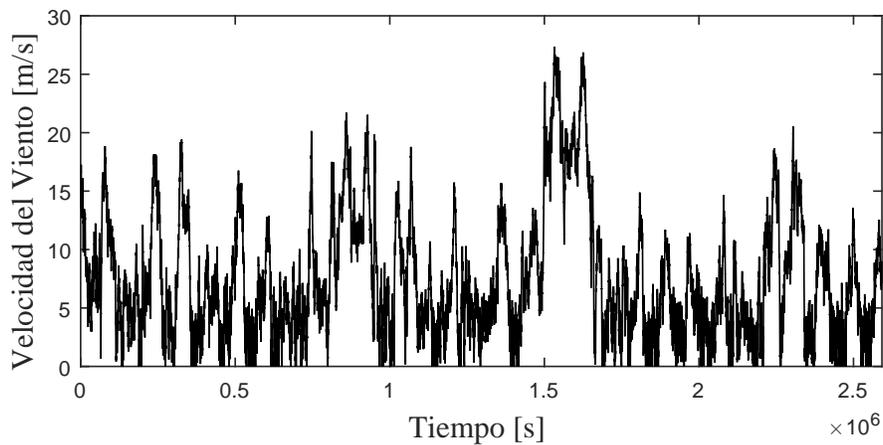


Figura 5.38: Simulación de un mes de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución I para una turbina de clase A.

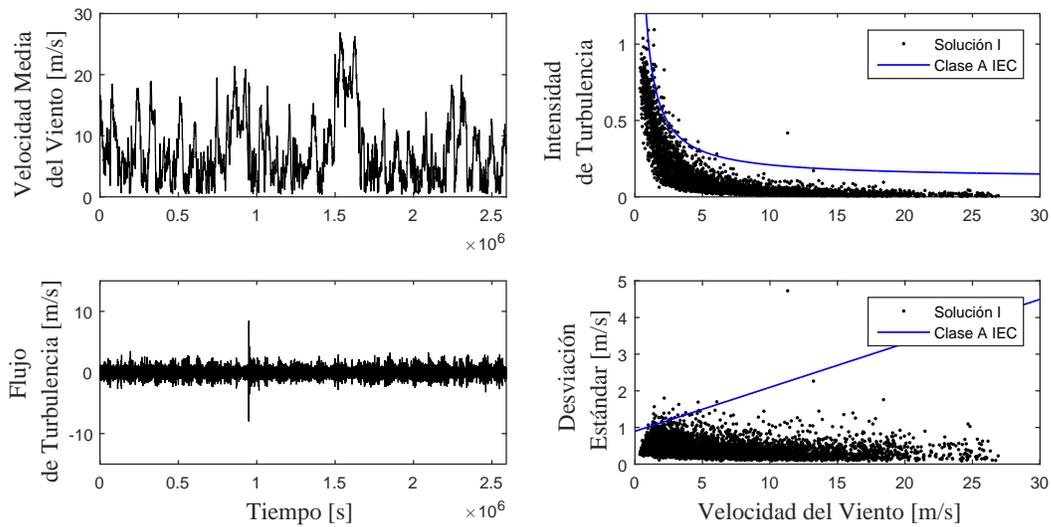


Figura 5.39: Características de la simulación de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución I para una turbina de clase A.

Clase B IEC

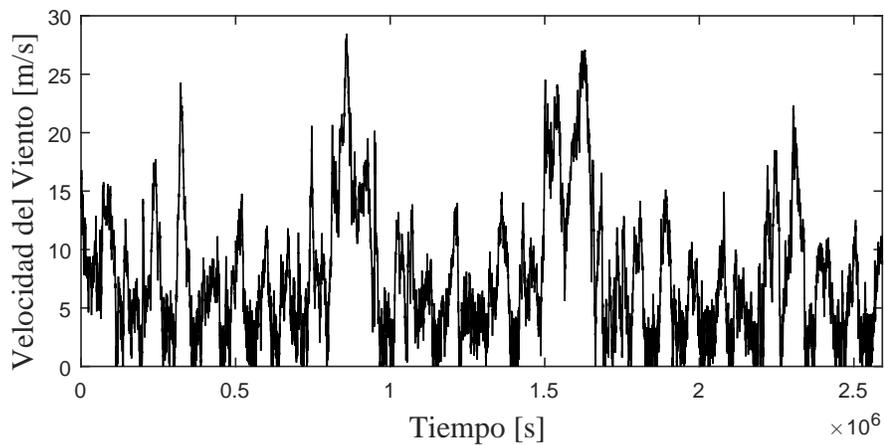


Figura 5.40: Simulación de un mes de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución I para una turbina de clase B.

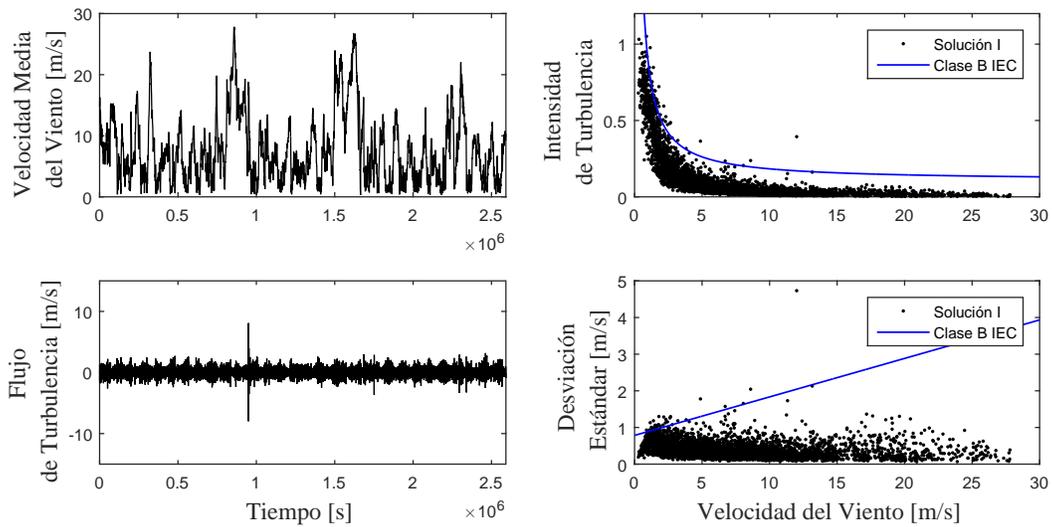


Figura 5.41: Características de la simulación de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución I para una turbina de clase B.

Clase C IEC

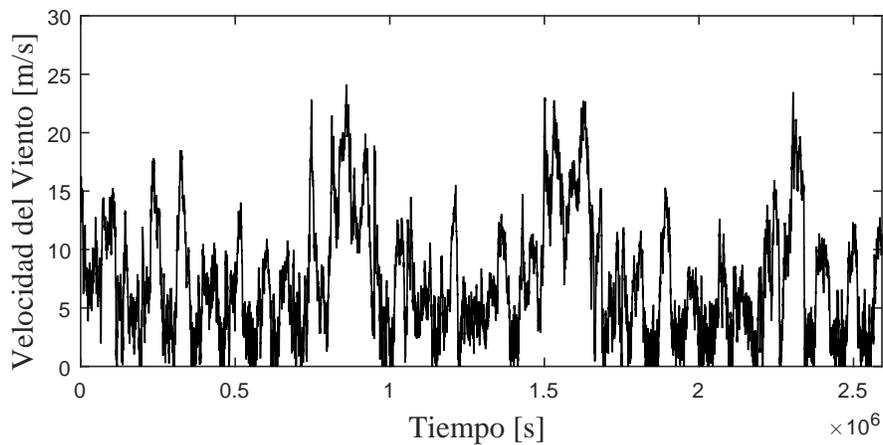


Figura 5.42: Simulación de un mes de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución I para una turbina de clase C.

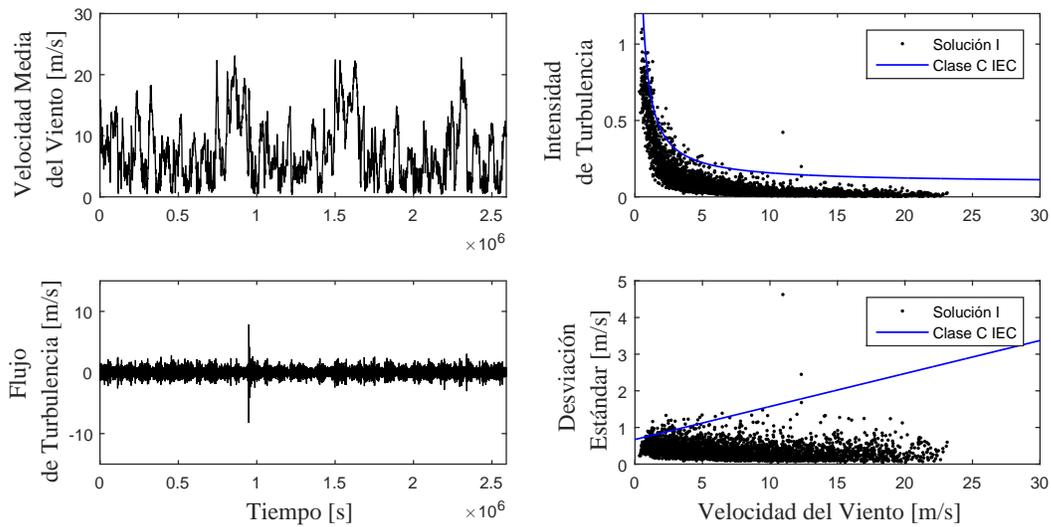


Figura 5.43: Características de la simulación de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución I para una turbina de clase C.

5.2.3. Simulaciones de la solución II

Clase A IEC

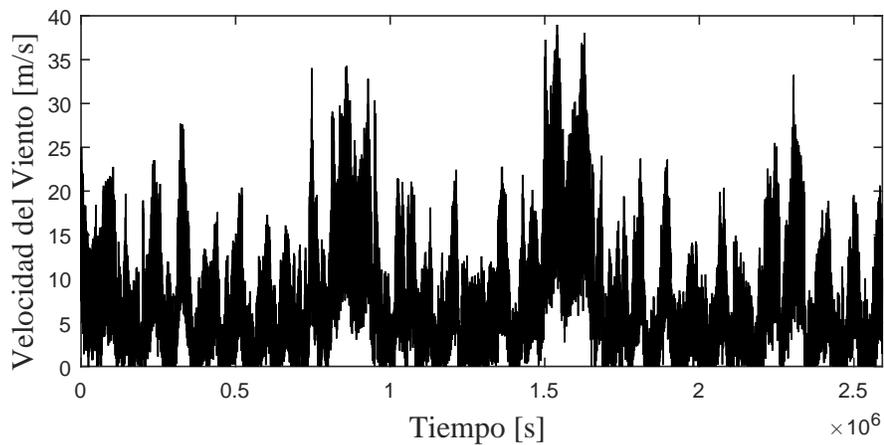


Figura 5.44: Simulación de un mes de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución II para una turbina de clase A.

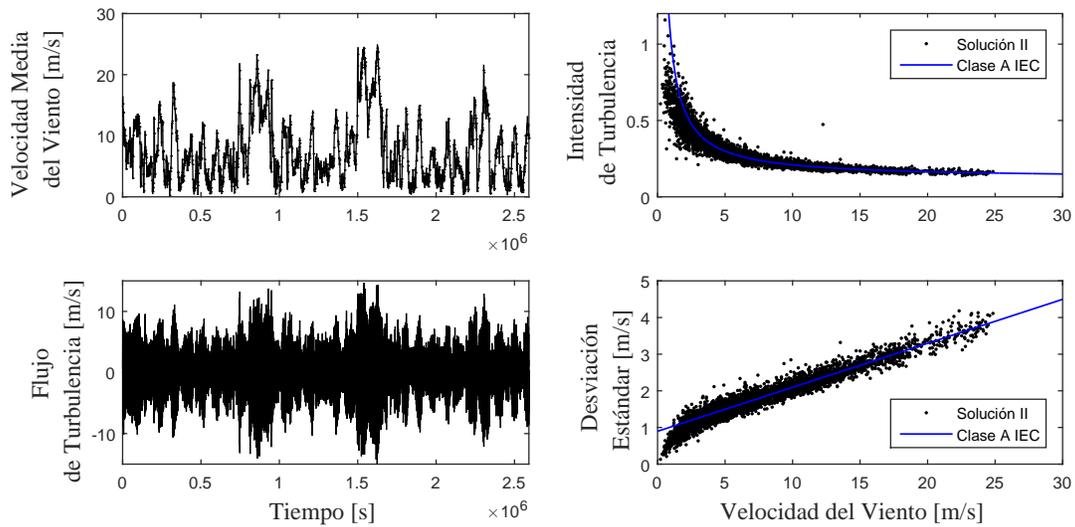


Figura 5.45: Características de la simulación de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución II para una turbina de clase A.

Clase B IEC

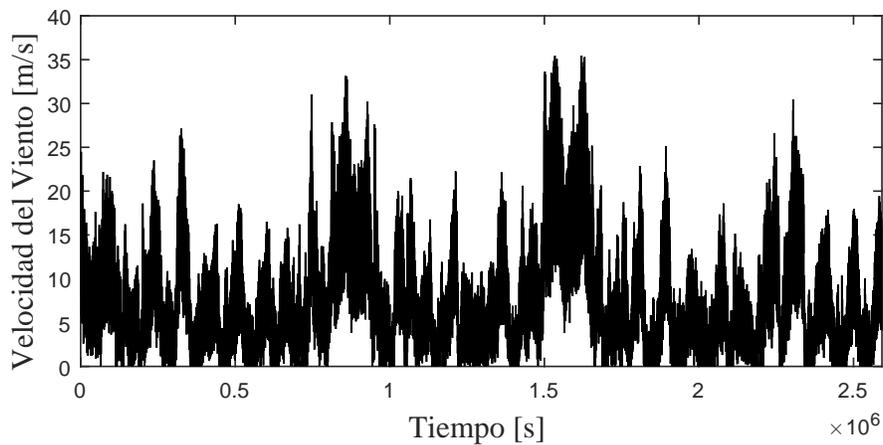


Figura 5.46: Simulación de un mes de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución II para una turbina de clase B.

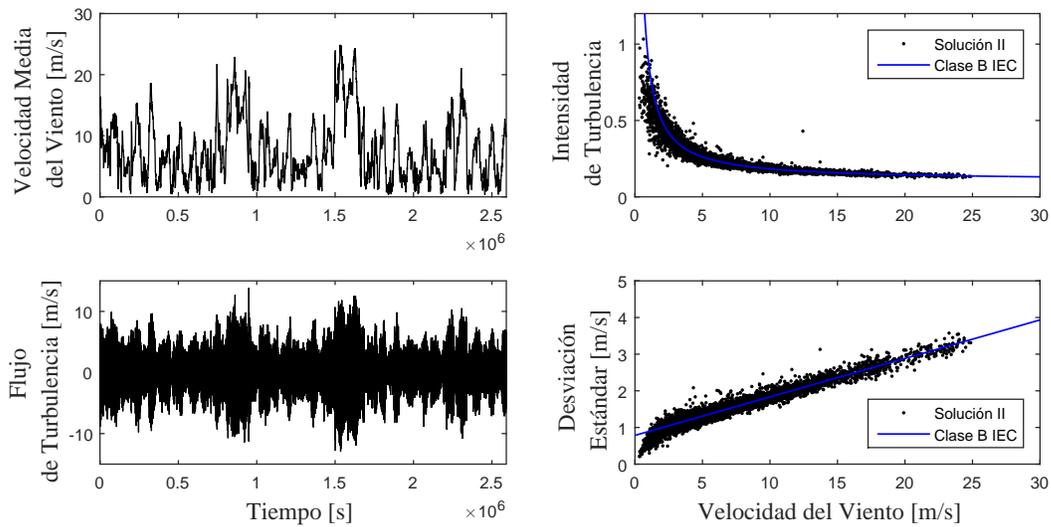


Figura 5.47: Características de la simulación de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución II para una turbina de clase B.

Clase C IEC

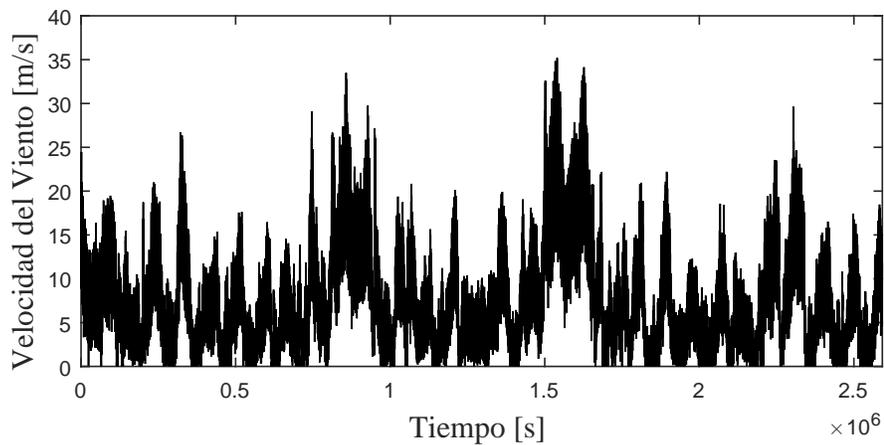


Figura 5.48: Simulación de un mes de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución II para una turbina de clase C.

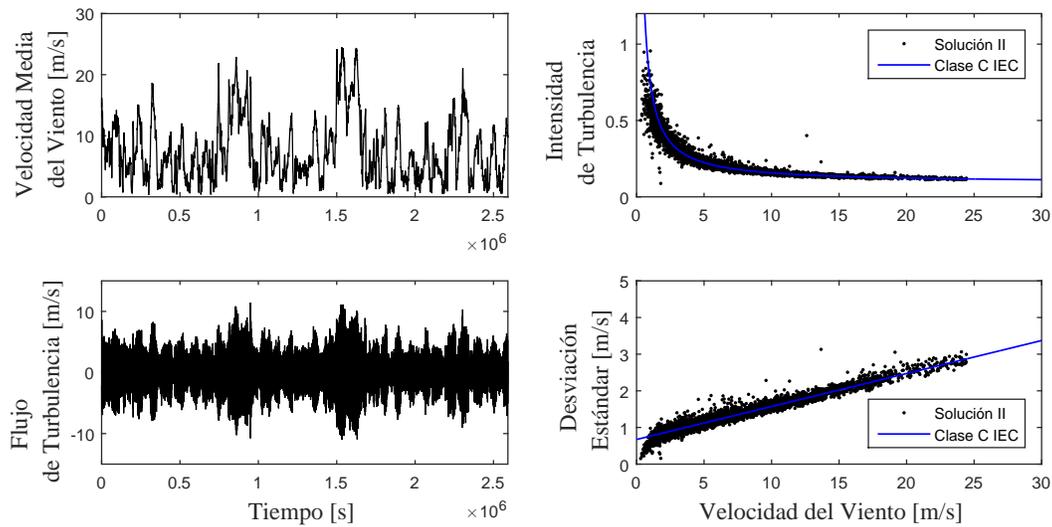


Figura 5.49: Características de la simulación de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución II para una turbina de clase C.

5.2.4. Simulaciones de la solución III

Clase A IEC

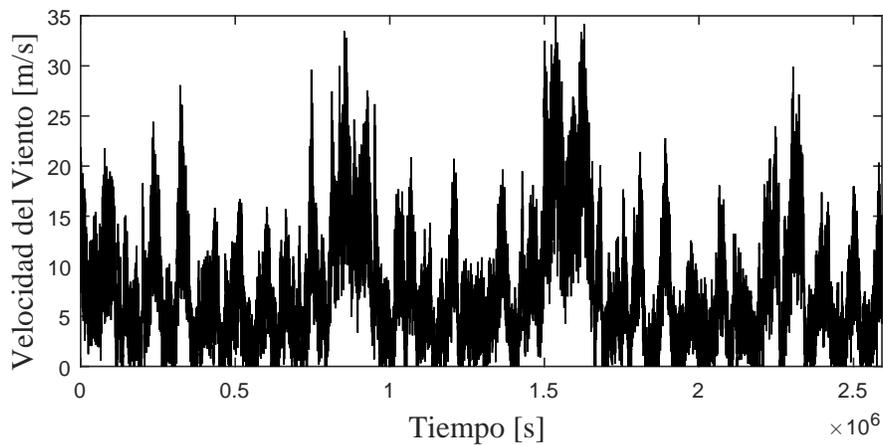


Figura 5.50: Simulación de un mes de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución III para una turbina de clase A.

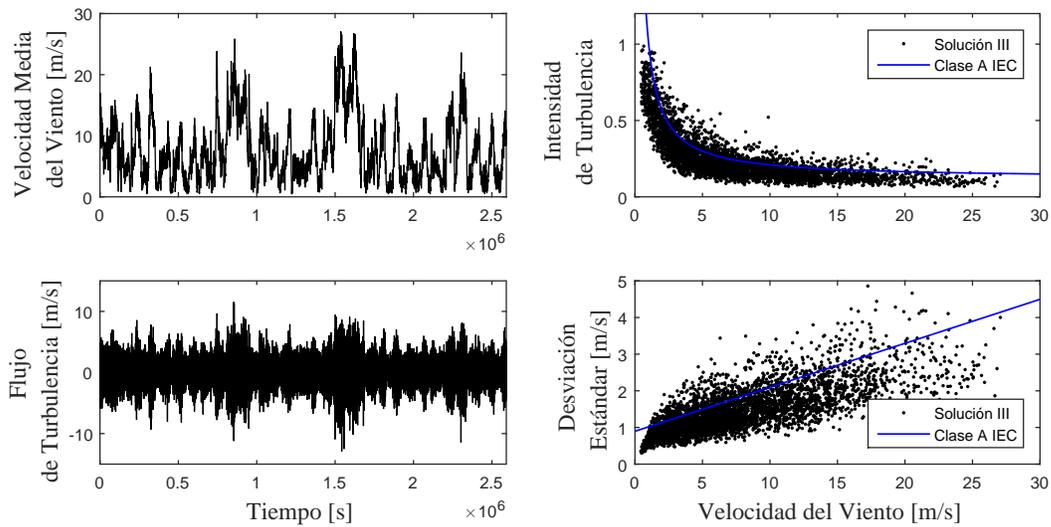


Figura 5.51: Características de la simulación de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución III para una turbina de clase A.

Clase B IEC

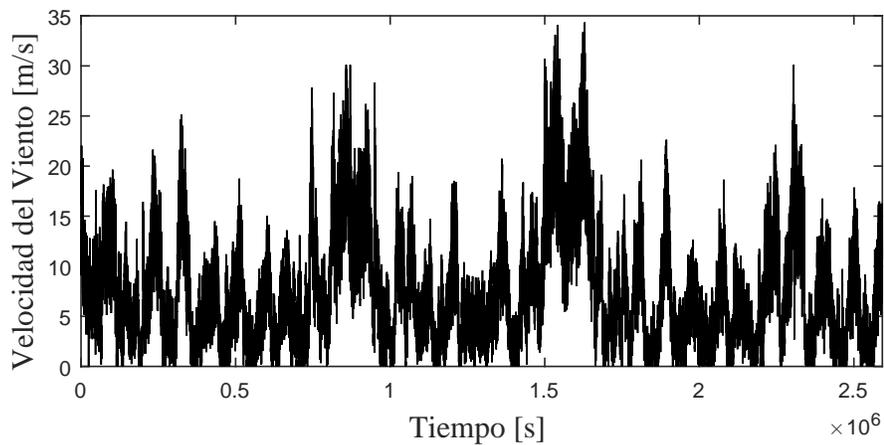


Figura 5.52: Simulación de un mes de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución III para una turbina de clase B.

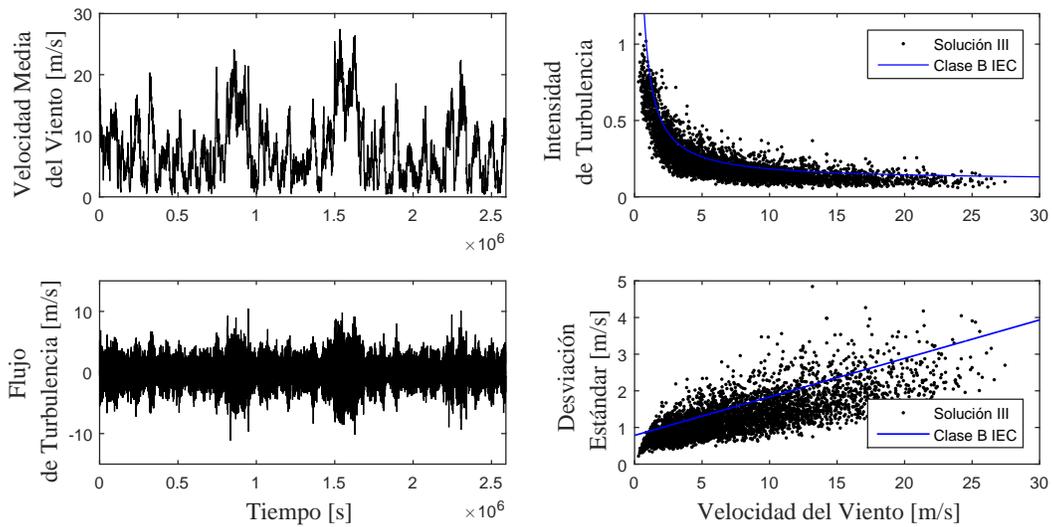


Figura 5.53: Características de la simulación de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución III para una turbina de clase B.

Clase C IEC

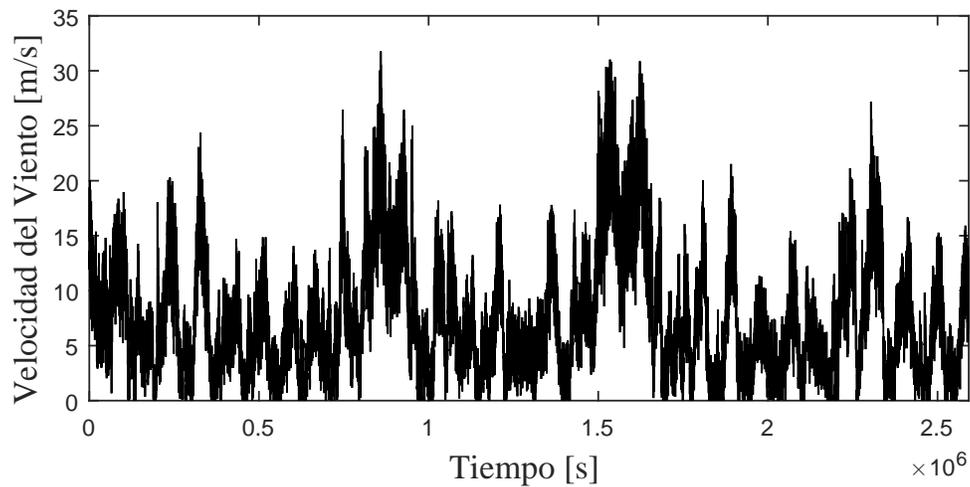


Figura 5.54: Simulación de un mes de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución III para una turbina de clase C.

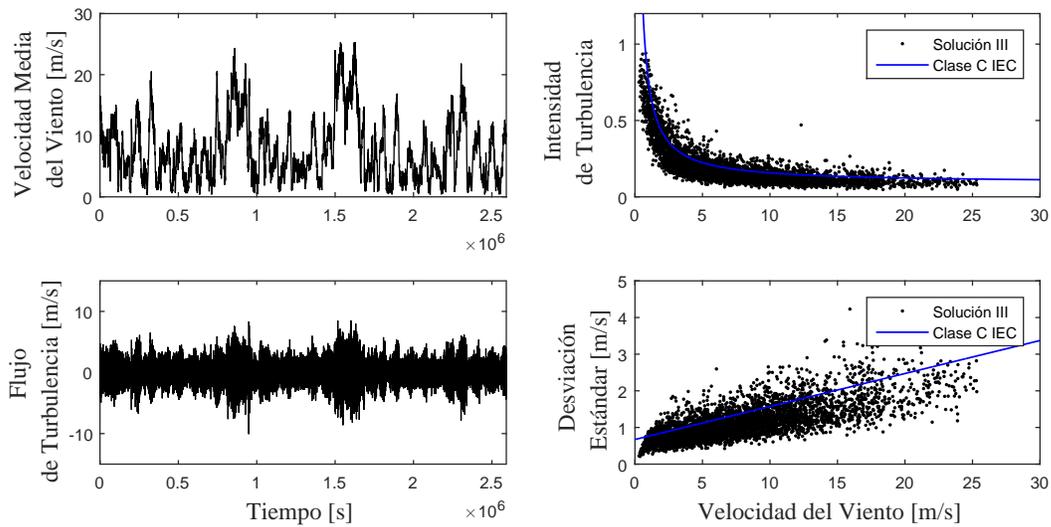


Figura 5.55: Características de la simulación de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución III para una turbina de clase C.

5.2.5. Simulaciones de la solución IV

Clase A IEC

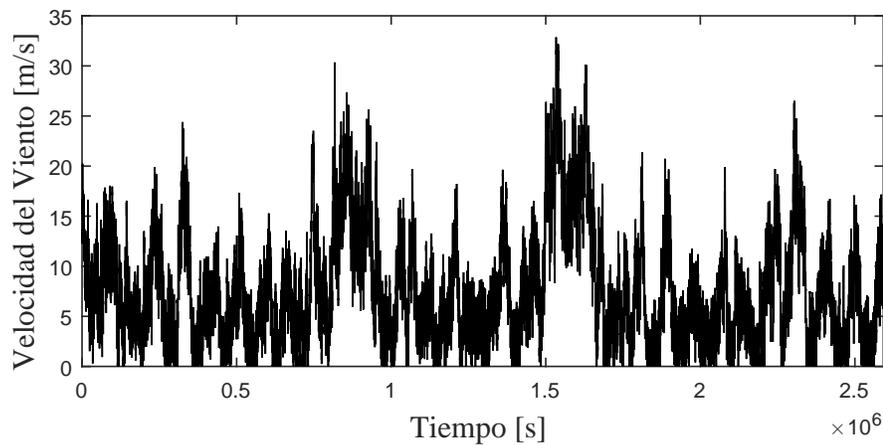


Figura 5.56: Simulación de un mes de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución IV para una turbina de clase A.

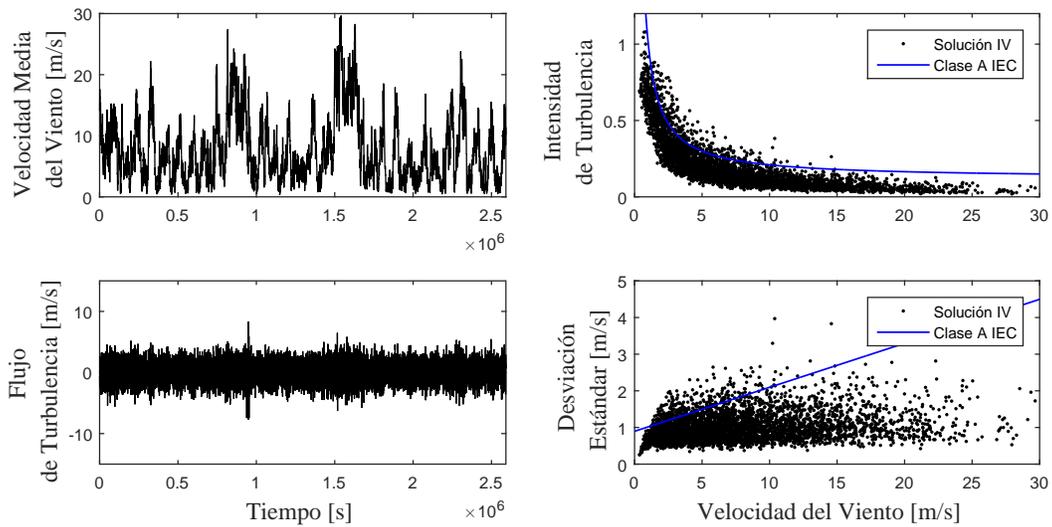


Figura 5.57: Características de la simulación de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución IV para una turbina de clase A.

Clase B IEC

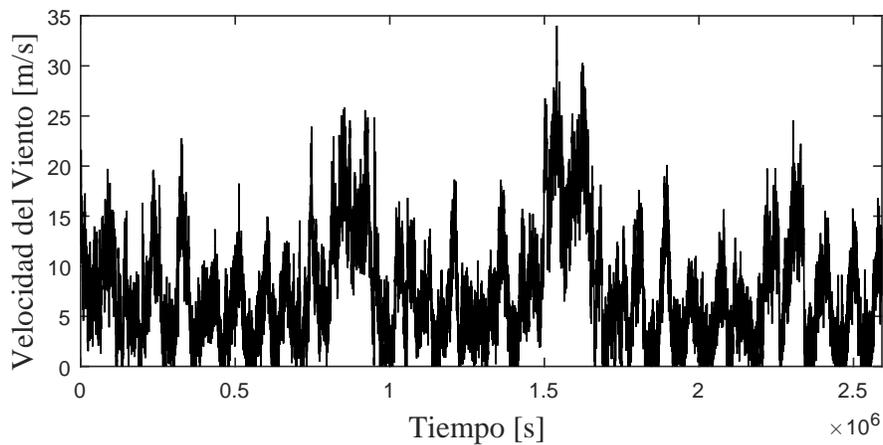


Figura 5.58: Simulación de un mes de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución IV para una turbina de clase B.

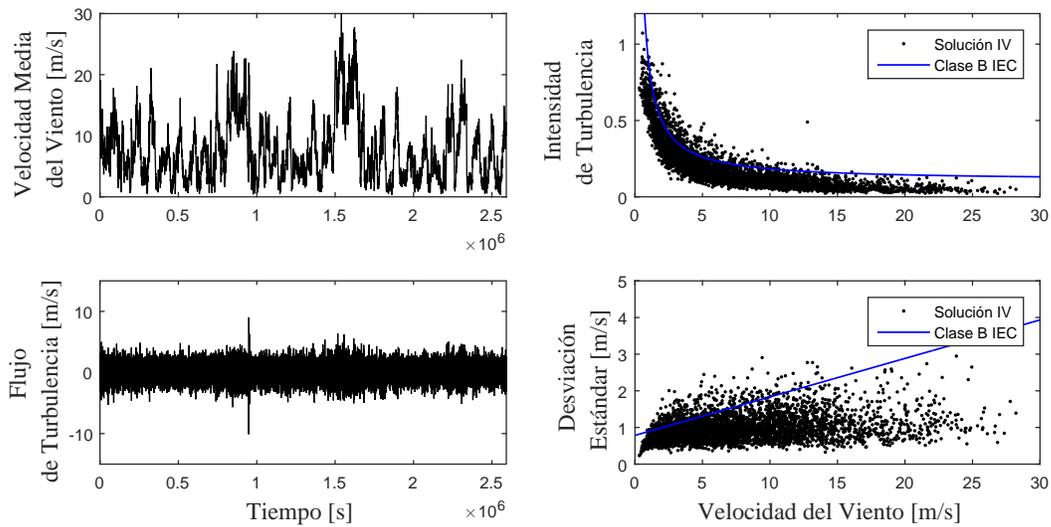


Figura 5.59: Características de la simulación de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución IV para una turbina de clase B.

Clase C IEC

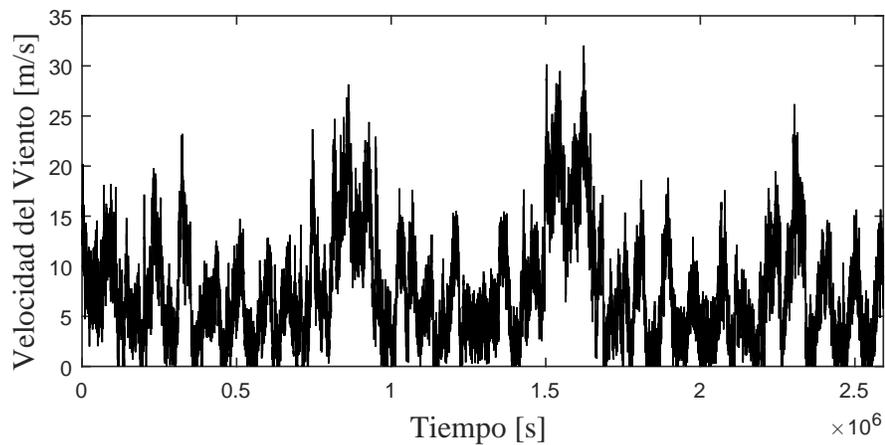


Figura 5.60: Simulación de un mes de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución IV para una turbina de clase C.

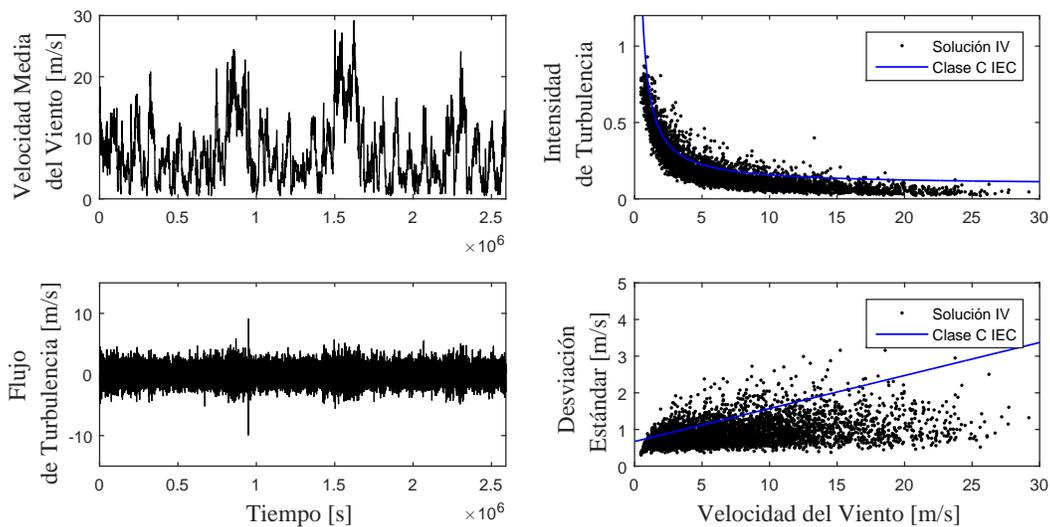


Figura 5.61: Características de la simulación de velocidad de viento generada a partir de la parametrización dada por la solución IV para una turbina de clase C.

OBSERVACIÓN 5.9

1. De las simulaciones anteriores es posible determinar que la mejor parametrización del proceso de OU para el modelo de velocidad de viento en escala de segundos surge de aplicar el esquema número II dado en la tabla 4.1, ya que se obtiene la mejor reproducción de las características de intensidad de turbulencia y desviación estándar del MTN y de acuerdo con [48], en el cual se realiza un análisis de la intensidad de turbulencia de los parques eólicos en tierra donde se reportan características similares.
2. Con los esquemas numéricos I, III, y IV dados en la tabla 4.1 no se obtienen buenos resultados, ya que no siguen el comportamiento de las características dadas en el MTN.

5.2.6. Comparación del modelo con datos reales

En esta sección se hace una comparación entre la velocidad de viento en segundos de una ubicación del mundo real y una simulación del modelo de velocidad de viento en segundos adoptado por el esquema numérico II de la tabla (4.1).

Los datos de velocidad de viento reales fueron obtenidos en [56]. El conjunto de datos reales se muestra en la figura 5.62 y consiste de 604800 valores de velocidades de viento

en segundos perteneciente a la semana del 25 al 31 de diciembre del año 2010.

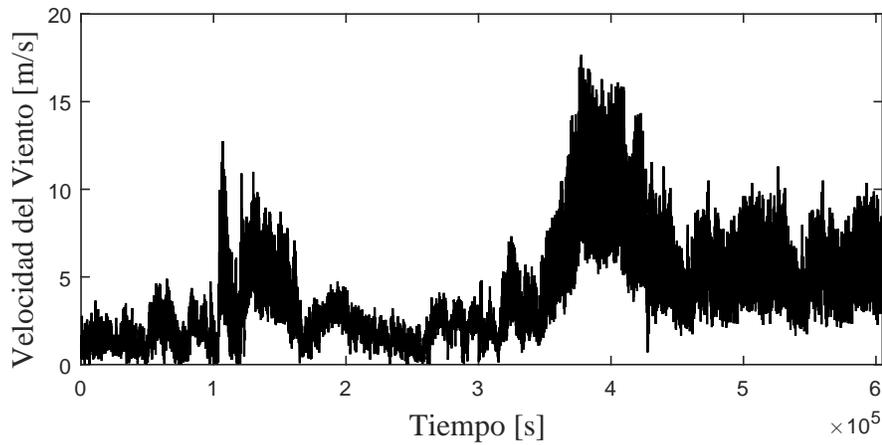


Figura 5.62: Velocidad de viento real en segundos obtenidos de [56].

A este conjunto de datos se le realiza un análisis de intensidad de turbulencia y se obtiene sus características (velocidad media del viento, flujo de turbulencia, intensidad de turbulencia y desviación estándar) y se muestran en la figura 5.63.

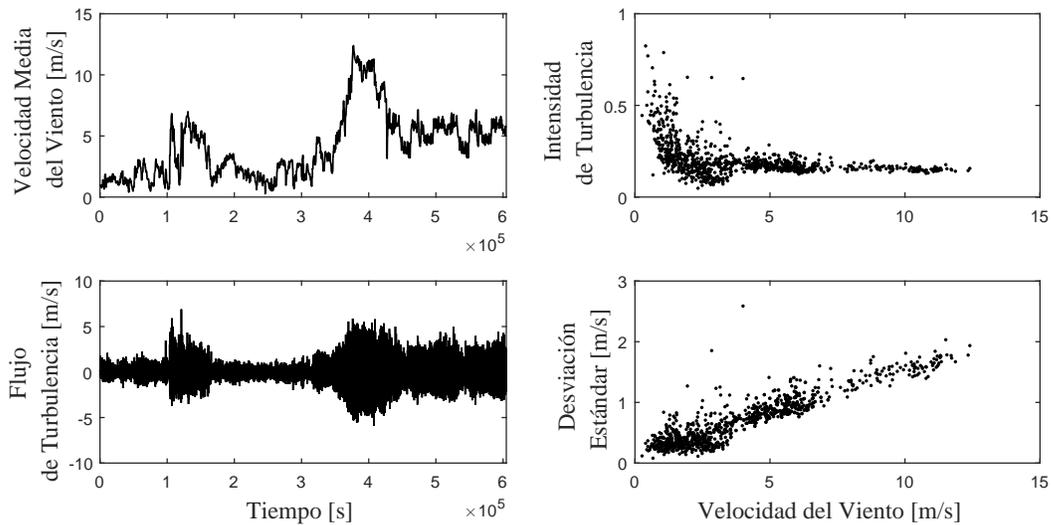


Figura 5.63: Características de datos de velocidad de viento reales.

A continuación, a la intensidad de turbulencia obtenida de los datos, se le realiza un ajuste de curva de ley de potencia de tres parámetros dado como sigue [48]:

$$I_v = \frac{\sigma_v}{\bar{v}} = A\bar{v}^{-B} + C, \quad (5.2)$$

con $A = 0.1779$, $B = 1.047$ y $C = 0.1318$.

En la figura 5.64 se muestra una simulación de velocidad de viento donde el parámetro de velocidad media del viento \bar{v} es tomado del análisis de intensidad de turbulencia (figura 5.63) y el parámetro de intensidad de turbulencia I_v es tomado del ajuste de curva dado por la ecuación (5.2).

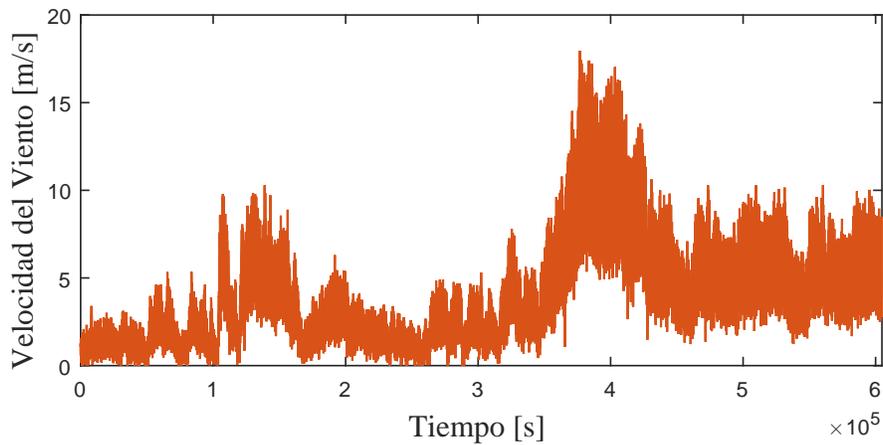


Figura 5.64: Velocidad de viento simulada.

En la figura 5.65 se muestra las características de la simulación.

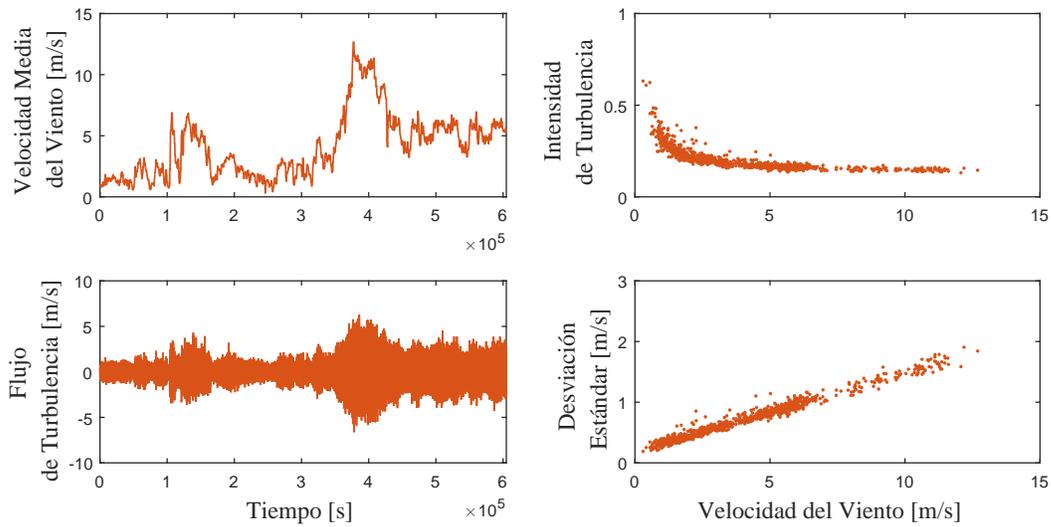


Figura 5.65: Características de datos de velocidad de viento reales.

En la figura 5.66 se muestra la comparación entre los datos de velocidad de viento reales y la simulación.

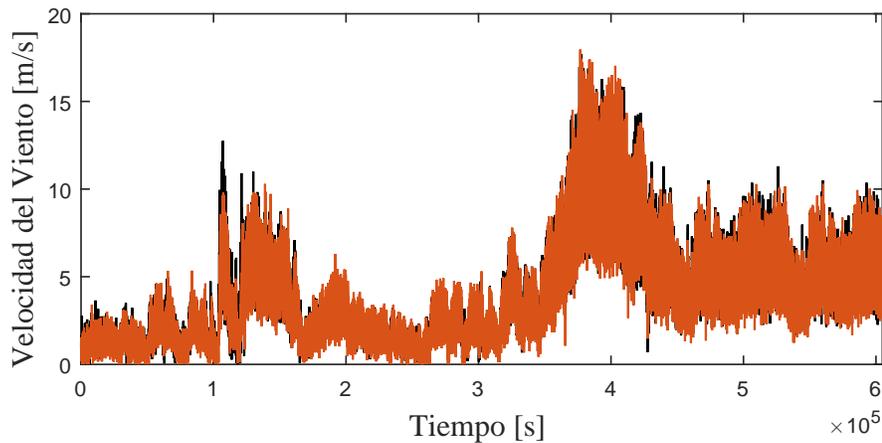


Figura 5.66: Comparación de la velocidad de viento real y la velocidad de viento simulada.

En la figura 5.67 se muestra la comparación entre las características de los datos de velocidad de viento reales y las características de la simulación.

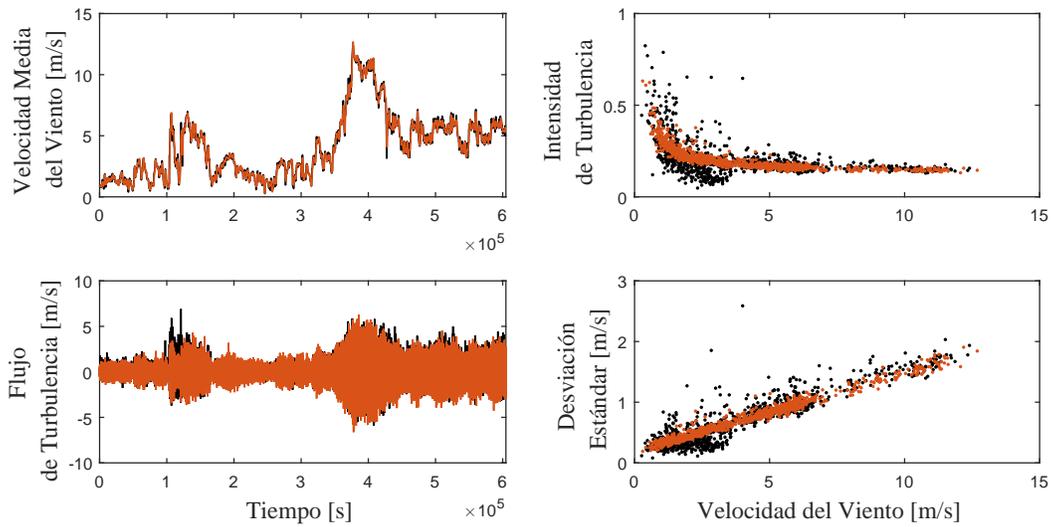


Figura 5.67: Comparación de las características de los datos de velocidad de viento reales y simulaciones.

En la figura 5.68 se muestra el error absoluto entre la intensidad de turbulencia de los datos y la intensidad de turbulencia de la simulación.

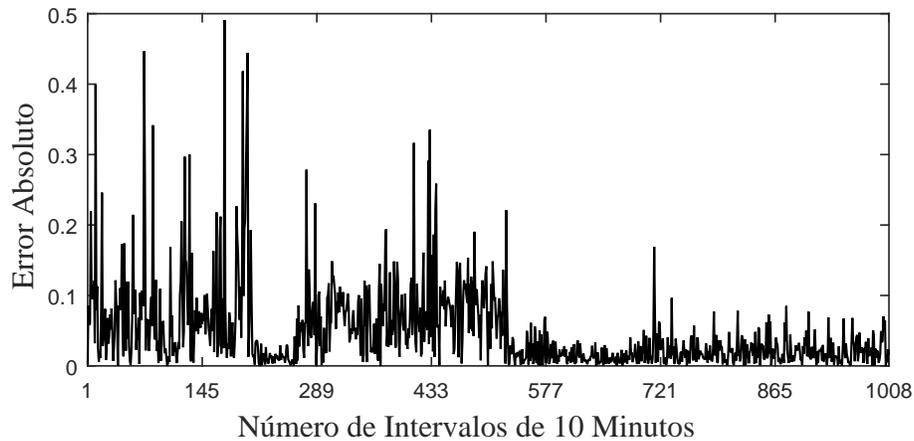


Figura 5.68: Error absoluto entre la intensidad de turbulencia de los datos y la intensidad de turbulencia de la simulación.

OBSERVACIÓN 5.10 *El 87% de la intensidad de turbulencia de la simulación tiene un error absoluto menor a 0.1, con respecto a la intensidad de viento de los datos reales.*

Capítulo 6

Conclusiones, Recomendaciones y Trabajos Futuros

6.1. Conclusiones

En este trabajo se abordó el problema del modelado de la velocidad de viento por medio de EDE. Se presentó el desarrollo de tres modelos para generar trayectorias de velocidades de viento.

Dos de estos modelos son dedicados a simular trayectorias de velocidad de viento en escala de horas y uno a simular trayectorias de velocidad de viento en escala de segundos. Las simulaciones realizadas durante el desarrollo del trabajo muestran que los tres modelos son capaces de reproducir las propiedades estadísticas a las observadas en ubicaciones reales de acuerdo a la escala de tiempo para el que están diseñados.

En una escala de horas las características estadísticas de la velocidad de viento son la distribución de probabilidad y la función de autocorrelación. Una variedad de funciones de densidad de probabilidad que se han propuesto en la literatura científica relacionada. Con respecto a la función de autocorrelación, se ha observado, a partir de los datos de velocidad media del viento por hora, que generalmente se caracteriza por un decaimiento exponencial en el intervalo de horas. Los modelos de velocidad de viento en escala de horas se parametrizan mediante un análisis de datos de mediciones de velocidades de viento de una ubicación del mundo real. En este trabajo, el análisis de los datos para dos ubicaciones de México, donde se encuentran localizados los parques eólicos Oaxaca I, y Eurús arrojan que la distribución Weibull y autocorrelación de decaimiento exponencial son buenas aproximaciones. Dado que se trata de modelos estocásticos estacionarios, no se consideran los efectos diurnos y estacionales.

Pueden observarse pequeñas diferencias entre las trayectorias de velocidades de viento entre los dos modelos en escala de horas, para los dos casos de estudio, lo que conduce a pequeñas diferencias entre los histogramas normalizados y las funciones de autocorrela-

ción. Con respecto a la autocorrelación, se observa ligeramente un mejor comportamiento por parte del modelo II, lo cual se esperaba debido a las diferencias en la formulación. Uno es un modelo compuesto por una EDE y una ecuación algebraica (modelo I). Si bien este modelo es capaz de reproducir la función de densidad de probabilidad, debido a la transformación sin memoria, no se garantiza la autocorrelación de decaimiento exponencial. El otro es un modelo basado en la ecuación de Fokker-Planck, un enfoque analíticamente exacto, ya que la formulación del modelo define los términos de deriva y de volatilidad de tal forma que permite la reproducción de la función de densidad de probabilidad y autocorrelación de decaimiento exponencial (modelo II).

Con respecto al modelo de velocidad de viento en segundos, de los cuatro esquemas numéricos propuestos, los experimentos realizados muestran que el mejor es el esquema numérico II, lo anterior de acuerdo con el MTN y con [48].

De la comparación de un conjunto de datos de velocidades de viento con una simulación por medio del esquema adoptado como modelo de velocidad de viento en segundos, en general, se observan diferencias muy pequeñas entre el conjunto de velocidades de viento reales y la simulación, así como entre sus características.

6.2. Aportaciones

Se presenta el desarrollo de dos modelos de velocidad de viento basados en ecuaciones diferenciales estocásticas en escala de horas planteados en [66, 67] y [68], y son utilizados para modelar la velocidad del viento de dos ubicaciones en México, donde se encuentran ubicados los parques eólicos Oaxaca I y Eurus.

Además, se propone un modelo de velocidades de viento basado en ecuaciones diferenciales estocásticas en escala de segundos, capaz de reproducir las propiedades de la turbulencia de viento.

Los parámetros de cada modelo se definen de acuerdo con los resultados del análisis estadístico de conjuntos de datos de velocidades de viento.

Los modelos están destinados a ser integrados a estudios para evaluar diferentes aspectos relacionados con los sistemas eléctricos.

Todos los modelos se han desarrollado en lenguaje MATLAB®.

6.3. Recomendaciones

- El modelo I en escala de horas no se limita a la distribución Weibull, es decir, puede ser utilizado con cualquier distribución de probabilidad mientras se pueda encontrar la inversa de la FDA.

- El modelo II en escala de horas es general y se puede aplicar para modelar cualquier proceso estacionario con autocorrelación exponencial.
- Si no se cuenta con mediciones de velocidades de viento en lapsos no mayores a diez minutos para construir la función a pedazos m_t en el modelo de velocidad de viento en escala de segundos, se sugiere utilizar la metodología planteada en [40].

6.4. Trabajos futuros

- Incluir los modelos de velocidad de viento en escala de horas desarrollados en este trabajo al realizar estudios de, por ejemplo, la economía y la operación del sistema de eléctrico y la evaluación de la confiabilidad de la capacidad de generación al considerar fuentes de generación eólica.
- Incluir el modelo de velocidad de viento en escala de segundos al realizar estudios dinámicos y control de aerogeneradores.
- Desarrollar modelos de velocidad de viento basados en ecuaciones diferenciales estocásticas más generales.

Referencias

- [1] Ahmed, M. H., Bhattacharya, K., Salama, M. M. A. *Analysis of uncertainty model to incorporate wind penetration in LMP-based energy markets*. IEEE (EPECS), 2011.
- [2] Allen, E. *Modelling with Itô Stochastic Differential Equations*. Springer, 2007.
- [3] Anaya Perez, L. D. *Planeación de la red de transmisión para centrales eoloeléctricas*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, México, D.F., 2012.
- [4] Anderson, P. M., Bose, A. *Stability Simulation Of Wind Turbine Systems*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983.
- [5] Arnold L. *Stochastic differential equations: Theory and applications*. John Wiley & Sons, 1974.
- [6] Beichelt, F. *Applied Probability and Stochastic Processes*. Chapman & Hall/CRC, 2016.
- [7] Bensoussan, A., Brouste, A. *Cox-Ingersoll-Ross model for wind speed modeling and forecasting*. Wind Energy, 2016; 19:1355-1365.
- [8] Billinton, R., Bai G. *Generating capacity adequacy associated with wind energy* IEEE Transactions on Energy Conversion. 19 (3) (2004) 641-646.
- [9] Billinton, R., Huang, D. *Incorporating Wind Power in Generating Capacity Reliability Evaluation Using Different Models*. IEEE Transactions on Power Systems, 2011.

-
- [10] Brett, A. C., Tuller, S. E. *The Autocorrelation of Hourly Wind Speed Observations*. Journal of Applied Meteorology 1991, 30 (6):823-833.
- [11] Brown, R. *Brief account of Microscopical Observations made in the Months of June, July, and August, 1827, on the Particles contained in the Pollen of Plants; and on the general Existence of active Molecules in Organic and Inorganic Bodies*. Philosophical Magazine N. S. 4, 161-173, 1928.
- [12] Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., Bossanyi, E. *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons, 2nd Edition, 2011.
- [13] Carta González, J. A., Calero Pérez, R., Colmenar Santos, A., Castro Gil, M. A. *Centrales de energías renovables: Generación eléctrica con energías renovables*. Pearson Educacion, 2009.
- [14] Carta, J. A., Ramirez, P., Velazquez, S. *A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis: Case studies in the Canary Islands*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 933-955.
- [15] Cyganowski, S., Ombach, J., Platen, E. *From Elementary Probability to Stochastic Differential Equations with MAPLE*. Springer, 2001.
- [16] Dragoon, K. *Valuing Wind Generation on Integrated Power Systems*. Elsevier, 1st Edition, 2010.
- [17] Enríquez Harper, G. *El abc de las energías renovables en los sistemas eléctricos*. Limusa, 1a Edición, 2012.
- [18] Estrada Hernández, D. E. *Aplicación del espectro de potencia para estimar requerimientos de los servicios de reserva de potencia activa*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, 2017.
- [19] Gallegos Sánchez, J. I. *Evaluación de los beneficios de desarrollar la central eololéctria La Venta*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería

- Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, México, D.F., Septiembre 1998.
- [20] Gardiner, C. *Handbook of stochastic methods for physics, chemistry, and the natural sciences*. Springer-Verlag, 3rd Edition, 2004.
- [21] Gasch, R., Tvele, J. *Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2nd Edition, 2012.
- [22] Ghahramani, S. *Fundamentals of Probability, with Stochastic Processes*. Pearson/Prentice Hall, 3rd Edition, 2005.
- [23] Global Wind Energy Council. *Global Wind Report. Annual Market Update 2017*.
- [24] Goswami, D. Y., Kreith, F. *Energy Efficiency and Renewable Energy Handbook*. CRC Press, 2nd Edition, 2016.
- [25] Grigoriu, M. *Applied Non-Gaussian Processes: Examples, Theory, Simulation, Linear Random Vibration, and MATLAB Solutions*. Prentice Hall, 1995.
- [26] Grigoriu, M. *Stochastic Calculus: Applications in Science and Engineering*. Springer, 2002.
- [27] Grigoriu, M. *Stochastic Systems Uncertainty Quantification and Propagation*. Springer, 2012.
- [28] Hernández Aréstigui, M. *Modelado en tiempo real de aerogeneradores de inducción de velocidad fija para estudios de sistemas eléctricos de potencia*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, México, D.F., 2013.
- [29] Ishijara Miyaki, M. J. *Modelos simplificados de aerogeneradores de inducción para estudios de estabilidad a corto plazo de sistemas eléctricos de potencias*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, México, D.F., Noviembre 2010.

-
- [30] Iversen, E. B., Morales, J. M., Møller, J. K., Madsen, H. *Short-term probabilistic forecasting of wind speed using stochastic differential equations*. International Journal of Forecasting 32 (2016) 981-990.
- [31] Jain, P. *Wind Energy Engineering*. McGraw-Hill, 2011.
- [32] Jónsdóttir, G. Margrét, B. H., and Milano, F. *Continuous-Time ARMA Models for Data-based Wind Speed Models*. IEEE (PSCC), 2018.
- [33] Klebner, F. C. *Introduction to stochastic calculus with applications*. 2nd edition. Imperial College Press, 2005.
- [34] Kloeden, P. E., Platen, E. *Numerical solution of stochastic differential equations (Stochastic Modelling and Applied Probability 23)*. Springer, 1994.
- [35] Kloeden, P. E., Platen, E., Schurz, H. *Numerical Solution of SDE Through Computer Experiments*. Springer, 2003.
- [36] Kusiak, A., Li, W., Song, Z. *Dynamic control of wind turbines*. Renewable Energy 35 (2010) 456-463.
- [37] Lei, M., Shiyan, L., Chuanwen, J., Hongling, L., Yan, Z. *A review on the forecasting of wind speed and generated power*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 915-920.
- [38] Leite, A., Borges, C., Falcao, D. *Probabilistic Wind Farms Generation Model for Reliability Studies Applied to Brazilian Sites* IEEE Transactions on Power Systems, 2006.
- [39] Leon-Garcia, A. *Probability, Statistics, and Random Processes For Electrical Engineering*. Prentice Hall, 3rd Edition, 2008.
- [40] Loukatou, A., Howell, S., Johnson, P., Duck, P. *Stochastic wind speed modelling for estimation of expected wind power output*. Applied Energy 228 (2018) 1328-1340.

-
- [41] Manwell, J. F., McGowan, J. G., Rogers, A. L. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. Wiley, 2nd Edition, 2009.
- [42] Meena, N. K., Swarnkar, A., Gupta N., Niazi, K. R. *Dispatchable Wind Power Generation Planning for Distribution Systems*. IEEE (ICPS), 2017.
- [43] Morales J. M., Mínguez R., Conejo A. J. *A methodology to generate statistically dependent wind speed scenarios*. Applied Energy 87 (2010) 843-855.
- [44] Muhandó E. B., Senjyu T., Yona A., Kinjo H., Funabashi T. *Regulation of WTG dynamic response to parameter variations of analytic wind stochasticity*. Wind Energy 2008 11(2):133-150.
- [45] Oksendal, B. *Stochastic Differential equations: An introduction with applications*. Springer-Verlag, 5th Edition, 2000.
- [46] Perninge, M., Amelin, M., Knazkins, V. *Load modeling using the Ornstein-Uhlenbeck process*. IEEE PECon, 2008.
- [47] Radosavljević J., Jevtić M., Klimenta D., Nebojsa A. *Optimal Power Flow for Distribution Networks with Distributed Generation*. Serb. J. Electr. Eng. 12(2):145-170, 2015.
- [48] Ren, G., Liu, J., Wan, J., Li, F., Guo, Y., Yu, D. *The analysis of turbulence intensity based on wind speed data in onshore wind farms*. Renewable Energy 123 (2018) 756-766.
- [49] Reyes Andrade, V. *Implementación de un emulador de turbina eólica*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, México, D.F., Diciembre 2015.
- [50] Risken, H. *The Fokker-Planck Equation Method of Solution and Application*. Springer-Verlag, 1989.

-
- [51] Secretaría de Energía. *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2018-2032*. Disponible en <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/331770/PRODESEN-2018-2032-definitiva.pdf>
- [52] Shi, L. B., Weng, Z. X., Yao, L. Z., Ni, Y. X. *An Analytical Solution for Wind Farm Power Output*. IEEE Transactions on Power Systems, 2014.
- [53] Shi, L., Luo, J., Ni, Y. *A Solution of Optimal Power Flow Incorporating Wind Generation and Power Grid Uncertainties*. IEEE Access, 2018.
- [54] Steele, J. M. *Stochastic Calculus and Financial Applications (Stochastic Modelling and Applied Probability 45)*. Springer, 2000.
- [55] Stewart, W. J. *Probability, Markov Chains, Queues, and Simulation: The Mathematical Basis of Performance Modeling*. Princeton University Press, 2009.
- [56] UCAR/NCAR-Earth Observing Laboratory, 'PCAPS ISFS 1 second data. Version 1.0'. UCAR/NCAR - Earth Observing Laboratory, 2013. Noviembre 2018.
- [57] Taylor, H. M., Karlin, S. *An Introduction to Stochastic Modeling*. Academic Press, 3rd Edition, 1998.
- [58] Tong, W. *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*. WIT Press, 2010.
- [59] Villarubia López, M. *Ingeniería de la energía eólica*. Alfaomega, 2013.
- [60] Wagner, H. J., Mathur, J. *Introduction to Wind Energy Systems: Basics, Technology and Operation*. Springer International Publishing, 3rd Edition, 2018.
- [61] World Energy Council. *World Energy Resources Wind 2016*. <https://www.worldenergy.org>

-
- [62] Wolfgang, P., Jörg, B. *Stochastic Processes: From Physics to Finance*. Springer International Publishing, 2nd Edition, 2013.
- [63] http://www.mathwave.com/help/easyfit/html/analyses/goodness_of_fit/kolmogorov-smirnov.html Octubre 2018.
- [64] Xue, D., Chen, Y. *Solving Applied Mathematical Problems with MATLAB*. Chapman & Hall/CRC, 2009
- [65] Yuan H., Haoran L., Zhaohong B., Baorong Z. *Unified probabilistic gas and power flow*. J. Mod. Power Syst. Clean Energy (2017) 5(3):400-411.
- [66] Zárate-Miñano, R., Anghel, M. F., Milano, F. *Continuous wind speed models based on stochastic differential equations*. Applied Energy 104 (2013) 42-49.
- [67] Zárate-Miñano, R., Madia Mele, F., Milano, F. *SDE-based Wind Speed Models with Weibull Distribution and Exponential Autocorrelation*. IEEE, 2016.
- [68] Zárate-Miñano, R., Milano, F. *Construction of SDE-based wind speed models with exponentially decaying autocorrelation*. Renewable Energy 94 (2016) 186-196.
- [69] Zhang, M. H. *Wind Resource Assessment and Micro-Siting: Science and Engineering*. John Wiley & Sons Inc, 2015.

Apéndice A

Conceptos Básicos de las Ecuaciones Diferenciales Estocásticas

A.1. Movimiento Browniano

En 1828 el botánico inglés Robert Brown publicó un artículo en el que describió el movimiento de una partícula de polen suspendida en cierto fluido, la cual se movía de forma totalmente errática y aleatoria [11]. El fenómeno natural que ahora se conoce como movimiento Browniano, en su etapa inicial de investigación fue objeto de especulación y mucha discusión entre la comunidad científica de aquella época. Los primeros enfoques para modelar matemáticamente el movimiento Browniano fueron realizados por Louis Bachelier en 1900, cuyo objetivo era proporcionar un modelo para los mercados financieros y Albert Einstein en 1905 quería modelar el movimiento de una partícula suspendida en un líquido, quien además presentó la primera descripción matemática de este fenómeno utilizando las leyes de la física. Fue casi cien años después de las observaciones de Brown que Norbert Wiener dio la primera formulación estrictamente matemática del movimiento Browniano. Una forma de reconocer la contribución de Wiener es llamar al modelo matemático del movimiento Browniano, proceso estocástico de Wiener o más simplemente proceso de Wiener, aunque comúnmente también se le llama movimiento Browniano [22, 33, 54].

DEFINICIÓN A.1 *Un movimiento Browniano o proceso de Wiener con parámetro de varianza σ^2 es un proceso estocástico \hat{W}_t que toma valores en los números reales que satisface*

I. $\hat{W}_0 = 0$.

II. *Para cualquier $t_1 < t_2 < \dots < t_n$ las variables aleatorias*

$$\hat{W}_{t_2} - \hat{W}_{t_1}, \hat{W}_{t_3} - \hat{W}_{t_2}, \dots, \hat{W}_{t_n} - \hat{W}_{t_{n-1}}$$

son independientes.

- III. Para cualquier $s < t$, la variable aleatoria $\hat{W}_t - \hat{W}_s$, tiene la distribución Gaussiana con media 0 y varianza $(t - s)\sigma^2$.
- IV. Las trayectorias son continuas, es decir, la función $t \mapsto \hat{W}_t$ es una función continua de t .

OBSERVACIÓN A.1

1. Si $\sigma^2 = 1$, entonces se dice que \hat{W}_t es el proceso estándar de Wiener.
2. Un proceso arbitrario de Wiener se puede reducir a un proceso estándar de Wiener mediante la transformación $W_t = \hat{W}_t/\sigma$, por esta razón en un gran número de referencias que abordan este tema solo es suficiente derivar resultados para el proceso estándar de Wiener. [22, 57].

A.2. Ecuaciones Diferenciales Estocásticas

Las ecuaciones diferenciales deterministas son ampliamente utilizadas en muchas de las ramas de la ciencia ya que describen la dinámica de un sistema en un periodo de tiempo. Con la finalidad de definir las Ecuaciones Diferenciales Estocásticas (EDE) se parte de una Ecuación Diferencial Ordinaria (EDO) de la forma [33]:

$$\frac{dx(t)}{dt} = a(t, x(t)) \quad \text{condición inicial } x(0) = x_0. \quad (\text{A.1})$$

Una EDE se puede pensar como uno EDO perturbada por una v.a.

$$\frac{dx(t)}{dt} = a(t, x(t)) + \text{perturbación aleatoria}. \quad (\text{A.2})$$

Tal perturbación aleatoria está compuesta por el producto de los términos $b(t, x(t))$ y $\xi(t)$ denominados intensidad de la perturbación y proceso de ruido blanco respectivamente, entonces, reescribiendo (A.2) se tiene

$$\frac{dx(t)}{dt} = a(t, x(t)) + b(t, x(t))\xi(t). \quad (\text{A.3})$$

Bajo un marco conceptual distinto se puede definir al proceso de ruido blanco como la derivada del proceso de Wiener [5], es decir

$$\xi(t) = \frac{dW_t}{dt}. \quad (\text{A.4})$$

La solución $x(t)$ se convierte en un proceso estocástico $\{X_t, t \in [0, T_f]\}$. Teniendo en cuenta lo anterior (A.2) puede escribirse como

$$dX_t = a(t, X_t)dt + b(t, X_t)dW_t. \quad (\text{A.5})$$

La ecuación (A.5) es lo que se conoce como una EDE y cuya forma integral está dada por

$$X_t = X_0 + \int_0^t a(s, X_s)ds + \int_0^t b(s, X_s)dW_s, \quad (\text{A.6})$$

donde la primera integral es una integral de Lebesgue (o Riemann) y la segunda integral suele ser una integral de Itô, en ese caso (A.6) se denomina proceso de Itô y (A.5) se denomina EDE de Itô. A la función $a(t, x)$ se le conoce como coeficiente de deriva y a la función $b(t, x)$ se le llama coeficiente de difusión o volatilidad.

En el siguiente teorema se establecen las condiciones de regularidad para los coeficientes $a(t, x)$ y $b(t, x)$ que garantizan la existencia y la unicidad para soluciones de ecuaciones diferenciales estocásticas.

TEOREMA A.1 (EXISTENCIA Y UNICIDAD) *Supongamos que la condición inicial X_0 tiene un segundo momento $\mathbb{E}[X_0^2] < \infty$ y es independiente de $\{W_t : t \geq 0\}$. Sea $T_f > 0$ y $a(t, x)$, $b(t, x)$ funciones medibles que satisfacen:*

(Condición de Lipschitz)

$$|a(t, x) - a(t, y)| + |b(t, x) - b(t, y)| \leq D|x - y|; x, y \in \mathbb{R}, t \in [0, T_f]$$

para alguna contante D .

(Restricción en el crecimiento)

$$|a(t, x)| + |b(t, x)| \leq K(1 + |x|); x \in \mathbb{R}, t \in [0, T_f]$$

para alguna contante K .

Entonces la ecuación (A.5) tiene una solución continua única y que satisface la condición inicial X_0 .

El teorema anterior asegura únicamente la existencia de una solución, más no establece la forma de encontrar la solución a una ecuación diferencial estocástica. Para resolver este tipo de ecuaciones se utiliza la fórmula de Itô que se enuncia a continuación.

TEOREMA A.2 (FÓRMULA DE ITÔ) *Si $\{X_t\}$ es un proceso de Itô dado por (A.6) y $f(t, x) \in C^{1,2}[0, \infty) \times \mathbb{R}$, entonces el proceso $\{Y_t = f(t, X_t)\}$ es también un proceso de Itô y satisface la ecuación estocástica*

$$dY_t = \frac{\partial f}{\partial t}(t, X_t)dt + \frac{\partial f}{\partial x}(t, X_t)dX_t + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(t, X_t)(dX_t)^2 \quad (\text{A.7})$$

donde $(dX_t)^2 = (dX_t)(dX_t)$ se calcula de acuerdo a las reglas

$$dt dt = dt dW_t = dW_t dt = 0, \quad dW_t dW_t = dt.$$

OBSERVACIÓN A.2 Para mayor detalles sobre los teoremas A.1 y A.2 véase [45].

A.3. Simulación de ecuaciones diferenciales estocásticas

A.3.1. Métodos explícitos

Se considera un proceso de Itô $X = \{X_t, 0 \leq t \leq T_f\}$ que satisface la ecuación diferencial estocástica

$$dX_t = a(t, X_t)dt + b(t, X_t)dW_t \quad (\text{A.8})$$

en $0 \leq t \leq T_f$ con el valor inicial X_0 .

Para una discretización de tiempo, que por simplicidad se considerará equidistante, $0 = t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n < t_N = T_f$ en un intervalo $[0, T_f]$ con incremento $h = t_{n+1} - t_n = T_f/N$ para un número entero N , donde $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$, el método estocástico de Euler, también llamado método de Euler-Maruyama es dado por

$$X_{n+1} = X_n + a(t_n, X_n)h + b(t_n, X_n)\Delta W_n, \quad (\text{A.9})$$

dónde

$$\Delta W_n = W_{t_{n+1}} - W_{t_n}$$

es el incremento distribuido $\mathcal{N}(0, \sqrt{h})$ del proceso Wiener W en $[t_n, t_{n+1}]$. De la sección A.1 se sabe que estos incrementos son variables gaussianas aleatorias independientes con media

$$\mathbb{E}[\Delta W_n] = 0 \quad (\text{A.10})$$

y varianza

$$\mathbb{E}[(\Delta W_n)^2] = h \quad (\text{A.11})$$

En contraste con el caso determinista, existen varios tipos diferentes de convergencias que son útiles para esquemas numéricos estocásticos. Se distingue entre convergencia fuerte y débil dependiendo de si se requiere que las realizaciones o solo sus distribuciones de probabilidad estén cerca. Se dice que un esquema numérico estocástico converge:

- con orden fuerte γ si

$$\|X_{T_f} - X_{N T_f}^h\| \leq K_{T_f} h^\gamma \quad (\text{A.12})$$

- con orden débil β si

$$|\mathbb{E}[g(X_{T_f})] - \mathbb{E}[g(X_{N_T}^h)]| \leq K_{g,T_f} h^\beta \quad (\text{A.13})$$

para cada polinomio g . Los errores en (A.12) y (A.13) son errores de discretización global, por lo que γ y β son los órdenes fuerte y débil correspondientes, respectivamente, del esquema, [15].

Si, agregamos al esquema de Euler (A.9) el término

$$\frac{1}{2}b(t_n, X_n) \frac{\partial b}{\partial x}(t_n, X_n) \{(\Delta W_n)^2 - h\} \quad (\text{A.14})$$

entonces obtenemos el esquema de Milstein

$$X_{n+1} = X_n + a(t_n, X_n)\Delta + b(t_n, X_n)\Delta W_n + \frac{1}{2}b(t_n, X_n) \frac{\partial b}{\partial x}(t_n, X_n) \{(\Delta W_n)^2 - h\} \quad (\text{A.15})$$

Bajo las condiciones apropiadas sobre los coeficientes de la EDE, el esquema de Milstein (A.15) converge con el orden fuerte $\gamma = 1.0$, que es una mejora en el orden fuerte $\gamma = \frac{1}{2}$ del esquema estocástico de Euler (A.9). Para la convergencia débil, tanto los esquemas de Euler como Milstein tienen un orden débil $\beta = 1.0$, por lo que no hay ninguna mejora en la tasa de convergencia aquí. Obsérvese que el nuevo término en el esquema de Milstein desaparece cuando la EDE tiene ruido aditivo ya que $\frac{\partial b}{\partial x}(t, x) \equiv 0$. Para tales EDE, los esquemas estocásticos de Euler y Milstein son idénticos, por lo que el esquema estocástico de Euler converge con el orden fuerte $\gamma = 1.0$ para EDE con ruido aditivo, [15].

A.3.2. La Integral $b_2(X_t)$

Esta sección se dedica al desarrollo de la integral $b_2(X_t)$ dada por:

$$b_2(X_t) = -\frac{k}{\lambda^k} \int_0^{X_t} \left(Z_s - \lambda \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \right) Z_s^{k-1} e^{-\left(\frac{Z_s}{\lambda}\right)^k} dZ_s. \quad (\text{A.16})$$

que fue utilizada en el desarrollo del modelo II de la sección 4.1.3.

Ahora, utilizando la fórmula de integración por partes (A.16) queda como sigue:

$$\begin{aligned} \vartheta &= Z_s - \lambda \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right), \quad d\vartheta = dZ_s \\ d\omega &= Z_s^{k-1} e^{-\left(\frac{Z_s}{\lambda}\right)^k}, \quad \omega = -\frac{\lambda^k e^{-\left(\frac{Z_s}{\lambda}\right)^k}}{k} \\ b_2(X_t) &= \frac{-\lambda^k \left(Z_s - \lambda \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \right) e^{-\left(\frac{Z_s}{\lambda}\right)^k}}{k} - \int -\frac{\lambda^k e^{-\left(\frac{Z_s}{\lambda}\right)^k}}{k} dZ_s. \end{aligned} \quad (\text{A.17})$$

Resolviendo ahora

$$\int -\frac{\lambda^k e^{-\left(\frac{Z_s}{\lambda}\right)^k}}{k} dZ_s, \quad (\text{A.18})$$

por sustitución

$$u = \frac{Z_s}{\lambda}, \quad \lambda du = dZ_s, \quad (\text{A.19})$$

la integral dada por (A.18) queda como sigue:

$$-\frac{\lambda^{k+1}}{k} \int e^{-u^k} du, \quad (\text{A.20})$$

la cual es igual a

$$\int e^{-u^k} du = -\frac{\Gamma\left(\frac{1}{k}, u^k\right)}{k}. \quad (\text{A.21})$$

Entonces

$$\int -\frac{\lambda^k e^{-\left(\frac{Z_s}{\lambda}\right)^k}}{k} dZ_s = \frac{\lambda^{k+1} \Gamma\left(\frac{1}{k}, \left(\frac{Z_s}{\lambda}\right)^k\right)}{k^2} \quad (\text{A.22})$$

Reemplazando las integrales ya resueltas, se obtiene la integral dada por (A.16) sin evaluar

$$b_2(X_t) = -\frac{k}{\lambda^k} \left[\frac{-\lambda^k \left(Z_s - \lambda \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right) e^{-\left(\frac{Z_s}{\lambda}\right)^k}}{k} - \frac{\lambda^{k+1} \Gamma\left(\frac{1}{k}, \left(\frac{Z_s}{\lambda}\right)^k\right)}{k^2} \right] \Bigg|_0^{X_t}. \quad (\text{A.23})$$

Simplificando

$$b_2(X_t) = \left[\left(Z_s - \lambda \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right) e^{-\left(\frac{Z_s}{\lambda}\right)^k} + \frac{\lambda \Gamma\left(\frac{1}{k}, \left(\frac{Z_s}{\lambda}\right)^k\right)}{k} \right] \Bigg|_0^{X_t}, \quad (\text{A.24})$$

evaluando se obtiene la representación explícita de $b_2(X_t)$

$$b_2(X_t) = \left(X_t - \lambda \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right) e^{-\left(\frac{X_t}{\lambda}\right)^k} + \frac{\lambda \Gamma\left(\frac{1}{k}, \left(\frac{X_t}{\lambda}\right)^k\right)}{k} \quad (\text{A.25})$$

donde $\Gamma(\cdot)$ es la función Gamma (2.15) y $\Gamma(\cdot, \cdot)$ es la función Gamma incompleta dada por:

$$\Gamma(\eta, x) = \int_x^\infty t^{\eta-1} e^{-t} dt. \quad (\text{A.26})$$

Apéndice B

Herramientas para el ajuste de datos

B.1. Pruebas de bondad de ajuste

Las pruebas de bondad de ajuste miden la compatibilidad de una muestra aleatoria con una función de distribución de probabilidad teórica. En otras palabras, estas pruebas muestran qué tan bien la distribución que seleccionó se ajusta a un conjunto de datos.

B.1.1. Prueba de Kolmogorov-Smirnov

Esta prueba se utiliza para decidir si una muestra proviene de una distribución continua hipotética. Se basa en la función de distribución acumulativa empírica. Supongamos que tenemos una muestra aleatoria x_1, \dots, x_n de alguna distribución con función de distribución acumulativa $F(x)$. La función de distribución acumulativa empírica se denota por [63]:

$$F_n(x) = \frac{1}{n} [\text{Número de observaciones} \leq x] \quad (\text{B.1})$$

La estadística de *Kolmogorov-Smirnov* (D) se basa en la mayor diferencia vertical entre la función de distribución acumulativa teórica y empírica:

$$D = \max_{1 \leq i \leq n} \left(F(x_i) - \frac{i-1}{n}, \frac{i}{n} - F(x_i) \right) \quad (\text{B.2})$$

Las hipótesis nula y alternativa son:

H_0 : los datos siguen la distribución especificada;

H_A : los datos no siguen la distribución especificada.

La hipótesis con respecto a la forma de distribución se rechaza al nivel de significación elegido (α) si el estadístico de prueba, D , es mayor que el valor crítico obtenido de una tabla. Los valores fijos de α (0.01, 0.05, etc.) se usan generalmente para evaluar la hipótesis

nula (H_0) en varios niveles de significación. Un valor de 0.05 se usa normalmente para la mayoría de las aplicaciones. Con lo anterior, el criterio para la toma de decisión es:

- Si $D \leq D\alpha \Rightarrow$ Aceptar H_0
- Si $D > D\alpha \Rightarrow$ Rechazar H_0

B.1.2. Prueba de Anderson-Darling

Esta es una prueba general para comparar el ajuste de una función de distribución acumulativa observada con una función de distribución acumulativa esperada. Esta prueba le da más peso a las colas que la prueba de Kolmogorov-Smirnov.

La estadística Anderson Darling (A^2) está definida como [63]:

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i - 1) [\ln F(X_i) + \ln(1 - F(X_{n-i+1}))] \quad (\text{B.3})$$

Las hipótesis nula y alternativa son:

H_0 : los datos siguen la distribución especificada;

H_A : los datos no siguen la distribución especificada.

La hipótesis con respecto a la forma de distribución se rechaza al nivel de significación elegido (α) si el estadístico de prueba, D , es mayor que el valor crítico obtenido de una tabla. Los valores fijos de α (0.01, 0.05, etc.) se usan generalmente para evaluar la hipótesis nula (H_0) en varios niveles de significación. Un valor de 0.05 se usa normalmente para la mayoría de las aplicaciones. Con lo anterior, el criterio para la toma de decisión es:

- Si $D \leq D\alpha \Rightarrow$ Aceptar H_0
- Si $D > D\alpha \Rightarrow$ Rechazar H_0

B.2. Ajuste de curva

Dado un conjunto de datos $x_i, y_i, i = 1, 2, \dots, N$, y la función original conocida como la *función prototipo*, $\hat{y}(x) = f(\mathbf{a}, x)$, donde \mathbf{a} es el vector de coeficientes no determinados, el objetivo de la aproximación de mínimos cuadrados es encontrar los coeficientes no determinados que minimizan la función objetivo [64]:

$$J = \min_{\mathbf{a}} \sum_{i=1}^N [y_i - \hat{y}(x_i)]^2 = \min_{\mathbf{a}} \sum_{i=1}^N [y_i - f(\mathbf{a}, x_i)]^2 \quad (\text{B.4})$$

La función de MATLAB `lsqcurvefit()` (Optimization Toolbox) se puede utilizar para resolver los problemas de ajuste de curvas de mínimos cuadrados. La sintaxis de la

función es $[\mathbf{a}, J_m] = \text{lsqcurvefit}(fun, \mathbf{a}_0, \mathbf{x}, \mathbf{y})$, donde *fun* es la descripción de MATLAB de la función de prototipo. Puede ser una función M, una anónima o una función en línea. El argumento \mathbf{a}_0 es un vector que contiene la conjetura inicial de \mathbf{a} . Los vectores \mathbf{x} y \mathbf{y} almacenan respectivamente los datos de entrada y salida. Los coeficientes indeterminados se devuelven en un vector \mathbf{a} , y la función objetivo está en J_m .

Apéndice C

Códigos en Matlab

C.1. Modelos en escala de horas

C.1.1. Modelo I

%Este código fue utilizado para simular la trayectoria de velocidad de
%viento del modelo I para el caso de estudio OAU

```
randn('state',14);
T=4416;
h=1;
n=T/h;
dW=sqrt(h)*randn(1,n);
alpha=0.0300624414;b=sqrt(2*alpha);lambda=6.751262;k=1.821892;
steps=n;
Y=zeros(1,steps);
X=zeros(1,steps);
y0=0.134939514;
yold=y0;
x0=lambda*(-log(1-cdf('Normal',y0,0,1)))^(1/k);
for i=1:steps,
f=yold+(h/2)*(-alpha*yold-alpha*yold)+b*sum(dW(1,(i:i)))-yold;
fp=-alpha*h/2-1;
Y(i)=yold-f/fp;
X(i)=lambda*(-log(1-cdf('Normal',Y(i),0,1)))^(1/k);
yold=Y(i);
end
figure(1); hold on;% grid on;
xlim([0,84]);ylim([0,16]);
plot(0:h:T,[x0,X])
```

```

hleg = legend('Modelo I');
xlabel('Tiempo [h]', 'FontName', 'timesnewroman', 'FontSize', 14);
ylabel('Velocidad de Viento [m/s]', 'FontName', 'timesnewroman',
'FontSize', 14);

```

C.1.2. Modelo II

```

%Este codigo fue utilizado para simular la trayectoria de velocidad de
%viento del modelo II para el caso de estudio EUR
randn('state',80);
T=84;
h=1;
n=T/h;
dW=sqrt(h)*randn(1,n);
alpha=0.0266761804;lambda=7.279205;k=1.668606;
steps=n;
Y=zeros(1,steps);
X=zeros(1,steps);
media=lambda*gamma(1+1/k);
x0=media;
xold=x0;
for i=1:steps,
a=-alpha*(xold-media);
b1=2*alpha/(k/lambda*((xold/lambda)^(k-1))*exp(-(xold/lambda)^k));
b2=(xold-lambda*gamma((1/k)+1))*(exp(-(xold/lambda)^k))
+lambda*gamma((1/k),(xold/lambda)^k)/k;
b=sqrt(b1*b2);
db=-((2*alpha*exp((xold/lambda)^k)*(k-1)*(exp(-(xold/lambda)^k)*
(xold-lambda*gamma(1/k+1))+(lambda*gamma(1/k,(xold/lambda)^k))/k))
/(k*(xold/lambda)^k)-2*alpha*exp((xold/lambda)^k)*(exp(-(xold/lambda)^k)
*(xold-lambda*gamma(1/k+1))+(lambda*gamma(1/k,(xold/lambda)^k))/k)+
(2*lambda*alpha*exp((xold/lambda)^k)*(xold/lambda)^(1-k)*(exp(-(xold/
lambda)^k)*((xold/lambda)^k)^(1/k-1)*(xold/lambda)^(k-1)-exp(-(xold/
lambda)^k)+(k*exp(-(xold/lambda)^k)*(xold-lambda*gamma(1/k+1))*(xold/
lambda)^(k-1))/lambda))/k)/(2*((2*lambda*alpha*exp((xold/lambda)^k)*
(xold/lambda)^(1-k)*(exp(-(xold/lambda)^k)*(xold-lambda*gamma(1/k+1))
+(lambda*gamma(1/k,(xold/lambda)^k))/k))/k)^(1/2));
M=xold+(h/2)*(a+a)+b*sum(dW(1,(i:i)))+1/2*b*db*((sum(dW(1,(i:i))))^2-h)
-xold;
Mp=-alpha*h/2-1;
X(i)=xold-M/Mp;

```

```

xold=X(i);
end
figure(1); hold on;% grid on;
xlim([0,84]);ylim([0,20]);
plot(0:h:T,[x0,X])
hleg = legend('Modelo II');
xlabel('Tiempo [h]','FontName','timesnewroman','FontSize',14);
ylabel('Velocidad de Viento [m/s]','FontName','timesnewroman',
'FontSize',14);

```

C.2. Modelo en escala de segundos

```

%Este codigo fue utilizado para simular la trayectoria de velocidad de
%viento del modelo en escala de segundos
D=dlmread('C:\CaboPulmoAbril2013.csv',' ',' ');
noseg=2592000;
nomin=noseg/60;
noperdiezmin=noseg/(60*10);
datosmedidos=D;
x0=13.63888889;
nx=zeros(1,noseg+1);
nx(1)=x0;
nt=zeros(1,noseg+1);
nt(1)=0;
for i=2:noseg+1
nt(i)=nt(i-1)+1/60;
end
xa=[x0,datosmedidos];
k=0;
for i=1:noperdiezmin
for j=1:600
nx(1+k+j)=(xa(i+1)-xa(i))/10*nt(k+j)-((xa(i+1)-xa(i))/10)*((i-1)*10)+xa(i);
end
k=i*600;
end
Iref=0.12;
steps=nomin/10;
vvm0=(datosmedidos(1)+x0)/2;
ds0=Iref*(0.75*(vvm0)+5.6);
i0=ds0/vvm0;

```

```

theta=vvm0;
alpha=(1/i0)^2/2;
ou0=zeros(1,600);
pasoseg=1/60;
dW2=sqrt(pasoseg)*randn(1,600);
W2=cumsum(dW2(1,:));
rold=0;
for i=1:600,
%f0=rold+(pasoseg/2)*(-alpha*rold-alpha*r)+theta*sum(dW2(1,(i:i)))-r;
f0=rold+(pasoseg/2)*(-alpha*rold-alpha*rold)+theta*sum(dW2(1,(i:i)))-rold;
f0p=-alpha*pasoseg/2-1;
ou0(i)=rold-f0/f0p;
rold=ou0(i);
end
VVM=zeros(1,steps-1);
OU=zeros(1,(steps-1)*600);
SD=zeros(1,steps-1);
I=zeros(1,steps-1);
THETA=zeros(1,steps-1);
ALPHA=zeros(1,steps-1);
dW3=sqrt(pasoseg)*randn(1,(steps-1)*600);
W3=cumsum(dW3(1,:));
zold=rold;
i=1;
for j=1:steps-1
VVM(j)=(datosmedidos(j+1)+datosmedidos(j))/2;
SD(j)=Iref*(0.75*(VVM(j))+5.6);
I(j)=SD(j)/VVM(j);
THETA(j)=VVM(j);
ALPHA(j)=(1/I(j))^2/2;
for i=i:i+599
F=zold+(pasoseg/2)*(-ALPHA(j)*zold-ALPHA(j)*z)+THETA(j)*sum(dW3(1,(i:i)))-z;
F=zold+(pasoseg/2)*(-ALPHA(j)*zold-ALPHA(j)*zold)+THETA(j)*sum(dW3(1,(i:i)))-zold;
Fp=-ALPHA(j)*pasoseg/2-1;
OU(i)=zold-F/Fp;
zold=OU(i);
end
i=i+1;
end

```

```
vvps=nx+[0,ou0,0U];
for i=1:length(vvps)
if vvps(i)<0
vvps(i)=vvps(i)*(-1);
else
vvps(i)=vvps(i);
end
end
Y=vvps;
Periodos=zeros(noperdiezmin,600);
k=1;
mu=zeros(1,noperdiezmin);
sigma=zeros(1,noperdiezmin);
IT=zeros(1,noperdiezmin);
for i=1:noperdiezmin
for j=1:600
Periodos(i,j)=Y(1,j+k);
end
k=k+600;
end
for i=1:noperdiezmin
mu(i)=mean(Periodos(i,:));
sigma(i)=std(Periodos(i,:));
IT(i)=sigma(i)/mu(i);
end
Periodosaux=zeros(noperdiezmin,600);
for i=1:noperdiezmin
Periodosaux(i,:)=Periodos(i,:)-mu(i);
end
FT=zeros(noseg,1);
k=0;
for i=1:noperdiezmin
for j=1:600
FT(k+j)=Periodosaux(i,j);
end
k=i*600;
end
MU=zeros(1,noseg);
for i=1:noseg
MU(i)=Y(i+1)-FT(i);
```

```
end
figure(1); hold on;% grid on;
xlim([0,noperdiezmin]);ylim([0,25]);
plot(0:noperdiezmin,[x0,D]);
xlabel('Periodos de 10 minutos','FontName','timesnewroman','FontSize',14);
ylabel('Velocidad Media del Viento [m/s]','FontName','timesnewroman',
'FontSize',14);
figure(2); hold on;% grid on;
xlim([0,nomin*60]);ylim([0,30]);
plot(0:1:nomin*60,vvps)
xlabel('Tiempo [s]','FontName','timesnewroman','FontSize',14);
ylabel('Velocidad del Viento [m/s]','FontName','timesnewroman',
'FontSize',14);
figure(3); hold on;% grid on;
subplot(2,2,1)
xlim([0,noseg]);ylim([0,30]);
plot(1:nomin*60,MU);
xlabel('Tiempo [s]','FontName','timesnewroman','FontSize',14);
ylabel('Velocidad Media del Viento [m/s]','FontName','timesnewroman',
'FontSize',14);
subplot(2,2,3)
xlim([0,nomin*60]);ylim([-15,15]);
plot(1:nomin*60,FT)
xlabel('Tiempo [s]','FontName','timesnewroman','FontSize',14);
ylabel('Flujo de Turbulencia [m/s]','FontName','timesnewroman',
'FontSize',14);
subplot(2,2,2)
xlim([0,30]);ylim([0,1.2]);
plot(mu,IT);
hold on;
plot(0:0.05:30,Iref*(0.75+5.6./(0:0.05:30)));
hleg = legend('Modelo II','Clase C IEC');
xlabel('Velocidad del Viento [m/s]','FontName','timesnewroman',
'FontSize',14);
ylabel('Intensidad de Turbulencia','FontName','timesnewroman',
'FontSize',14);
subplot(2,2,4)
xlim([0,30]);ylim([0,5]);
plot(mu,sigma);
hold on;
```

```
plot(0:0.05:30,Iref*(0.75.*(0:0.05:30)+5.6));  
hleg = legend('Modelo II','Clase C IEC');  
xlabel('Velocidad del Viento [m/s]','FontName','timesnewroman',  
'FontSize',14);  
ylabel('Desviación Estándar [m/s]','FontName','timesnewroman',  
'FontSize',14);
```


Apéndice D

Velocidades de viento de OAU

Tabla D.1: Datos de velocidad de viento del 1 al 10 de marzo de 2017.

Hora \ Día	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
0	3.5613	2.4056	14.147	14.117	12.991	10.617	6.6861	6.2787	11.777	10.153
1	3.3697	4.6052	13.968	14.232	12.945	10.29	6.3442	7.4862	12.179	10.52
2	3.1094	6.2795	14.076	13.888	12.879	10.025	6.3891	8.4265	12.102	10.516
3	2.9973	7.9945	14.109	13.68	12.914	9.932	6.3408	9.2637	12.071	10.36
4	2.7905	9.4705	14.316	13.426	12.804	9.9164	6.3287	10.001	11.931	10.248
5	2.5561	10.475	14.726	13.232	12.571	9.9134	6.3897	10.421	11.661	10.174
6	2.2885	11.061	14.982	13.159	12.41	9.599	6.4299	10.637	11.394	10.056
7	2.5818	11.532	14.889	13.364	12.336	9.341	6.0996	10.941	11.002	10.254
8	1.8047	11.752	14.611	13.097	12.186	8.9298	5.8726	10.829	10.645	10.083
9	0.4627	12.081	14.107	13.079	12.019	8.6411	5.4878	10.661	10.536	9.905
10	0.86643	12.249	13.608	12.994	11.781	8.3005	5.0786	10.482	10.437	9.7135
11	1.247	12.339	13.356	12.996	11.38	7.7935	4.6505	10.187	9.9352	9.2492
12	1.4557	12.357	13.518	12.897	10.788	7.1491	4.4596	10.214	9.6895	8.8751
13	1.7544	12.244	13.928	12.536	10.459	6.9663	4.4422	10.34	9.6462	8.6582
14	2.119	12.209	14.467	12.063	10.149	7.0014	4.6082	10.339	9.57	8.667
15	2.2292	12.344	14.702	11.768	9.9759	7.0919	4.8421	10.642	9.5844	8.8417
16	2.0468	12.605	14.739	11.421	9.9726	7.3737	4.96	11.035	9.7083	9.1037
17	1.7237	13.138	15.004	11.31	10.036	7.7852	4.7187	11.276	9.8363	9.3713
18	1.2102	13.638	15.398	11.81	10.246	8.4074	3.2811	11.509	9.9153	9.6101
19	0.45894	14.406	15.775	12.354	10.348	8.3579	1.642	11.741	9.9907	9.5264
20	2.2844	14.947	15.868	12.401	10.251	7.5564	1.8032	11.972	9.6533	8.8752
21	3.1923	15.06	15.414	12.427	10.263	7.0412	3.6183	11.893	9.6024	8.3497
22	3.347	14.855	14.832	12.638	10.004	6.3297	5.0872	11.702	9.626	7.8332
23	2.0868	14.745	14.712	12.725	10.12	5.7966	6.5459	11.93	9.7558	7.8759

Tabla D.2: Datos de velocidad de viento del 11 al 20 de marzo de 2017.

Hora	Día	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0		7.9192	3.5642	8.0836	10.997	12.271	12.464	11.432	10.72	12.451	12.159
1		8.3183	3.734	9.2313	10.932	12.315	12.572	11.692	11.261	12.924	12.553
2		8.6299	3.7165	9.957	11.319	12.391	12.763	11.931	11.842	13.226	12.748
3		8.7947	3.8254	10.157	11.529	12.365	12.764	11.984	12.113	13.279	12.744
4		8.9426	3.9333	10.255	11.673	12.287	12.754	11.913	12.328	13.351	12.668
5		9.0218	4.0875	10.081	11.678	12.12	12.776	11.85	12.431	13.377	12.486
6		8.9928	4.4428	9.6447	11.637	12.001	12.82	11.767	12.466	13.378	12.137
7		8.4267	4.7775	9.163	11.814	11.68	12.609	11.07	12.456	13.219	11.619
8		7.8555	4.4983	8.5754	11.903	11.643	12.355	10.823	12.056	13.054	11.197
9		7.5106	4.9155	7.7995	12.405	11.653	12.277	10.757	11.787	12.98	10.923
10		7.2485	5.1948	7.134	12.699	11.617	12.131	10.56	11.587	12.883	10.693
11		6.8081	5.3047	6.4261	12.77	11.5	11.847	10.216	11.245	12.484	10.488
12		6.4886	5.4076	5.8438	12.704	11.237	11.516	10.088	11.151	12.166	10.248
13		6.3795	5.4025	5.7887	12.816	10.913	11.251	9.893	11.212	11.912	9.955
14		6.1767	5.3196	6.0258	13.111	10.651	11.184	9.9435	11.202	11.91	9.7221
15		6.0508	5.0971	6.5242	13.198	10.559	11.211	10.074	11.209	11.989	9.6695
16		6.1555	4.6046	7.2691	12.995	10.697	11.217	10.161	11.39	12.141	9.7343
17		6.376	3.3408	8.1225	12.964	11.105	11.234	10.262	11.906	12.467	9.7093
18		6.8167	1.2035	8.6787	13.104	11.452	11.592	10.534	12.497	12.854	9.4613
19		6.355	0.96176	8.9003	13.281	11.482	11.971	10.998	12.841	13.12	8.7704
20		4.5286	1.0411	8.9485	13.502	11.666	11.86	10.941	12.753	13.078	8.2665
21		3.8282	2.0849	9.0313	13.486	11.681	11.769	10.652	12.662	13.003	8.5003
22		3.955	4.4003	9.601	13.395	11.625	11.672	10.287	12.805	12.913	8.8545
23		4.0293	6.3585	10.145	13.171	11.972	11.672	10.366	13.147	12.819	9.3171

Tabla D.3: Datos de velocidad de viento del 21 al 31 de marzo de 2017.

Hora \ Día	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
0	10.341	8.0669	9.491	6.3835	3.8447	2.4968	12.011	3.9916	5.2296	5.4231	3.4597
1	10.659	8.3663	9.9574	6.5067	3.2209	3.7392	11.426	4.0033	5.3788	5.3439	2.9716
2	10.924	8.6981	10.61	6.6618	2.6529	4.8353	10.964	4.1536	5.54	5.3337	3.5526
3	10.793	9.0368	10.844	6.6771	2.1758	5.3671	10.698	4.4003	5.6272	5.3437	3.7519
4	10.663	9.3441	11.055	6.6633	1.7232	5.8477	10.757	4.5901	5.6818	5.3986	3.9484
5	10.355	9.5636	11.134	6.5919	1.4315	6.1725	11.078	4.6683	5.6937	5.4116	4.0357
6	10.087	9.7376	11.105	6.329	1.5721	6.3232	11.323	4.7447	5.6761	5.4262	3.8815
7	9.993	9.6092	10.694	5.7111	1.422	6.311	11.296	4.6515	5.6371	5.5432	3.2511
8	9.3013	9.1923	9.7621	4.6164	0.88372	5.6431	11.142	4.4837	5.406	5.493	2.3022
9	9.0038	8.9297	9.0418	3.7789	0.15498	4.9474	10.893	4.854	5.908	5.9225	1.1861
10	8.8002	8.6566	8.5044	2.9683	0.97337	4.1144	10.397	5.6211	6.7684	6.6177	0.77507
11	8.5676	8.3567	7.8092	2.1144	1.6904	3.0745	9.7425	6.2132	7.3877	6.9702	1.8252
12	8.3663	7.9777	7.168	1.4598	2.3545	2.1972	9.3172	6.7795	7.8293	7.2493	3.0425
13	8.2615	7.9939	6.7902	1.5845	2.9654	1.456	9.1288	7.2827	8.1025	7.3355	4.2302
14	8.412	8.2878	6.6574	2.5072	3.6067	2.282	8.9834	7.5993	8.1684	7.2925	5.2099
15	8.675	8.7273	6.7733	4.02	4.1476	4.4768	8.9532	7.7661	8.2066	7.1449	5.9302
16	8.9443	9.1836	7.0919	5.6094	4.6577	6.3162	9.0673	7.6662	8.1582	6.9262	6.2479
17	9.1811	9.4499	7.5109	6.5639	4.8455	6.8052	9.2549	7.4278	7.9692	6.1969	6.0229
18	9.3056	9.5854	7.9389	6.1083	4.2795	5.9892	9.4288	7.076	7.533	5.2446	5.1041
19	9.1085	9.5436	8.1585	4.6908	3.9634	4.6983	9.6771	6.5683	6.9449	4.5143	4.6352
20	8.3821	8.5333	7.6283	4.2148	2.9865	4.4894	10.028	5.8671	6.4077	3.2835	4.2387
21	7.9724	7.8311	7.219	4.2154	2.2461	4.8895	10.276	5.4366	6.082	0.93478	3.8636
22	7.7463	7.738	6.8548	4.0597	1.884	4.7853	10.424	5.2627	5.879	0.46282	3.7533
23	7.5449	8.0454	6.6977	3.9292	2.3764	4.7494	10.575	5.1944	5.886	1.6569	3.9821

Tabla D.4: Datos de velocidad de viento del 1 al 10 de abril de 2017.

Hora	Día	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
0		4.1357	5.8622	5.9907	1.5574	4.8716	11.76	15.105	11.154	6.6056	3.3785
1		4.5309	5.8237	5.8558	1.3855	4.9193	12.005	14.478	11.09	6.3098	3.0777
2		4.7322	5.8257	5.8612	1.272	4.7763	12.309	13.863	10.68	6.6876	2.0413
3		4.9033	5.8465	5.8748	1.0654	4.7628	12.507	13.397	10.649	6.574	2.0353
4		5.086	5.8645	5.8494	1.1362	4.7521	12.547	13.295	10.445	6.268	1.7533
5		5.2196	5.8663	5.8252	1.2985	4.718	12.62	13.176	10.274	5.9688	1.4523
6		5.4236	5.9005	5.7237	1.6186	4.6905	12.63	13.001	10.153	5.6459	1.199
7		5.6177	5.9991	5.6088	2.0275	4.617	12.847	12.751	9.9837	5.3294	1.171
8		5.6153	6.1805	5.578	2.6467	4.4068	12.531	12.915	9.5558	4.7278	1.0151
9		6.1706	6.2988	5.2971	2.4118	4.1892	12.82	12.342	9.2582	3.9358	0.42554
10		6.8879	6.7192	5.4578	3.0534	4.5777	13.134	11.921	9.2191	3.0027	0.67825
11		7.2785	7.3308	5.8711	3.9267	5.13	13.404	11.625	9.0806	2.0712	1.628
12		7.6506	7.6399	6.0949	4.8918	5.7463	13.59	11.475	8.6609	1.4148	2.2179
13		7.8468	7.9769	6.1143	5.6667	6.0914	13.911	11.519	8.4151	1.3667	2.7621
14		7.9374	8.2302	5.9198	6.2129	6.2926	14.351	11.362	8.2028	1.4623	2.9054
15		7.9576	8.3334	5.8595	6.5555	6.2758	14.98	11.479	7.9841	2.148	3.1578
16		7.8446	8.2948	5.8201	6.73	6.0301	15.572	11.842	7.8799	3.3043	3.7742
17		7.6197	8.2201	5.721	6.6437	5.6937	15.86	12.072	8.0177	4.5953	5.1664
18		7.2586	8.068	5.2655	6.343	4.8961	15.93	12.228	8.3942	5.7526	5.797
19		6.7325	7.8567	4.5645	5.4687	3.5288	15.826	12.126	8.7015	5.7963	5.2112
20		6.1712	7.4557	4.2056	5.1091	2.9044	15.736	12.377	8.82	4.4438	4.4951
21		6.035	6.7932	3.1094	4.5854	1.4141	15.448	12.29	8.1729	3.1191	3.8394
22		5.9132	6.3186	2.3718	4.3266	3.9326	15.077	11.945	7.4047	2.9175	2.4156
23		5.7812	5.9266	2.0457	4.474	7.764	14.913	11.655	6.5421	2.9804	1.1111

Tabla D.5: Datos de velocidad de viento del 11 al 20 de abril de 2017.

Hora	Día																			
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20										
0	0.32507	8.2961	11.321	8.4633	8.0021	6.649	3.0507	2.4882	5.1535	6.9365										
1	0.91455	8.3968	11.527	8.8349	8.1423	6.8101	3.454	2.2594	6.2081	7.2254										
2	2.1815	9.0732	11.788	9.4407	8.6036	7.5592	3.7224	3.1315	7.8722	7.8539										
3	3.5967	9.8522	12.069	9.9915	8.9296	8.0642	4.0489	3.7848	8.5802	7.87										
4	4.4528	10.569	11.958	10.217	9.2749	8.3041	4.7434	4.2517	8.3196	7.8935										
5	5.3295	11.022	11.772	10.447	9.5503	8.5564	5.0442	4.6807	8.1582	7.9284										
6	6.1848	10.986	11.474	10.586	9.6081	8.7757	5.0462	4.9389	7.9808	7.7401										
7	6.8374	10.795	11.109	10.585	9.604	8.8988	4.7286	5.186	7.764	7.5648										
8	6.6754	10.63	10.565	10.129	9.3122	8.8427	4.3742	6.4657	7.8295	6.6278										
9	6.6854	10.071	10.048	9.7145	8.7014	8.2383	3.4999	6.3767	7.2026	5.8814										
10	6.6901	9.8809	9.8838	9.4855	8.1174	7.5267	2.8704	5.7933	6.6073	5.0339										
11	6.7847	9.8924	9.5494	9.2367	7.5104	6.7239	2.1518	5.2926	6.078	4.1367										
12	6.8085	9.7717	9.0735	8.689	6.714	5.6676	1.3899	4.7948	5.4423	3.275										
13	7.0674	9.6493	8.7656	8.1589	6.08	4.9451	0.75808	4.3723	4.9442	2.5822										
14	7.6104	9.5081	8.7057	7.8588	5.8031	4.496	0.94655	3.908	4.7004	1.8986										
15	8.2782	9.395	8.9157	7.8222	5.743	3.9413	2.0654	3.1731	4.5291	0.84853										
16	8.8465	9.4176	9.3691	8.0771	5.6734	3.2601	3.5337	1.1462	4.3864	0.73815										
17	9.0972	9.4538	9.8267	8.5347	5.7313	2.6111	4.9664	1.5232	4.378	2.0327										
18	9.0283	9.5105	10.09	9.0461	5.9785	2.1763	5.9946	2.4793	2.4369	3.3439										
19	8.7287	9.4989	10.054	9.3014	6.3206	2.1593	5.7402	2.6206	1.1122	4.1605										
20	8.2156	9.264	9.6391	9.2726	6.9292	3.2691	4.7022	2.6008	1.3928	4.4011										
21	6.8605	9.4718	8.8849	8.4345	6.904	3.0291	3.6793	2.6708	4.0467	3.1647										
22	5.6389	10.026	8.3649	7.8752	6.5283	1.7146	3.2978	3.5511	5.6965	1.5969										
23	5.3564	10.264	8.0399	7.659	6.0082	1.8801	3.2193	4.427	6.7895	1.6752										

Tabla D.6: Datos de velocidad de viento del 21 al 30 de abril de 2017.

Hora	Día	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
0		3.8084	3.1241	1.3514	11.191	3.6274	6.524	6.4455	4.727	5.8158	7.2916
1		4.7479	2.9238	1.7268	11.044	4.3338	6.6387	6.5799	4.8206	5.6312	7.4559
2		5.6792	2.563	2.6889	11.069	4.4106	6.7263	6.3277	4.9639	5.4459	7.3987
3		5.967	2.1792	3.6153	10.873	4.9762	6.9368	6.0414	5.1766	5.3486	7.2433
4		6.0131	2.1674	4.535	10.327	5.3124	7.039	5.9384	5.3746	5.1936	7.0933
5		6.0201	2.3801	5.3588	9.8866	5.6699	7.104	5.7462	5.5474	5.1741	6.9121
6		5.8241	2.5398	6.3507	9.5583	5.8214	7.1718	5.4662	5.6477	5.2097	6.7404
7		5.6053	2.517	7.3919	9.3077	5.948	7.128	5.3061	5.7188	5.3278	6.4673
8		4.9025	1.6836	7.8991	9.0723	6.2494	7.1201	5.2034	5.5174	5.319	6.29
9		4.454	0.67016	8.1414	8.412	6.353	7.3108	5.2852	5.7818	5.729	6.1204
10		4.1301	1.3795	8.4962	7.9893	6.7218	7.4579	5.667	6.1569	6.4174	6.328
11		3.7186	2.8862	8.6912	7.5206	7.1897	7.6323	6.2378	6.7453	7.2105	6.6851
12		3.2674	3.9157	8.7654	6.7623	7.5509	7.8489	6.6175	7.2838	7.7169	6.7858
13		2.6872	4.7524	9.0128	5.8923	7.8724	8.0876	6.7406	7.771	8.2225	6.7213
14		1.9752	5.4363	9.349	5.1916	8.099	8.3255	6.7797	8.2243	8.6402	6.4875
15		1.3107	5.8558	9.6577	4.6872	8.1678	8.4666	6.9347	8.4655	8.8306	6.2386
16		2.2879	5.9639	10.018	4.252	8.1022	8.433	7.0233	8.5106	8.8762	5.8257
17		4.1759	5.8731	10.358	3.8781	7.9409	8.308	7.0701	8.382	8.7723	5.3535
18		5.9616	5.5906	10.566	3.5431	7.7425	8.0401	6.791	8.1353	8.5777	4.7275
19		6.1144	4.6716	10.655	2.5089	7.368	7.6003	6.1798	7.6251	8.3375	4.1241
20		5.0541	4.2924	10.679	1.4897	7.0331	7.0544	5.5666	7.0913	8.0776	3.1137
21		4.116	3.3398	10.569	1.6333	6.7367	6.8511	5.213	6.6867	7.806	1.7274
22		3.5515	2.3704	10.836	2.2031	6.5022	6.5935	5.089	6.4461	7.4247	2.897
23		3.3664	2.0243	11.09	3.1427	6.459	6.4305	4.9955	6.2217	7.0887	4.9503

Tabla D.7: Datos de velocidad de viento del 1 al 10 de mayo de 2017.

Hora	Día	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
0		6.0263	5.469	3.3884	4.673	12.24	10.941	5.1916	2.3371	1.6646	0.61014
1		7.1091	5.7877	3.4463	4.8442	12.341	10.977	5.0493	2.4484	1.699	1.5536
2		7.5567	6.3612	3.231	4.8212	12.794	10.757	5.0349	2.4347	2.1392	3.4864
3		7.722	6.4519	3.1292	4.8953	13.218	10.689	5.042	2.7	3.5398	4.0154
4		7.9093	6.2883	3.0068	5.0587	12.86	10.182	5.0739	3.0937	4.5332	4.3535
5		8.1883	6.1326	2.8908	5.1647	12.6	9.7872	5.1121	3.4795	5.2675	4.7424
6		8.5728	5.8399	2.8919	5.2089	12.207	9.4436	5.1463	3.6813	5.5845	5.0088
7		8.9256	5.5581	2.8958	5.2294	11.973	9.2229	5.1717	3.7661	5.611	5.1503
8		8.6667	5.1064	2.7301	5.0695	11.944	8.9209	5.0755	3.5306	5.319	5.3086
9		8.1709	4.5652	2.8702	5.0381	11.989	8.4083	4.6447	2.8553	4.8975	4.957
10		7.3928	3.9158	3.499	5.3122	12.303	7.8494	4.6002	2.6015	4.3982	4.7249
11		6.8031	3.2319	4.3685	5.6428	12.55	7.3871	4.5667	2.3141	4.0491	4.337
12		6.3042	2.7295	4.9095	5.6617	12.461	6.9356	4.4147	1.8923	3.9007	3.8716
13		5.9097	2.2539	5.4836	5.4799	12.168	6.4399	4.2952	1.4229	3.7741	3.4813
14		5.7603	1.5836	5.9972	5.2077	11.905	6.2573	4.2392	1.3126	3.6703	3.0003
15		5.7234	0.51703	6.4951	4.7906	11.56	6.1191	4.1542	1.8557	3.3373	2.172
16		5.783	2.2966	6.7418	3.9886	11.361	6.0618	3.735	2.5105	2.21	0.80428
17		5.5565	4.8701	6.7456	4.9058	11.226	6.0963	2.5702	3.516	0.81359	0.83321
18		4.2096	6.762	6.522	4.8687	11.131	6.1738	1.4416	4.4778	3.5263	1.8644
19		2.0966	6.8112	5.9033	6.9016	11.027	6.4819	1.8359	4.7516	4.8551	4.0542
20		1.3508	5.2019	5.2035	8.4608	10.707	6.6832	2.9272	4.5809	4.4331	5.0067
21		1.7608	3.838	4.7224	10.965	10.234	6.1278	3.4559	3.8521	3.6824	4.3822
22		1.4378	3.7501	4.7736	11.191	10.193	5.8083	3.3978	2.9483	2.678	3.4147
23		2.1927	3.5126	4.6781	10.69	10.139	5.4952	3.0498	2.3015	0.92294	2.7528

Tabla D.8: Datos de velocidad de viento del 11 al 20 de mayo de 2017.

Hora	Día	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0		3.5865	3.2263	2.1335	2.7748	1.453	2.9543	4.1459	3.8659	3.4422	3.1734
1		3.4988	3.0362	1.9693	2.7146	0.98934	2.8569	4.1311	3.8972	3.5687	3.0738
2		3.6838	1.3229	2.3938	2.6821	0.51984	2.531	3.9042	4.0264	2.9857	2.0567
3		3.569	1.0687	2.2223	2.502	0.59215	2.2649	3.8145	3.9934	3.1973	2.2114
4		3.4915	1.475	2.1088	2.3082	0.77057	1.9027	3.7435	4.0224	3.1892	2.4735
5		3.4224	1.951	2.023	1.9394	0.81453	1.6366	3.7817	4.0085	3.2459	2.6526
6		3.271	2.216	1.8756	1.6164	0.61414	1.4988	3.8508	4.0455	3.3132	2.8775
7		2.8873	2.2441	1.6893	1.2712	0.4369	1.4995	3.993	4.0497	3.3291	3.0114
8		2.8436	2.7712	1.7839	1.1505	0.48388	1.5567	3.7305	3.6039	2.833	2.7154
9		2.5401	3.7579	1.3392	0.6347	0.96688	1.9219	3.8206	3.6072	3.1271	3.1772
10		3.0087	4.6755	1.2862	1.0464	1.7858	2.4818	4.4793	3.8158	3.5309	3.7946
11		3.6648	5.6533	2.596	2.086	2.7464	3.2908	5.3249	4.3713	4.338	4.7041
12		4.4071	6.2191	3.6547	2.9233	3.483	3.856	6.0355	4.83	5.1851	5.3304
13		5.036	6.6357	4.6391	3.9002	4.1328	4.3907	6.5375	5.2493	5.8732	5.8463
14		5.661	6.9594	4.8298	4.6237	4.6751	4.9733	6.8552	5.715	6.269	6.2128
15		6.0571	6.8904	4.7579	5.1561	5.1341	5.5352	6.9383	6.1563	6.3685	6.405
16		6.2	6.3831	4.5657	5.504	5.4816	5.9255	6.8924	6.2943	6.314	6.4796
17		6.3004	5.9719	4.6159	5.5044	5.6189	6.0003	6.78	6.2458	6.1384	6.2969
18		6.3727	5.5628	4.586	5.2527	5.6868	5.8155	6.5644	5.9165	5.6965	5.9927
19		6.0837	5.1368	4.3829	4.3774	5.0593	5.048	6.0354	5.1704	5.0501	5.6129
20		5.3301	4.844	4.1853	3.6413	4.3494	4.7732	5.3602	4.7276	4.6556	5.069
21		4.3945	4.1133	3.4236	3.0282	3.7333	4.5425	4.6453	4.2601	4.0514	4.2156
22		4.3432	3.5198	2.8011	2.0672	3.3335	4.1953	4.122	3.8328	3.4046	3.3127
23		4.5597	3.0141	2.3829	1.8161	2.6476	4.0716	3.8974	3.462	3.214	2.8721

Tabla D.9: Datos de velocidad de viento del 21 al 31 de mayo de 2017.

Hora \ Día	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
0	2.4142	1.3089	2.9857	3.7141	1.6397	2.5055	3.4329	3.5823	4.1611	2.6241	1.8941
1	1.7401	1.171	2.9006	3.5825	1.4934	2.295	2.7987	3.3727	4.0126	2.2124	1.8305
2	1.0964	1.2108	3.0738	3.9754	1.5253	1.4663	2.7165	3.5619	3.2115	2.3015	2.2993
3	0.57797	0.96837	3.228	4.0107	1.5229	1.1811	1.7624	3.4022	2.5808	2.1976	2.6526
4	0.36152	0.95139	3.215	4.3348	1.5783	1.0123	1.343	3.1876	2.5235	2.1109	2.6632
5	0.86949	0.98431	3.2051	4.5889	1.7483	0.8615	1.2495	3.1074	2.5901	2.0238	2.7108
6	1.4293	0.92368	3.1821	4.6754	1.8617	0.74926	1.3583	3.0565	2.8953	1.8692	2.8201
7	1.7911	1.0102	3.1612	4.6211	1.8582	0.68501	1.6165	3.0971	3.2346	1.9231	3.0836
8	1.5753	0.81636	3.6629	4.2811	1.9122	0.75074	1.599	2.6798	2.5596	1.7321	3.1426
9	0.81432	0.77141	4.232	3.9639	1.758	1.1453	0.9902	4.0272	2.8732	1.8765	3.0719
10	1.3637	1.0754	5.0246	3.9739	2.2043	1.958	1.1089	4.324	3.3305	0.77901	2.5574
11	1.8364	1.2701	5.9456	4.2555	2.9793	2.8795	1.7682	4.8423	3.998	1.6073	1.6352
12	1.9773	1.1043	6.5982	4.6614	3.6717	3.5238	2.3157	5.3002	4.5312	3.0499	0.29796
13	1.9455	0.30501	7.0761	5.1872	4.1974	4.1203	3.1753	5.8	5.2518	4.2208	2.3683
14	1.0126	0.66313	7.3838	5.5359	4.6442	4.6475	4.096	6.2052	6.2322	5.1718	4.088
15	0.34004	1.7226	7.5418	5.7935	4.9967	4.8647	4.7379	6.413	6.8165	5.6649	4.9433
16	0.45945	3.2415	7.5468	5.8279	4.9621	5.1158	5.1248	6.6276	6.6766	5.6546	4.4342
17	1.3951	4.6039	7.3724	5.7917	5.0336	5.4386	5.5509	6.7641	6.5647	5.255	3.1204
18	2.6359	5.6971	6.9784	5.5826	4.9723	5.4588	5.857	6.6463	7.1346	4.5394	1.4189
19	3.7235	5.7768	6.4508	5.1301	4.6918	5.2085	5.5334	6.2113	7.4855	3.5334	0.83929
20	4.3177	4.9032	5.8332	4.8641	4.2416	4.7025	5.0402	5.8848	7.6296	2.5982	2.1526
21	3.8356	4.3351	5.1979	3.2033	3.8046	4.1342	4.6139	5.3929	7.6625	1.8345	2.6712
22	2.6985	4.3702	4.7546	1.7377	3.3319	3.649	4.7888	5.2096	7.2073	1.7204	2.1224
23	1.9642	4.2676	4.3866	0.88171	2.7914	3.2021	4.8853	5.244	6.4664	1.9576	1.7219

Tabla D.10: Datos de velocidad de viento del 1 al 10 de junio de 2017.

Hora	Día	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
0		4.0279	2.5964	2.6607	1.5649	3.3327	4.1799	4.113	5.8042	5.013	1.2058
1		4.1218	2.2351	2.9394	1.6232	3.3338	4.3902	4.0843	6.6567	5.439	0.32622
2		1.1979	4.0663	2.811	1.4436	3.1787	4.6021	3.7979	7.3254	5.7206	1.2427
3		2.5176	4.4588	2.8947	1.4176	3.1005	4.8071	3.5409	7.9327	6.3103	1.9006
4		2.8705	4.5775	2.8102	1.5478	3.0463	4.6675	3.2675	8.06	6.6356	2.0524
5		3.3339	4.7698	2.7684	1.5498	3.0078	4.5537	3.0136	7.9639	6.8004	2.1632
6		3.5311	4.9455	2.6617	1.4942	2.9354	4.3012	2.7393	7.5639	6.7142	2.1866
7		3.639	5.0745	2.7215	1.3594	2.8417	4.0064	2.4678	7.3863	6.4715	2.1339
8		3.2043	5.7655	1.9531	0.89927	2.4244	3.4147	1.7867	7.3633	5.5851	1.652
9		2.43	4.8051	1.7192	0.33706	2.7944	3.6163	1.6031	7.0406	5.0955	0.73589
10		2.1674	4.5731	2.4036	0.32168	3.1498	4.1572	1.7879	6.9076	4.5287	0.42865
11		2.2368	4.3774	3.2262	1.0342	3.782	4.9122	2.2601	6.6637	3.9482	1.6896
12		2.2994	4.702	3.834	1.6309	4.4197	5.4644	2.3722	6.4291	3.2695	2.7796
13		1.6357	4.7773	4.2375	2.2073	5.018	5.8958	2.6247	6.2567	2.7165	3.8326
14		0.85679	4.885	4.5646	3.0415	5.5592	6.2265	2.8958	6.0247	1.9772	4.8421
15		1.9267	4.8401	4.8937	3.9797	5.9511	6.4975	2.9295	5.7911	0.73851	5.6048
16		4.4442	4.7953	5.1498	4.7789	6.1586	6.5445	2.9829	5.907	1.5901	5.8243
17		4.9576	4.5583	5.0802	5.2759	6.1752	6.4412	2.992	6.281	3.8287	5.9413
18		4.772	4.2352	4.6517	5.3381	5.9426	6.0823	2.9916	6.6213	5.59	5.9801
19		4.1768	3.5944	3.978	4.9645	5.3633	5.444	2.7863	6.879	5.7838	5.8605
20		3.9555	2.8611	3.2995	4.088	4.5381	5.0029	2.3032	7.0087	4.5172	5.3055
21		3.7364	1.9594	2.1898	3.1775	3.8546	4.5563	1.4634	6.2017	2.8125	4.4823
22		4.2538	1.2998	1.7154	3.0642	3.5586	4.3059	1.6264	5.27	2.1918	3.6991
23		4.555	1.1592	1.8703	3.2689	3.4721	4.3233	2.6681	4.8669	2.3462	2.8205

Tabla D.11: Datos de velocidad de viento del 11 al 20 de junio de 2017.

Hora \ Día	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	1.6612	2.0597	4.1701	1.0562	1.0537	1.6222	3.4708	0.78547	1.0006	7.1346
1	2.1131	1.4075	4.2051	1.1282	1.0938	2.1398	4.0867	1.2814	2.218	7.3305
2	2.4491	0.99832	4.4931	1.494	1.2511	1.809	5.4029	1.5908	4.0348	7.4645
3	2.8079	0.71137	4.0397	1.18	1.1527	2.1061	5.5934	1.8008	4.7066	7.6013
4	2.7454	1.1211	4.0422	1.1036	1.1898	2.5424	5.6948	2.0561	5.0946	7.6548
5	2.738	1.5622	3.8309	1.1091	1.1903	3.3027	5.7884	2.344	5.417	7.7484
6	2.6227	1.539	3.5438	1.2706	1.5651	4.0485	5.8217	2.4318	5.5605	7.8202
7	2.4036	1.3132	3.3508	1.4852	2.6054	4.7596	5.776	2.4226	5.6666	7.7428
8	1.8162	1.2794	4.4708	1.9038	3.1993	5.0963	5.1063	2.757	6.0392	7.4831
9	1.7577	0.19059	4.0236	1.3775	2.8957	4.8815	4.7631	2.2221	6.0304	7.2287
10	1.7096	1.6049	3.9911	1.589	2.4944	4.5828	4.4062	2.0088	5.8668	7.2968
11	1.8675	2.9291	4.0256	2.7762	1.9644	4.2147	3.8607	1.8524	5.7714	7.3813
12	2.2499	3.5461	4.2968	3.629	1.4208	3.8374	2.9177	1.6494	5.7679	7.4018
13	2.8687	4.221	4.5146	4.3001	1.4929	3.4874	1.997	1.3838	5.9313	7.2477
14	3.7702	4.8752	4.6359	4.7263	1.3787	2.9226	1.1137	0.72682	6.1834	7.0811
15	4.4242	5.385	4.4608	4.8203	1.7237	2.3052	0.32554	1.0964	6.4939	6.9132
16	4.7893	5.8064	4.1991	4.6334	1.4229	2.1913	0.88464	2.4142	6.2127	7.2225
17	4.8102	5.4634	3.9432	4.3718	1.5644	1.6506	2.2935	4.6477	5.6563	7.6476
18	4.9078	5.1585	3.8346	4.0062	1.7943	2.469	2.8827	5.34	5.3262	7.9745
19	4.7972	4.5294	3.6525	3.3581	1.782	2.6164	3.0166	4.225	5.8814	8.0387
20	4.8707	4.2177	3.7733	2.9799	1.8325	2.0277	2.6518	2.7502	6.7903	7.9062
21	4.3688	4.1073	3.2277	2.2282	1.5409	1.3278	2.1288	1.8265	7.2587	7.1577
22	3.5179	3.8487	2.3364	1.6006	1.422	1.1311	1.5346	1.3369	7.4568	6.4144
23	2.6433	3.5087	1.5357	1.3368	1.9997	1.5041	0.73023	0.17134	7.3382	5.499

Tabla D.12: Datos de velocidad de viento del 21 al 30 de junio de 2017.

Hora \ Día	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
0	5.6229	1.7474	3.2046	3.3338	3.1386	8.7588	8.5056	2.7479	2.5479	2.164
1	5.4276	1.7996	2.7929	2.7545	3.6629	8.8323	8.3324	1.9545	2.3013	2.1465
2	5.3006	1.5831	2.9273	2.5845	3.7341	8.2664	8.3162	0.83122	2.0036	2.0828
3	5.554	1.3954	3.2194	2.2394	4.3638	8.1004	8.0164	0.60616	1.7098	1.6843
4	5.3267	1.1679	3.4001	1.697	4.6498	7.7589	7.6331	1.6087	1.5411	1.8494
5	5.067	0.96592	3.3432	1.3116	4.9859	7.4829	7.257	2.5345	1.4045	1.9445
6	4.6485	0.83058	3.1254	1.0284	5.4245	7.2579	6.9241	2.9792	1.393	1.738
7	4.4308	1.0166	3.1091	0.88033	5.7807	7.304	6.6247	3.204	1.3378	1.6247
8	3.654	1.1872	3.3702	0.77766	5.9704	7.1385	6.2163	2.861	1.3913	1.2547
9	3.1139	1.822	3.8469	1.7154	5.9837	6.8585	5.2358	2.137	1.0615	1.2088
10	3.5545	2.0466	4.331	2.5762	5.8596	6.9245	4.3847	1.2656	1.6181	0.9956
11	3.9957	2.3402	5.1108	3.6833	5.7672	6.9648	3.4484	0.32795	2.6111	1.1805
12	4.1447	2.7172	5.6438	4.4896	5.645	6.7989	2.9522	0.93028	3.3842	1.3481
13	3.9353	3.3624	6.2888	5.4778	5.7903	6.9527	2.7963	1.7951	4.0096	1.3064
14	3.3893	4.2645	6.7761	6.1944	6.0653	6.9281	2.9004	2.7868	4.5232	1.2798
15	2.285	5.0434	6.8671	6.103	6.355	7.17	2.7674	3.8881	5.0722	1.389
16	0.51608	5.7232	6.9071	5.5448	6.8528	7.5304	1.796	4.6945	5.5737	2.0637
17	1.8795	6.0672	6.8916	4.0601	7.7125	8.0329	1.142	5.1021	5.6989	2.7139
18	4.3644	5.9992	6.6373	2.5479	8.7765	8.4902	0.40366	5.1524	5.5848	3.0846
19	5.0644	5.57	5.9679	2.1439	9.3147	8.7693	1.5362	4.9704	5.1861	2.1121
20	4.2562	4.9338	5.2545	2.0397	9.2527	8.7199	3.1394	4.5436	4.8419	2.1193
21	3.0912	4.3767	4.4064	2.0973	8.7359	8.3033	3.6699	3.6462	4.0209	1.6629
22	2.1702	3.7119	4.1728	2.1088	8.3054	7.9827	2.9982	2.8103	3.139	1.1772
23	1.6808	3.4236	4.0956	2.142	8.1949	7.4932	2.1463	3.0891	2.5848	0.92149

Tabla D.13: Datos de velocidad de viento del 1 al 10 de julio de 2017.

Hora \ Día	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
0	0.88226	9.744	7.3242	10.317	7.8599	6.9603	4.6431	8.3267	7.4064	9.9653
1	0.84104	9.5257	7.7887	10.16	7.6742	6.651	4.8676	7.5355	7.1789	9.7023
2	1.4541	9.5941	9.5815	10.389	7.9148	6.5062	7.4349	7.725	7.2602	9.568
3	1.605	9.4185	10.211	10.326	8.0725	6.2396	7.6592	7.4606	7.4606	9.2574
4	2.7813	9.6264	10.016	10.07	8.154	6.3852	7.7582	7.3227	7.789	9.0352
5	4.0797	9.7633	9.8838	9.7841	8.2336	6.4655	7.7457	7.31	8.0245	8.8381
6	5.4062	9.9044	9.7455	9.42	8.3427	6.4454	7.6053	7.4179	8.0075	8.5068
7	6.5682	10.055	10.011	9.2837	8.5429	6.4555	7.6117	7.5445	7.7849	8.1987
8	7.5219	9.9394	10.124	9.3876	8.7379	7.2417	8.3415	6.6394	6.5251	7.9278
9	7.4507	10.092	9.7199	8.8288	8.2638	6.9044	8.1689	6.2845	5.6542	7.3649
10	7.2925	10.26	9.4287	8.4996	7.944	6.4873	7.8781	6.2181	5.5481	7.3773
11	7.1566	10.333	9.153	8.1424	7.7373	6.0577	7.6679	6.1299	5.4495	7.4045
12	6.9528	10.293	8.9311	7.5202	7.5152	5.604	7.3106	6.0243	5.3116	7.2013
13	6.9403	10.163	8.7405	6.8348	7.2676	5.3388	7.0145	5.931	5.5343	6.6834
14	7.0143	9.9208	8.5522	6.6599	6.9873	5.0282	6.8225	5.8607	5.79	6.4236
15	7.0677	9.5297	8.6748	6.6518	6.9217	5.024	6.7464	6.0238	6.1924	6.2935
16	7.1972	9.0938	8.8481	6.5358	6.7944	5.1215	7.2633	6.4132	6.5479	6.2853
17	7.3331	8.7474	8.7611	6.5219	6.4443	5.4805	8.193	6.8755	6.9378	6.5784
18	7.29	8.836	8.7905	6.8303	5.8763	5.9498	8.9732	7.1524	7.52	7.0549
19	7.3139	8.7686	8.634	7.18	5.8944	6.2299	9.2083	7.6781	7.8329	7.5253
20	8.0387	8.5089	8.8414	7.6513	6.277	5.9976	9.3466	7.8567	8.1336	7.876
21	8.5975	7.8926	9.054	7.8305	6.6503	5.8579	9.2998	7.687	8.237	7.6018
22	8.7468	7.5698	9.1779	7.6184	6.8276	5.926	9.2641	7.5559	8.3656	7.3833
23	8.4473	7.1951	9.2468	7.2307	7.1688	5.8455	8.8391	7.7497	8.5098	7.0296

Tabla D.14: Datos de velocidad de viento del 11 al 20 de julio de 2017.

Día		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Hora											
0		7.8226	6.8847	8.0608	7.6426	2.892	5.0563	2.8389	3.2367	6.7202	10.783
1		7.8222	6.7321	7.9603	7.8783	3.6655	5.2367	2.7818	3.7398	6.9201	10.558
2		7.9928	7.4006	8.3202	8.0771	5.9733	5.5692	2.2225	4.5081	7.3532	10.793
3		8.0957	7.4073	8.6945	8.8585	6.4333	5.6048	1.5931	5.1336	7.7635	11.071
4		8.1526	7.3023	8.9241	9.5286	6.8934	5.6442	2.253	5.6866	7.9446	11.24
5		8.1919	7.1925	9.0602	9.9515	7.3632	5.7181	2.8432	6.1818	8.1893	11.519
6		8.1884	7.1376	8.9868	10.017	7.8918	5.8359	2.9887	6.5865	8.1804	11.721
7		8.1811	7.1753	8.8696	9.8343	8.0713	5.8934	3.1674	6.8612	8.3576	11.798
8		8.0283	7.7725	8.9376	9.3554	8.0888	6.1163	3.0583	6.8061	9.0316	12.118
9		7.4871	7.3317	8.5528	8.5604	7.6542	5.7752	2.3495	6.6948	9.2004	11.813
10		7.1796	7.1649	8.4011	7.9736	7.3262	5.0793	2.3845	6.4549	9.4668	11.688
11		6.8106	6.9725	8.2007	7.4045	6.8187	4.3387	2.2592	6.2624	9.6156	11.487
12		6.3177	6.6459	7.8214	6.7981	6.2281	3.5246	2.1072	5.9775	9.4545	11.341
13		5.7597	6.5602	7.2802	6.028	5.5568	3.133	1.8337	5.9876	9.1138	11.091
14		5.4979	6.5888	6.7774	5.4457	4.9625	3.0364	1.5359	6.173	9.1336	10.864
15		5.4297	6.5044	6.6725	5.1985	4.4263	3.0285	0.96099	6.4607	9.4929	10.776
16		5.3362	6.4494	6.326	4.4096	4.0678	3.0444	0.58371	6.4955	9.9431	10.746
17		5.4706	6.5967	5.939	2.8506	3.9799	2.5366	0.96958	6.3589	10.221	10.892
18		5.2626	6.6899	4.8935	2.5522	4.4044	1.3662	1.0861	5.935	10.291	11.396
19		4.9064	6.8222	3.7908	2.2693	4.776	0.72413	1.4118	4.8908	10.397	11.729
20		4.8461	6.6875	2.6436	2.3881	4.8775	1.1838	1.3167	3.4393	10.733	11.886
21		4.9336	6.6043	2.636	2.2784	4.8107	1.4109	0.83517	2.207	10.776	11.773
22		5.5594	6.8249	3.8082	2.4367	5.1623	2.2019	0.66079	2.3974	10.695	11.838
23		5.8602	6.9029	5.2983	1.5264	5.4203	3.0744	0.73365	3.1479	10.702	12.083

Tabla D.15: Datos de velocidad de viento del 21 al 31 de julio de 2017.

Día		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Hora												
0		12.725	9.6245	4.2627	6.3509	7.7524	12.23	13.076	11.411	7.3942	2.4322	4.5602
1		12.591	9.4119	4.1823	6.3239	7.7501	12.577	13.142	11.009	7.0202	2.67	4.4768
2		12.727	9.2963	4.0867	6.4188	7.5732	13.11	13.446	10.612	6.3045	2.866	4.6902
3		12.813	8.9135	4.1561	6.2912	7.0745	13.334	13.406	10.394	5.825	3.0858	4.8469
4		12.766	8.6306	4.1904	6.2368	7.781	13.326	13.305	10.309	5.5291	3.365	5.4503
5		12.713	8.4013	4.1753	6.2488	8.3566	13.182	13.176	10.177	5.269	3.664	5.8669
6		12.552	8.2361	4.1642	6.3385	8.724	12.976	12.974	9.8608	5.0147	3.9618	6.0415
7		12.319	8.1097	4.1626	6.491	9.1334	12.784	12.878	9.5703	4.9309	4.399	5.9051
8		12.266	8.4633	4.4532	7.5858	9.5391	12.264	12.729	9.7553	4.8922	5.2558	5.6937
9		11.914	7.834	4.6724	7.4898	9.7287	12.247	12.236	9.3502	4.6017	5.4389	5.7703
10		11.4	7.2427	4.6134	7.1368	9.6881	12.439	12.044	8.9218	4.1301	5.4685	5.3611
11		10.846	6.6381	4.4128	6.8001	9.8068	12.58	11.777	8.5412	3.5664	5.2862	5.0071
12		9.9247	5.6484	4.2064	6.4919	10.168	12.618	11.33	7.9443	2.9851	4.6114	4.4629
13		9.012	4.5158	4.0237	6.2368	10.22	12.527	10.778	7.2832	2.4479	3.9031	4.2602
14		8.5885	3.5754	3.9501	6.282	10.368	12.218	10.48	6.968	2.0008	3.5195	3.9928
15		8.6136	3.0014	3.7535	6.3654	10.876	11.938	10.427	7.0554	1.3634	3.2536	3.4036
16		8.9398	3.0798	3.3517	6.4884	11.334	11.884	10.564	7.2298	1.2012	2.5662	2.7161
17		9.2594	2.8427	2.9743	6.77	11.733	11.954	10.776	7.393	2.0222	1.3434	2.2752
18		9.3329	3.3009	2.7002	7.2482	12.102	12.151	11.069	7.8107	2.3092	0.12025	1.9671
19		9.318	4.0605	3.2892	8.0196	12.393	12.573	11.397	8.4751	2.4593	0.26247	1.6442
20		9.0936	4.8702	3.8566	8.043	12.445	12.727	11.823	8.5246	1.3871	1.1721	1.6412
21		9.2011	5.6368	4.1176	7.8018	12.238	12.674	12.066	7.921	0.58277	2.3097	1.8077
22		9.1724	5.8567	4.3635	7.7631	12.298	12.459	12.058	7.2785	0.63102	3.1372	2.027
23		9.1003	5.7741	4.7843	7.659	11.72	12.286	11.962	6.799	1.8714	3.4055	1.8577

Tabla D.16: Datos de velocidad de viento del 1 al 10 de agosto de 2017.

Día		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
Hora											
0		4.5114	1.2808	0.76489	4.6958	9.5898	8.8572	3.9384	4.0128	2.0005	6.0871
1		4.4536	1.8596	0.76247	4.9028	9.7502	8.7791	4.153	4.0828	2.3302	6.4131
2		3.5746	2.2605	1.2525	5.0423	10.13	8.7891	4.5986	4.6637	3.4619	6.2915
3		2.8502	2.6094	1.0705	5.4726	10.231	9.0749	4.8367	4.4553	4.1061	6.6849
4		2.7796	2.6636	1.5267	6.3613	10.226	9.3135	5.4745	4.3925	3.6831	6.8435
5		2.6824	3.0137	1.938	7.2265	9.9306	9.478	5.9183	4.3337	3.3446	6.6921
6		2.8591	3.3454	2.1951	7.739	9.6399	9.5989	6.2797	4.3187	2.5861	6.2005
7		3.5991	3.5629	2.3304	8.2955	9.4007	9.4475	6.5841	4.3323	1.7519	5.3657
8		3.3477	3.9808	2.4893	8.7227	9.2184	9.3823	7.4559	4.9965	1.0939	5.2173
9		2.7016	4.0272	2.5814	8.564	9.1536	8.9511	7.2838	5.0298	1.5832	4.5685
10		3.252	3.9891	3.0552	8.6566	9.3292	8.6754	6.7983	4.9331	2.0206	4.3637
11		3.7127	3.6879	3.359	8.6503	9.4699	8.2535	6.287	4.898	2.6805	4.382
12		3.7559	2.9514	3.5325	8.2162	9.3335	7.4256	5.7884	4.8027	3.504	4.7492
13		3.6256	1.6354	3.6064	7.8255	8.9013	6.4556	5.5365	5.0254	4.9461	5.2212
14		3.2612	0.22896	3.6378	7.7651	8.6082	5.7592	5.745	5.0593	6.8151	5.4617
15		2.6539	0.9681	3.6455	7.9613	8.379	5.5694	6.189	4.6043	8.5434	5.4229
16		1.6994	2.1589	3.7044	8.5223	8.1207	5.663	6.4194	4.0307	8.2713	5.0522
17		0.49027	3.4207	3.7407	9.2189	7.7558	5.5704	6.4009	3.3119	6.7602	4.4868
18		1.5588	4.0453	3.5043	9.8072	7.5304	5.7441	6.2341	2.2859	7.0128	3.6362
19		2.233	4.135	2.8447	10.243	7.3821	6.0262	5.7274	1.6946	6.9219	2.8513
20		2.096	3.8595	2.6384	10.531	7.6925	5.6644	5.2911	2.3566	6.6156	1.8383
21		1.6971	3.4137	2.8392	10.284	7.3904	4.5349	5.3201	3.1551	6.7042	0.28769
22		1.2364	2.7809	3.367	9.9964	7.4807	4.5607	5.501	3.6377	7.1395	1.5487
23		0.50184	1.8229	3.9279	9.8594	7.4267	4.6715	5.7088	4.1097	6.9535	2.6142

Tabla D.17: Datos de velocidad de viento del 11 al 20 de agosto de 2017.

Hora \ Día	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	2.192	5.8607	8.5374	6.7455	2.1301	1.4885	1.795	9.7313	8.9254	9.8249
1	2.2879	6.1123	8.3381	6.8125	2.0681	1.4663	1.9295	9.6358	9.0047	9.7042
2	3.4592	7.0675	8.0669	6.6029	1.8323	1.3349	2.8944	9.8646	9.1967	9.8822
3	4.1895	7.508	8.0942	6.7218	1.7521	1.3351	3.8617	10.261	9.3897	9.9832
4	5.2575	7.6217	8.2299	6.3493	1.7107	1.2634	4.7108	10.435	9.5842	10.038
5	6.2923	7.7726	8.3674	6.1138	1.6486	1.1994	5.5882	10.658	9.898	10.13
6	7.1431	7.8176	8.4205	6.0773	1.4594	1.1004	6.3088	10.696	10.069	10.27
7	7.3348	7.7951	8.4046	6.0956	1.3363	0.97428	7.2887	10.661	10.197	10.395
8	7.3976	8.4814	8.0304	6.0936	1.3533	0.88473	8.5145	10.817	9.9831	10.622
9	7.1231	8.3441	8.0017	5.8923	0.57777	0.047188	9.1039	10.689	9.4991	10.001
10	6.3718	8.1041	7.5549	5.436	0.76671	1.0078	9.219	10.29	9.3681	9.6473
11	5.5938	7.8249	7.2063	4.8212	1.7702	1.976	9.2751	9.9709	9.2455	9.3954
12	4.8669	7.3954	6.8368	4.1376	2.481	2.1821	9.1262	9.382	8.8677	9.2147
13	4.3898	6.8121	6.5745	3.2586	3.2723	2.3553	8.9778	8.9703	8.6367	9.055
14	4.0769	6.5883	6.2497	2.4335	4.1132	2.5987	9.0808	8.6456	8.4646	9.1245
15	3.8245	6.4147	6.4293	1.0466	4.869	2.7158	9.276	8.553	8.4455	9.5093
16	2.9437	6.333	6.6774	1.4507	5.4434	2.9176	9.5389	8.4578	8.5836	9.9841
17	1.6536	6.534	6.8587	3.2069	5.9564	3.5713	9.996	8.7332	9.0572	10.419
18	1.2019	7.4109	7.0423	4.071	5.9443	4.3437	10.48	9.2364	9.8338	10.919
19	1.5293	8.4262	6.9991	3.9995	5.4573	4.2019	10.804	9.5996	10.548	11.231
20	2.0557	8.5529	6.2577	3.5186	4.8573	3.1695	10.814	9.7666	10.808	11.187
21	2.4	8.34	5.7639	2.8979	3.8054	1.7043	10.397	9.4202	10.511	10.763
22	2.8553	7.8689	5.6353	2.8004	2.7133	1.2124	10.338	9.2358	10.301	10.485
23	3.2577	7.7149	5.8667	2.6755	1.9877	1.2762	10.176	8.9854	10.274	10.346

Tabla D.18: Datos de velocidad de viento del 21 al 31 de agosto de 2017.

Hora	Día	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
0		9.2433	8.9239	5.3043	2.9526	2.7623	4.2111	5.0217	4.8326	3.6961	0.99934	1.3923
1		9.151	8.6221	5.4124	2.8609	2.7867	4.3677	4.5881	4.9269	3.4439	1.3111	1.584
2		9.1826	8.6458	5.9619	3.0904	2.8058	3.6996	4.1511	5.3178	3.6187	1.5192	2.1702
3		9.0353	8.8551	6.0075	2.9579	2.9863	3.5146	3.6374	5.3549	3.6109	1.7909	2.4863
4		8.7414	8.9848	5.9904	2.6681	2.6754	3.3037	3.2661	5.1859	3.1231	1.9641	2.9555
5		8.4496	8.9901	5.8569	2.5229	2.4773	2.9649	2.7785	5.0694	2.6778	2.1899	3.4222
6		8.5067	8.8952	5.5232	2.4714	2.2955	2.3218	2.2979	4.8242	2.2514	2.4456	3.7729
7		8.6667	8.5151	5.2382	2.4293	2.1559	1.7132	2.045	4.4392	1.7484	2.6374	4.2674
8		9.4065	8.6982	5.5954	2.1192	1.5798	1.1532	2.0631	4.0537	1.4811	3.095	4.438
9		9.4707	7.8039	5.659	1.6924	1.6507	0.67356	2.8584	4.1002	0.63838	2.7091	4.575
10		9.2137	7.1861	5.6595	2.187	2.7271	1.8532	3.5722	4.5862	1.2966	2.2405	4.7338
11		9.0489	6.6824	5.7025	3.2075	4.0271	3.0999	4.6366	5.3617	2.5241	1.7563	4.9361
12		8.9232	6.1366	5.6643	4.0094	5.0355	4.3007	5.5137	5.9797	3.5931	1.1219	4.9069
13		8.81	5.5671	5.6199	4.8486	5.8297	5.5156	6.3118	6.613	4.5288	0.69777	4.841
14		8.6625	5.2686	5.4221	5.6082	6.2028	6.5032	6.8346	7.1812	5.2204	0.85087	4.7919
15		8.8454	5.3202	5.0877	6.0214	6.5389	7.0744	7.2669	7.5189	5.6693	1.2139	4.8462
16		9.5308	5.4345	4.4423	6.1429	6.7579	7.1628	7.513	7.6492	5.831	1.8233	4.6761
17		10.394	5.6897	3.0497	6.2542	6.835	7.137	7.6322	7.5115	5.7696	2.4556	4.3776
18		10.77	5.7075	1.2679	6.2456	6.6219	6.9752	7.3345	7.125	5.4969	3.2878	4.2177
19		10.339	5.4479	0.67745	5.5058	6.1788	6.6415	6.7489	6.5227	5.0107	3.2974	4.79
20		9.9874	5.6002	0.26164	4.9281	5.8587	6.3697	6.203	5.8491	3.9142	2.6166	4.5475
21		9.5397	5.5325	1.1624	3.8275	5.0428	5.7564	5.3902	4.9568	2.3721	2.0566	4.2226
22		9.0009	5.8281	2.147	2.4937	4.5341	5.4359	5.0972	4.2774	0.91822	1.2488	4.2135
23		8.6798	6.3431	2.7618	1.849	4.2118	5.1982	5.1583	3.8276	0.53296	0.2554	4.3726

Apéndice E

Velocidades de viento de EUR

Tabla E.1: Datos de velocidad de viento del 1 al 10 de marzo de 2017.

Hora \ Día	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
0	3.4794	2.555	15.234	15.248	14.168	11.853	7.4401	7.3309	12.5	11.374
1	3.268	4.9819	14.942	15.333	14.073	11.523	7.0637	8.4802	12.96	11.725
2	2.9622	6.7298	15.022	14.999	13.97	11.241	7.1065	9.3525	12.865	11.707
3	2.7024	8.4335	15.05	14.751	13.976	11.056	6.9989	9.9704	12.852	11.555
4	2.4164	9.9126	15.262	14.501	13.865	10.974	6.9391	10.566	12.777	11.458
5	2.1442	10.872	15.667	14.333	13.627	10.942	6.9478	10.901	12.582	11.386
6	1.8854	11.554	15.939	14.246	13.342	10.636	6.9538	11.172	12.396	11.253
7	2.0305	12.132	15.832	14.431	13.2	10.326	6.5083	11.53	12.08	11.44
8	1.4623	12.552	15.608	14.155	13.151	9.9789	6.4493	11.511	11.734	11.228
9	0.6145	12.864	15.278	14.026	13.057	9.6746	6.2243	11.362	11.682	11.003
10	0.2429	13.046	14.868	13.926	12.888	9.3137	5.9171	11.236	11.632	10.784
11	0.39834	13.163	14.429	13.907	12.51	8.8407	5.4619	11.024	11.16	10.354
12	0.38022	13.191	14.411	13.837	11.944	8.2309	5.1714	11.062	10.883	9.9598
13	0.52998	13.055	14.777	13.544	11.601	7.9125	5.0579	11.155	10.825	9.7212
14	0.78301	13.001	15.297	13.167	11.258	7.8845	5.1758	11.182	10.701	9.6922
15	0.91453	13.169	15.51	12.927	11.01	7.9999	5.4284	11.458	10.613	9.8218
16	0.9338	13.496	15.457	12.598	10.938	8.2491	5.6219	11.879	10.618	10.059
17	0.94769	14.06	15.618	12.434	11.012	8.5844	5.4352	12.132	10.633	10.296
18	0.64026	14.684	16.038	12.859	11.203	9.0405	4.072	12.399	10.668	10.487
19	1.0493	15.507	16.53	13.435	11.342	9.0083	2.4134	12.714	10.772	10.479
20	2.7371	16.018	16.805	13.672	11.31	8.4523	2.7963	13.051	10.643	9.9553
21	3.5524	16.14	16.535	13.803	11.386	7.9448	4.7565	13.084	10.722	9.418
22	3.5094	15.976	15.968	13.925	11.324	7.1191	6.2875	12.923	10.899	9.101
23	2.0824	15.742	15.805	13.898	11.416	6.5384	7.7705	13.002	11.057	9.1917

Tabla E.2: Datos de velocidad de viento del 11 al 20 de marzo de 2017.

Hora	Día	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0		9.1711	4.0085	9.1949	12.073	13.611	13.902	12.785	12.038	13.79	13.482
1		9.414	4.1346	10.189	11.893	13.528	13.991	12.869	12.481	14.126	13.825
2		9.6805	4.0762	10.701	12.23	13.527	14.039	12.991	12.998	14.354	13.97
3		9.8598	4.1544	10.832	12.436	13.509	13.941	13.013	13.228	14.383	13.917
4		10.019	4.2361	10.899	12.622	13.475	13.867	12.938	13.425	14.436	13.813
5		10.116	4.3803	10.767	12.725	13.351	13.853	12.86	13.479	14.439	13.61
6		10.082	4.739	10.374	12.799	13.282	13.881	12.769	13.446	14.456	13.304
7		9.4579	5.1491	9.9157	13.009	12.885	13.674	12.07	13.419	14.317	12.815
8		8.9705	5.0539	9.4336	13.132	12.928	13.487	11.824	13.125	14.144	12.421
9		8.5929	5.5555	8.7437	13.535	12.971	13.409	11.76	12.874	14.002	12.119
10		8.2673	5.9162	8.1197	13.743	12.946	13.248	11.587	12.684	13.847	11.849
11		7.7984	5.986	7.4129	13.834	12.742	12.958	11.265	12.455	13.553	11.579
12		7.377	6.0747	6.8051	13.748	12.462	12.653	11.108	12.349	13.282	11.287
13		7.1265	6.1112	6.6243	13.842	12.167	12.46	11.005	12.337	13.015	11.014
14		6.8369	6.1125	6.7886	14.08	11.949	12.39	11.06	12.277	13.007	10.826
15		6.6665	6.0194	7.242	14.141	11.795	12.362	11.119	12.294	13.039	10.724
16		6.7753	5.6179	7.9665	13.982	11.9	12.329	11.191	12.484	13.175	10.738
17		7.015	4.554	8.8255	13.965	12.335	12.324	11.306	12.987	13.499	10.694
18		7.3722	2.4979	9.4172	14.098	12.75	12.65	11.612	13.615	13.968	10.46
19		7.0457	1.1892	9.809	14.353	12.819	13.108	12.108	13.933	14.21	9.7923
20		5.4226	1.4217	10.074	14.652	13.019	13.134	12.163	13.989	14.229	9.4083
21		4.575	3.0774	10.269	14.797	13.079	13.201	11.958	14.07	14.298	9.7074
22		4.4964	5.4976	10.898	14.72	13.092	13.176	11.693	14.201	14.218	10.108
23		4.4824	7.5917	11.353	14.451	13.429	13.084	11.741	14.421	14.085	10.544

Tabla E.3: Datos de velocidad de viento del 21 al 31 de marzo de 2017.

Día		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Hora												
0		11.532	9.1584	10.701	7.2936	3.6204	2.8013	12.077	3.9488	5.4485	5.7763	3.5177
1		11.786	9.4801	11.107	7.4351	2.8478	4.0766	11.457	3.9086	5.5572	5.6422	2.9692
2		11.985	9.781	11.58	7.5774	2.2446	5.1378	10.971	4.0588	5.6847	5.5565	3.4973
3		11.815	10.1	11.776	7.5619	1.8217	5.7021	10.709	4.3171	5.7734	5.5333	3.7621
4		11.647	10.389	11.961	7.5106	1.5033	6.1873	10.783	4.5221	5.8164	5.5511	3.9926
5		11.366	10.581	12.044	7.3653	1.5077	6.5107	11.112	4.6309	5.8164	5.5287	4.1134
6		11.107	10.719	12.042	7.0265	1.8643	6.6652	11.374	4.723	5.7682	5.5236	4.0158
7		11.031	10.598	11.729	6.2626	1.687	6.6974	11.358	4.6245	5.7057	5.698	3.3867
8		10.456	10.29	10.942	5.2742	1.218	6.172	11.191	4.5534	5.6284	5.7352	2.5482
9		10.164	10.015	10.205	4.5181	0.53541	5.5964	10.915	5.003	6.2667	6.2072	1.5724
10		9.9361	9.7328	9.6436	3.7717	0.41873	4.8836	10.357	5.7873	7.1567	6.8791	0.54301
11		9.6733	9.4335	8.9649	2.7179	1.1868	3.7828	9.623	6.4406	7.8574	7.2862	1.2376
12		9.4096	9.0981	8.3109	1.4068	1.9622	2.6899	9.1649	7.1101	8.3694	7.5712	2.8342
13		9.2821	9.082	7.8464	0.48192	2.6208	1.2266	8.9843	7.6869	8.703	7.7083	4.4555
14		9.4613	9.3037	7.6109	1.9817	3.3881	1.4561	8.8294	8.0853	8.8214	7.7014	5.6896
15		9.7166	9.6684	7.6482	3.9724	4.0785	4.148	8.7646	8.2754	8.892	7.5564	6.4506
16		9.9326	10.026	7.9391	5.8373	4.7088	6.3066	8.8734	8.1881	8.8509	7.3484	6.7305
17		10.11	10.193	8.346	6.8951	4.9836	7.0337	9.1094	8.0157	8.6569	6.695	6.4665
18		10.188	10.248	8.7404	6.4775	4.4084	6.3864	9.3362	7.7121	8.188	5.7936	5.5368
19		10.006	10.14	8.9403	5.0034	4.1093	5.0142	9.6239	7.2213	7.5516	5.0095	4.8279
20		9.3856	9.3091	8.6692	4.5039	3.2109	4.6326	10.011	6.5741	7.0505	3.6638	4.31
21		8.9067	8.7101	8.2213	4.4594	2.3417	4.855	10.285	6.0764	6.7019	1.3478	3.8339
22		8.6658	8.769	7.7913	4.1626	2.0909	4.6278	10.447	5.7754	6.366	0.99657	3.5756
23		8.4987	9.2301	7.6709	3.842	2.9055	4.4238	10.599	5.5351	6.229	1.8112	3.7044

Tabla E.4: Datos de velocidad de viento del 1 al 10 de abril de 2017.

Hora \ Día	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
0	3.8627	6.0051	6.2819	1.5973	4.6739	12.257	16.104	12.455	7.5575	3.2391
1	4.2939	5.9113	6.0566	1.3669	4.6901	12.618	15.507	12.21	7.2234	2.8924
2	4.4744	5.87	5.8647	1.1405	4.4841	13.016	14.925	11.668	7.5736	1.8658
3	4.5856	5.8634	5.8472	0.84294	4.4308	13.374	14.358	11.458	7.3529	1.7942
4	4.711	5.8739	5.8028	0.85172	4.3698	13.524	14.166	11.221	6.9522	1.4411
5	4.8084	5.8638	5.7547	0.96462	4.2836	13.678	13.998	11.051	6.5444	1.0707
6	4.9857	5.8966	5.6115	1.255	4.1985	13.73	13.86	10.999	6.1663	0.79993
7	5.2313	6.0088	5.4847	1.6844	4.0664	13.883	13.666	10.932	5.7493	0.80409
8	5.4763	6.2073	5.5154	2.3691	3.9452	13.645	13.871	10.556	5.0988	0.80519
9	6.2022	6.5699	5.4926	2.2469	4.0129	13.939	13.477	10.405	4.4336	0.46896
10	7.0397	7.117	5.7829	3.0132	4.5837	14.204	13.028	10.364	3.6215	0.51114
11	7.5493	7.7855	6.253	3.9419	5.2779	14.397	12.703	10.221	2.74	1.3755
12	8.0364	8.1761	6.4675	4.9979	5.9328	14.474	12.484	9.8393	1.6508	1.9691
13	8.3666	8.6218	6.462	5.8476	6.3641	14.698	12.485	9.5535	0.84254	2.517
14	8.5368	8.9436	6.2654	6.4757	6.6314	15.14	12.44	9.218	0.67734	2.9327
15	8.6015	9.0782	6.2368	6.8778	6.6416	15.774	12.563	8.9081	1.9221	3.4282
16	8.4841	9.0508	6.1931	7.0725	6.4023	16.405	12.847	8.7572	3.4526	4.1496
17	8.2391	8.9669	6.0998	7.0224	6.0147	16.718	12.963	8.8764	4.971	5.6989
18	7.8339	8.7874	5.6903	6.7407	5.1653	16.799	13.007	9.2209	6.1141	6.2003
19	7.2401	8.5109	4.8654	5.8709	3.6871	16.693	13.061	9.4752	6.1396	5.4856
20	6.6185	7.9993	4.4264	5.3486	3.0148	16.589	13.485	9.6577	4.6995	4.7243
21	6.3714	7.3011	3.4115	4.7142	1.5409	16.342	13.542	9.2318	3.4602	4.2165
22	6.174	6.7343	2.5448	4.3167	3.9813	16.076	13.302	8.5084	3.1664	2.8536
23	5.917	6.2416	2.0204	4.3586	8.108	15.939	13.1	7.5142	3.1182	1.3707

Tabla E.5: Datos de velocidad de viento del 11 al 20 de abril de 2017.

Hora	Día																			
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20										
0	0.6497	9.5124	12.684	9.847	9.2803	7.6021	3.5553	2.4916	5.7304	7.9327										
1	1.3932	9.6158	12.762	10.226	9.4012	7.8327	3.9778	2.3332	6.9978	8.1472										
2	2.7239	10.181	12.912	10.727	9.8606	8.6297	4.2324	3.4655	8.8083	8.8047										
3	4.0743	10.875	13.086	11.119	10.116	9.1701	4.5092	4.0708	9.4044	8.7451										
4	4.8717	11.582	12.955	11.259	10.384	9.4093	5.132	4.4973	9.0447	8.665										
5	5.6823	12.089	12.765	11.421	10.595	9.6507	5.392	4.8771	8.8296	8.6066										
6	6.5825	12.16	12.477	11.513	10.629	9.8384	5.352	5.1394	8.5851	8.2876										
7	7.271	12.021	12.123	11.512	10.57	9.8881	5.0305	5.4109	8.4155	8.0339										
8	7.1286	11.823	11.579	11.104	10.236	9.7996	4.7073	6.8758	8.6057	7.0316										
9	7.4198	11.185	11.131	10.746	9.6981	9.1889	4.0708	6.9444	8.0719	6.3591										
10	7.5088	10.954	10.9	10.479	9.0697	8.4599	3.5106	6.4442	7.4735	5.6542										
11	7.7188	10.909	10.569	10.193	8.4315	7.6833	2.8367	5.9811	6.9232	4.884										
12	7.7908	10.741	10.039	9.6656	7.6172	6.6598	1.8689	5.3564	6.2571	3.9049										
13	7.9891	10.539	9.7177	9.2038	6.8902	5.9002	0.84106	4.9028	5.6934	3.0748										
14	8.3819	10.289	9.611	8.8621	6.5141	5.4141	0.25501	4.5902	5.435	2.2123										
15	8.8984	10.049	9.7263	8.7581	6.4103	4.9325	1.876	3.9131	5.3118	1.0632										
16	9.3433	9.9404	10.153	8.9405	6.4005	4.4082	3.5366	1.5723	5.1616	0.70724										
17	9.4504	9.9188	10.614	9.3419	6.5555	3.8588	5.0923	1.1219	5.1105	2.2335										
18	9.2666	10.122	10.901	9.8351	6.8583	2.979	6.2141	2.2064	3.3117	3.7972										
19	8.923	10.39	10.93	10.115	7.2405	2.2119	6.0762	2.1949	2.3818	4.5647										
20	8.6478	10.4	10.666	10.164	7.8888	2.7335	5.1024	3.2917	3.0358	4.4698										
21	7.8391	10.757	10.032	9.5374	7.9926	2.1527	4.1411	3.4004	5.6226	3.2117										
22	6.8237	11.461	9.5348	9.069	7.5164	0.98493	3.715	4.0713	7.0019	1.5589										
23	6.6197	11.805	9.3049	8.9138	6.7322	1.9159	3.3077	4.8726	8.0784	2.0645										

Tabla E.6: Datos de velocidad de viento del 21 al 30 de abril de 2017.

Hora \ Día	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
0	4.4165	3.0721	1.3609	12.302	2.851	6.9511	6.8553	5.0386	6.1783	7.783
1	5.3348	2.7671	1.7907	12.06	3.7775	7.0722	6.9096	5.0641	5.9269	7.8949
2	6.2391	2.3343	2.8691	11.997	3.8734	7.1468	6.6268	5.0811	5.7433	7.7525
3	6.4521	2.2095	3.8704	11.78	4.4723	7.3666	6.3028	5.2287	5.545	7.5963
4	6.4661	2.3654	4.8182	11.282	4.7991	7.4948	6.1875	5.4021	5.3636	7.3865
5	6.425	2.6526	5.6923	10.889	5.1511	7.5729	5.9757	5.5457	5.2918	7.1508
6	6.184	2.7862	6.7832	10.577	5.3197	7.6365	5.6766	5.6709	5.2578	6.9191
7	5.9569	2.7415	7.9569	10.307	5.4427	7.5848	5.4654	5.7683	5.3211	6.5917
8	5.2646	1.8599	8.6466	10.115	5.8137	7.6305	5.3982	5.7546	5.3601	6.3247
9	4.9535	0.78476	9.0868	9.5346	6.1659	7.711	5.5427	6.08	5.9323	6.3034
10	4.6934	1.1749	9.3208	9.0667	6.7645	7.8312	5.9514	6.4652	6.73	6.6238
11	4.3338	2.8301	9.439	8.5498	7.4353	7.9931	6.5043	7.065	7.6056	7.0561
12	3.7642	3.9788	9.5882	7.7608	7.9573	8.2918	6.9061	7.6552	8.1906	7.2295
13	2.9991	4.9116	9.8549	6.7928	8.4136	8.6107	7.0639	8.2366	8.7628	7.1888
14	1.9568	5.6722	10.179	5.9659	8.694	8.898	7.137	8.7221	9.2548	6.966
15	0.75837	6.1577	10.47	5.3937	8.7862	9.0857	7.2798	8.9965	9.4968	6.6937
16	2.0949	6.2898	10.804	4.9812	8.6889	9.0747	7.3773	9.0774	9.5746	6.2427
17	4.1152	6.2076	11.162	4.6648	8.5012	8.9701	7.4651	8.957	9.4739	5.8256
18	5.9824	5.8992	11.401	4.3473	8.2357	8.7093	7.2469	8.6962	9.2837	5.3005
19	6.3088	4.9338	11.577	3.277	7.8108	8.2795	6.7137	8.204	9.0234	4.4777
20	5.4024	4.4403	11.691	1.5031	7.4476	7.7428	6.0716	7.6774	8.67	3.1128
21	4.4878	3.4952	11.762	0.71386	7.1547	7.4612	5.7007	7.2181	8.2817	0.54256
22	3.8382	2.436	12.152	1.1512	6.9847	7.1743	5.4906	6.9412	7.9001	2.4152
23	3.4677	2.1955	12.41	2.2257	6.954	6.9723	5.3332	6.5941	7.5833	4.7821

Tabla E.7: Datos de velocidad de viento del 1 al 10 de mayo de 2017.

Hora \ Día	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
0	5.8561	6.6247	3.4051	4.6399	13.051	12.262	5.9119	2.8291	1.7844	0.98942
1	7.1206	6.7371	3.3868	4.7572	13.188	12.227	5.691	3.0069	2.1132	1.9744
2	7.8153	7.13	3.1652	4.7313	13.459	11.946	5.6232	3.0022	2.6456	3.8447
3	8.061	7.0679	2.9254	4.8176	13.717	11.834	5.5852	3.2107	3.9852	4.3201
4	8.2162	6.8218	2.7666	4.949	13.478	11.357	5.563	3.5283	4.9213	4.6646
5	8.4847	6.6044	2.6146	5.0346	13.382	10.974	5.5656	3.8297	5.6187	5.0525
6	8.9405	6.315	2.5822	5.0659	13.167	10.643	5.5768	3.9992	5.9533	5.3421
7	9.4198	6.0021	2.5724	5.0706	13.023	10.424	5.5871	4.0816	5.9578	5.513
8	9.3276	5.5708	2.4579	4.9836	13.032	10.188	5.5421	3.8329	5.7341	5.812
9	8.909	5.1125	2.8988	5.1596	13.097	9.7276	5.26	3.2757	5.4483	5.5497
10	8.2134	4.5461	3.6514	5.5757	13.345	9.1738	5.2473	3.0729	5.046	5.4325
11	7.6997	3.8937	4.5586	5.9992	13.524	8.6766	5.2828	2.7761	4.7712	5.1708
12	7.2654	3.2134	5.1297	6.0316	13.441	8.1175	5.0453	2.245	4.6065	4.7096
13	6.9221	2.4542	5.7497	5.8618	13.241	7.5047	4.8658	1.432	4.5328	4.3446
14	6.7918	1.5487	6.3137	5.5696	12.982	7.1267	4.7866	0.39877	4.5381	3.8925
15	6.8274	0.24167	6.8468	5.1016	12.64	6.8937	4.7196	1.0044	4.2356	3.1441
16	6.8835	2.4327	7.145	4.323	12.401	6.8269	4.3039	1.9339	2.9711	1.7111
17	6.7105	5.1461	7.1856	5.1766	12.254	6.9129	3.0178	3.2134	0.41228	0.57895
18	5.8009	7.1274	6.981	4.3458	12.171	7.0838	1.2823	4.3217	2.8064	1.7391
19	4.0805	7.2299	6.4124	7.0784	12.161	7.4092	0.56758	4.7252	4.6454	4.084
20	2.464	5.6861	5.7459	8.6351	12.028	7.651	1.8233	4.7207	4.5812	4.9863
21	1.9425	4.2245	5.1334	11.229	11.804	7.133	2.3982	4.1396	3.7882	4.4379
22	2.0037	3.9012	5.0248	11.823	11.791	6.6663	2.682	3.2498	2.6328	3.5891
23	3.3361	3.6065	4.7455	11.568	11.732	6.2411	2.9284	2.5311	0.94798	2.889

Tabla E.8: Datos de velocidad de viento del 11 al 20 de mayo de 2017.

Hora	Día																			
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20										
0	3.5477	3.1173	1.3558	2.647	1.478	2.9574	4.2047	4.1601	3.5319	3.2265										
1	3.3511	2.9664	1.3156	2.5017	0.89542	2.8042	4.1726	4.107	3.5725	3.0426										
2	3.4918	1.3353	1.8977	2.3693	0.33249	2.3884	3.8271	4.1399	2.8112	1.9015										
3	3.3822	1.1873	1.7721	2.176	0.38684	2.0554	3.6957	3.997	2.9875	1.9727										
4	3.2173	1.4453	1.6318	1.895	0.60701	1.7015	3.5726	3.9963	3.0148	2.2442										
5	3.132	1.8371	1.517	1.4627	0.67492	1.434	3.5616	3.9455	3.0937	2.4043										
6	2.9095	2.0695	1.3188	1.1084	0.49947	1.2825	3.5949	3.9437	3.1669	2.6241										
7	2.441	2.0699	1.1167	0.80816	0.36542	1.2393	3.7453	3.9108	3.168	2.7208										
8	2.5491	2.4141	1.7608	0.85997	0.40194	1.2866	3.6728	3.6237	2.8213	2.5013										
9	2.4037	3.4282	1.4494	0.59128	0.94485	1.8112	3.8865	3.6824	3.2118	3.1383										
10	3.0151	4.472	1.1904	1.0682	1.7721	2.4381	4.6513	3.9167	3.6267	3.8753										
11	3.8276	5.527	2.4737	2.1318	2.7559	3.2706	5.5852	4.4511	4.445	4.818										
12	4.6529	6.1864	3.6535	3.019	3.5205	3.879	6.3305	4.9057	5.3095	5.4788										
13	5.3439	6.6796	4.7808	4.0562	4.2232	4.4788	6.8963	5.3681	6.0853	6.0736										
14	6.0035	7.0423	5.0454	4.8757	4.8707	5.1381	7.2666	5.8666	6.5783	6.5343										
15	6.4152	7.0789	4.9546	5.4583	5.4137	5.7633	7.386	6.3194	6.731	6.8014										
16	6.5932	6.6257	4.7528	5.8203	5.8178	6.1978	7.3415	6.5051	6.6756	6.8838										
17	6.7402	6.1948	4.83	5.8504	5.9862	6.3125	7.2254	6.5261	6.5019	6.6838										
18	6.8079	5.7301	4.8996	5.5649	6.0192	6.1497	7.0629	6.2676	6.117	6.3332										
19	6.5057	5.2415	4.7128	4.7008	5.3747	5.3721	6.5673	5.6265	5.5238	5.9524										
20	5.7287	4.8495	4.4303	3.8573	4.4736	4.9782	5.891	5.1012	5.0386	5.4039										
21	4.6538	3.9793	3.5745	3.236	3.8788	4.7288	5.2127	4.6391	4.4163	4.5749										
22	4.4285	3.1833	2.7563	2.2956	3.4453	4.3808	4.6111	4.1403	3.749	3.5914										
23	4.5266	2.7873	2.0977	1.8901	2.7611	4.2178	4.2943	3.7041	3.429	2.9143										

Tabla E.9: Datos de velocidad de viento del 21 al 31 de mayo de 2017.

Hora	Día	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
0		2.3507	1.5237	3.077	3.4131	1.5975	2.3342	3.4363	3.2753	3.8943	2.0556	2.3086
1		1.6238	1.3412	2.8794	3.1952	1.2914	2.044	2.7177	2.9206	3.7136	1.57	2.1579
2		1.0626	1.2902	2.9405	3.492	1.2139	1.182	2.5819	3.0377	2.9705	1.5232	2.4461
3		0.68954	0.94988	2.9344	3.4132	1.1213	0.84494	1.6756	2.8751	2.4123	1.574	2.7302
4		0.20801	0.99875	2.8335	3.7054	1.1959	0.66945	1.1342	2.7538	2.3734	1.4218	2.7141
5		0.53803	1.0839	2.7789	4.0138	1.3411	0.5394	0.94882	2.6958	2.3751	1.2395	2.7321
6		1.075	1.0662	2.7534	4.2509	1.4523	0.45794	1.0304	2.6188	2.548	1.0249	2.8553
7		1.4926	1.1347	2.7372	4.3022	1.4872	0.43113	1.3855	2.6432	2.7402	1.1181	3.1939
8		1.5273	0.99194	3.3274	3.9856	1.6593	0.62092	1.5723	2.368	2.0288	1.4908	3.3675
9		1.0261	0.95845	4.1643	3.7143	1.646	1.1026	1.029	4.1127	2.386	2.0432	3.4103
10		1.4142	1.3013	5.0189	3.7781	2.1726	1.9646	1.1491	4.4777	2.973	0.89742	2.9682
11		1.7199	1.5229	6.0001	4.148	2.9836	2.9669	1.7955	5.0524	3.6981	0.31084	2.1481
12		2.0952	1.3873	6.761	4.5786	3.7447	3.6952	2.3794	5.6109	4.2802	1.7031	0.092923
13		2.3798	0.60731	7.339	5.1645	4.3591	4.407	3.3298	6.1848	4.954	3.2479	2.2824
14		1.7018	0.67505	7.6876	5.6417	4.9163	5.018	4.4331	6.637	5.7923	4.504	4.2193
15		1.0874	1.6499	7.8523	5.9473	5.3564	5.296	5.2023	6.8743	6.3193	5.199	5.2605
16		1.0481	3.2649	7.7975	6.0167	5.3798	5.5521	5.6288	7.0313	6.2255	5.2864	4.9718
17		1.4452	4.7756	7.5739	5.9909	5.4007	5.8432	5.9947	7.093	6.2189	4.9399	3.6335
18		2.5465	6.0493	7.142	5.8222	5.271	5.8467	6.2858	6.8856	7.0852	4.2692	1.7884
19		3.84	6.2392	6.5926	5.3685	4.9176	5.5744	5.8881	6.3363	7.8457	3.335	0.91302
20		4.6397	5.3628	5.9666	4.9918	4.3572	4.9868	5.3125	5.8002	8.1249	2.7607	2.2812
21		4.1988	4.6295	5.3427	3.2466	3.9403	4.3534	4.8343	4.9944	8.0323	2.3328	2.9878
22		2.9346	4.6767	4.7839	1.7861	3.406	3.8194	5	4.8127	7.4584	2.274	2.569
23		2.0731	4.5732	4.3055	0.98217	2.8253	3.3053	4.8507	5.2234	6.4667	2.4164	2.12

Tabla E.10: Datos de velocidad de viento del 1 al 10 de junio de 2017.

Hora \ Día	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
0	4.6019	2.0206	1.8171	1.2223	3.2107	3.9642	4.0622	6.4182	5.7918	1.422
1	4.7458	1.6916	2.0778	1.1954	3.1845	4.0199	3.9663	7.3202	6.1472	0.50106
2	2.0261	3.7355	1.8594	1.0502	3.0007	4.1284	3.5422	8.0105	6.3776	1.0729
3	3.0259	4.121	1.9419	1.0153	2.8811	4.3567	3.2601	8.5768	6.8763	1.8209
4	3.2833	4.221	1.8079	1.199	2.7512	4.2052	2.9715	8.6044	7.1982	2.0364
5	3.6523	4.3727	1.7565	1.2697	2.6615	4.0683	2.7197	8.436	7.3448	2.1991
6	3.8462	4.5763	1.6819	1.2762	2.5806	3.7961	2.4625	7.9864	7.1745	2.2402
7	4.0217	4.6939	1.7447	1.1808	2.5095	3.4736	2.2076	7.7707	6.878	2.1677
8	3.6078	5.8996	1.038	0.98761	2.1709	2.9923	1.6347	7.8368	6.013	1.6396
9	3.0064	5.1166	1.083	0.53772	2.7001	3.4647	1.5767	7.5526	5.6325	0.81598
10	2.8025	4.9032	2.0567	0.254	3.1445	4.1734	1.7508	7.4836	5.1701	0.34758
11	2.8898	4.6832	3.0595	0.62396	3.8324	5.0072	2.1415	7.2788	4.6762	1.6427
12	3.0396	4.8573	3.7792	1.2527	4.4697	5.5952	2.1336	7.0353	4.0132	2.7611
13	2.689	4.7883	4.2744	1.9583	5.1103	6.0747	2.3852	6.8289	3.4805	3.9273
14	2.0957	4.8244	4.6786	2.9713	5.7049	6.454	2.8432	6.6663	2.77	5.0576
15	1.5902	4.7684	5.0318	4.0671	6.145	6.7483	3.0005	6.5241	1.5435	5.9456
16	3.7206	4.7762	5.3014	4.9937	6.392	6.8228	3.0225	6.6172	0.98336	6.305
17	4.4342	4.5325	5.2276	5.5252	6.4276	6.7097	2.8618	6.9584	3.4827	6.3307
18	4.3129	4.1754	4.7856	5.5496	6.212	6.3581	2.6428	7.3664	5.6208	6.125
19	3.821	3.4732	4.1261	5.1031	5.6372	5.7431	2.4661	7.7479	6.1355	5.8
20	3.5565	2.7416	3.4183	4.2108	4.7884	5.3518	1.8581	7.9642	4.8781	5.1429
21	3.2206	1.8558	2.3246	3.2973	4.0043	4.859	0.98677	7.2035	3.1523	4.1989
22	3.9487	1.0421	1.7616	3.0093	3.5803	4.4463	1.8316	6.0958	2.6748	3.2714
23	4.0086	0.62172	1.6941	3.1188	3.3522	4.3537	3.1312	5.6047	2.5954	2.4789

Tabla E.11: Datos de velocidad de viento del 11 al 20 de junio de 2017.

Hora \ Día	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	2.1539	0.88319	3.348	0.38622	0.62827	1.8006	3.834	0.76904	1.5058	7.825
1	2.5301	0.34281	3.3403	0.56908	0.60665	2.3501	4.4398	1.4702	2.7799	7.8888
2	2.7392	0.806	3.6959	1.4326	0.80637	1.9723	5.7935	1.686	4.4897	7.9272
3	3.0162	1.2153	3.2085	1.2381	0.74011	2.1864	6.0005	2.0329	5.1657	8.0148
4	2.9639	1.7725	3.1805	1.1863	0.74417	2.6998	6.1102	2.2637	5.5391	8.0537
5	2.9496	2.2784	2.9619	1.2037	0.96917	3.5891	6.2041	2.547	5.8338	8.1472
6	2.8237	2.2768	2.6819	1.3483	1.6639	4.3263	6.2353	2.6465	5.9725	8.2383
7	2.6338	2.0243	2.5206	1.5428	2.7385	4.9847	6.1588	2.6972	6.0461	8.162
8	2.0759	1.8549	3.9922	2.0388	3.2152	5.1202	5.4774	3.0937	6.463	7.9472
9	2.0465	0.76506	3.5889	1.4022	3.0375	4.8381	5.231	2.5654	6.4744	7.8073
10	2.049	1.1478	3.7514	1.3893	2.7568	4.6992	5.0473	2.4585	6.3258	7.9237
11	2.2274	2.7485	3.9438	2.7212	2.3372	4.4627	4.6241	2.3649	6.2271	8.025
12	2.5775	3.5119	4.2623	3.6596	1.7828	4.0708	3.6858	2.1402	6.1668	7.9941
13	3.1558	4.3065	4.5104	4.4049	1.66	3.6592	2.7217	1.7453	6.2922	7.8446
14	4.0524	5.0027	4.572	4.8676	1.5086	3.0711	1.7297	0.93791	6.5277	7.7726
15	4.7303	5.4811	4.3932	4.9891	1.8243	2.3848	0.9846	0.71477	6.9137	7.6561
16	5.0768	5.9065	4.1497	4.8255	1.5126	1.9598	0.37423	2.251	6.7475	7.9738
17	5.042	5.5748	3.9358	4.5576	1.588	1.3865	1.9101	4.6183	6.4303	8.3621
18	5.0864	5.2048	3.8311	4.1521	1.672	2.1707	2.5077	5.4897	6.575	8.7525
19	4.9125	4.5544	3.682	3.4521	1.4455	2.2398	2.8233	4.441	7.3939	8.9612
20	4.8105	4.2954	3.8205	3.0212	1.4379	1.9694	2.5664	3.143	8.1841	8.9425
21	4.1485	4.1465	3.2997	2.2942	1.2489	1.6298	2.0042	2.1286	8.4009	8.2402
22	3.2035	3.6454	2.3021	1.573	1.2766	1.589	1.412	1.4504	8.352	7.3705
23	2.1581	3.0823	1.2886	1.1449	1.9669	1.9209	0.63286	0.45148	8.1049	6.1483

Tabla E.12: Datos de velocidad de viento del 21 al 30 de junio de 2017.

Hora \ Día	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
0	6.3692	1.8006	2.5377	2.8269	3.2746	9.8376	9.3761	2.6059	2.5925	2.125
1	6.0765	1.8266	2.2111	2.271	3.805	9.8591	9.1524	1.7523	2.2819	1.9489
2	5.8104	1.6419	2.3136	2.1605	3.9024	9.24	9.1837	0.31508	1.9141	1.9727
3	5.9384	1.474	2.6413	1.8702	4.5667	9.0184	8.7668	1.3119	1.6023	1.3126
4	5.6672	1.255	2.752	1.3702	4.9317	8.6538	8.2986	2.3088	1.3678	1.3652
5	5.3604	1.0482	2.662	1.0181	5.3134	8.3187	7.8121	3.1596	1.1613	1.4646
6	4.8979	0.91163	2.4756	0.73962	5.8167	8.0139	7.4321	3.4942	1.1111	1.3362
7	4.6228	1.029	2.5075	0.57196	6.2429	7.9743	7.0963	3.5987	1.0395	1.3509
8	3.7804	1.2023	2.8957	0.18473	6.5346	7.8882	6.8436	3.1804	1.0315	0.9507
9	3.4012	1.8784	3.5824	1.1606	6.6523	7.7057	5.993	2.4768	0.89334	0.9737
10	3.9514	2.1743	4.1585	2.3428	6.5973	7.7596	5.1732	1.7039	1.5291	0.96713
11	4.5309	2.4894	5.0082	3.6945	6.5085	7.8046	4.2664	0.64082	2.5299	1.0673
12	4.7918	2.8793	5.6254	4.5585	6.3504	7.6557	3.6821	0.61955	3.3457	1.0805
13	4.7274	3.4917	6.3475	5.6971	6.4162	7.8035	3.4328	1.7611	4.1129	0.96341
14	4.3302	4.3506	6.9126	6.4779	6.6818	7.8809	3.5291	2.9804	4.7962	1.126
15	3.2789	5.1136	7.0182	6.3847	7.0104	8.2455	3.4758	4.1847	5.4078	1.6073
16	1.2576	5.7992	7.0258	5.73	7.596	8.6699	2.5774	5.0233	5.9094	2.2486
17	1.2437	6.1548	6.9408	4.1241	8.6198	9.172	1.9903	5.4015	6.0497	2.8824
18	3.8938	6.0833	6.5497	2.5196	9.6653	9.5626	1.1578	5.424	5.92	3.0097
19	5.0175	5.6191	5.7506	2.3855	10.085	9.7288	1.0226	5.2023	5.5646	1.695
20	4.5622	5.0022	4.9426	2.3885	10.039	9.6815	2.6372	4.7516	5.2296	1.5334
21	3.476	4.2271	4.042	2.3935	9.6986	9.3016	3.1356	3.8791	4.3619	1.0493
22	2.4914	3.2834	3.6751	2.3878	9.4018	8.8925	2.6073	2.9008	3.5058	0.71781
23	1.8513	2.5943	3.62	2.3558	9.2789	8.3379	1.7918	3.0621	2.5673	0.70758

Tabla E.13: Datos de velocidad de viento del 1 al 10 de julio de 2017.

Hora \ Día	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
0	0.73369	10.367	8.421	11.335	8.9429	7.7582	5.0027	8.9434	8.178	10.79
1	0.6851	10.139	8.7092	11.257	8.687	7.425	5.121	8.0416	7.9297	10.468
2	1.5826	10.219	10.359	11.437	8.8806	7.2725	7.6309	8.1684	7.9973	10.319
3	2.0117	10.009	10.969	11.316	8.9426	6.9175	7.7766	7.8657	8.059	9.9774
4	3.1289	10.196	10.782	11.027	8.993	7.0517	7.9478	7.6739	8.2723	9.755
5	4.3479	10.311	10.624	10.727	9.0418	7.1019	7.9957	7.6012	8.4477	9.5838
6	5.5893	10.459	10.378	10.305	9.0985	7.0303	7.9105	7.663	8.3508	9.2486
7	6.7162	10.631	10.515	10.101	9.2619	6.9817	7.907	7.7849	8.1171	8.8587
8	7.7327	10.579	10.756	10.161	9.6316	7.8626	8.6788	6.9567	7.0174	8.6624
9	7.907	10.899	10.464	9.7204	9.2782	7.5933	8.5202	6.6865	6.1856	8.1259
10	7.8533	11.111	10.169	9.3629	8.9529	7.1625	8.3467	6.7678	6.1906	8.098
11	7.8173	11.228	9.8965	8.9749	8.7189	6.7398	8.2668	6.8209	6.1684	8.0979
12	7.6613	11.18	9.6569	8.3858	8.4639	6.2188	8.027	6.8154	6.0824	7.9368
13	7.6562	11.023	9.5112	7.6994	8.2094	5.8698	7.7733	6.7588	6.3589	7.4704
14	7.7784	10.945	9.3379	7.4738	7.9674	5.5777	7.6024	6.7138	6.6343	7.2163
15	7.8979	10.666	9.3998	7.4681	7.8927	5.6666	7.5184	6.9355	7.0445	7.0975
16	8.0632	10.322	9.559	7.3939	7.9847	5.9005	7.9563	7.428	7.4247	7.1335
17	8.2335	9.9837	9.4581	7.4054	7.8064	6.3734	8.7685	8.0464	7.8221	7.5027
18	8.2292	10.085	9.456	7.7587	7.388	6.7942	9.5451	8.3888	8.4021	8.0407
19	8.2673	10.07	9.3597	8.1054	7.4395	6.91	9.8619	8.8291	8.7081	8.4897
20	8.9751	9.8645	9.5986	8.633	7.7294	6.656	10.133	8.9372	9.0379	8.8378
21	9.5125	9.3411	9.8949	9.0834	7.9728	6.5003	10.106	8.6882	9.2419	8.6666
22	9.5378	9.0031	10.078	8.8369	8.0348	6.4758	9.9762	8.4567	9.3978	8.4039
23	9.1771	8.6012	10.241	8.4055	8.3666	6.3495	9.5744	8.5804	9.4783	7.9277

Tabla E.14: Datos de velocidad de viento del 11 al 20 de julio de 2017.

Día		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Hora											
0		8.6585	7.7584	9.0153	9.0289	3.8118	5.7605	2.3999	4.0112	7.4699	12.158
1		8.6048	7.4807	8.7952	9.1479	4.4412	5.9	2.2936	4.3591	7.4643	11.899
2		8.7205	8.0861	9.084	9.2457	6.5921	6.1727	2.0008	5.0524	7.8179	11.911
3		8.7439	7.9793	9.4351	9.8477	6.8614	6.1728	1.9477	5.6358	8.2593	12.002
4		8.77	7.7467	9.7076	10.388	7.2802	6.1717	2.5381	6.1517	8.4423	12.041
5		8.8135	7.5404	9.8711	10.738	7.7509	6.2059	3.0364	6.6131	8.6557	12.221
6		8.82	7.4518	9.7906	10.813	8.2946	6.3214	3.1735	6.9954	8.5903	12.41
7		8.827	7.4842	9.6163	10.71	8.5349	6.403	3.3266	7.2253	8.6902	12.597
8		8.8028	8.2204	9.7661	10.386	8.7278	6.7175	3.2032	7.2347	9.4475	13.05
9		8.3514	7.9749	9.3765	9.6667	8.4769	6.526	2.5376	7.2677	9.7642	12.926
10		8.0344	7.8893	9.1849	9.058	8.1777	5.937	2.6703	7.1536	10.186	12.799
11		7.6554	7.753	8.9892	8.4796	7.6597	5.274	2.5855	7.0319	10.465	12.653
12		7.178	7.4751	8.6869	7.8718	6.9799	4.3852	2.4089	6.7624	10.408	12.516
13		6.6579	7.3491	8.2493	7.1591	6.2149	3.8539	2.044	6.7393	10.203	12.267
14		6.3546	7.3784	7.8059	6.6434	5.6139	3.692	1.5915	6.9167	10.309	12.109
15		6.3555	7.3658	7.6801	6.3759	5.1128	3.6394	0.90046	7.2496	10.633	12.088
16		6.4237	7.3752	7.4293	5.7543	4.814	3.5895	0.11851	7.4105	11.058	12.056
17		6.7014	7.6391	7.2524	4.1334	4.7942	3.0678	0.64042	7.4173	11.383	12.132
18		6.5593	7.8855	6.4667	3.1554	5.2261	1.9392	0.49792	7.1875	11.483	12.512
19		6.2876	8.1925	5.3187	2.2825	5.6512	0.81423	0.56632	6.3844	11.654	12.789
20		6.3662	8.2766	3.9943	1.9951	5.6433	0.2971	0.19576	5.1688	12.044	12.978
21		6.475	8.1794	3.9245	1.6912	5.6453	0.70589	0.17556	4.0535	12.117	12.928
22		6.817	8.1589	4.8838	1.6814	5.9642	1.7006	0.6353	3.9503	11.999	13.054
23		6.7622	7.9899	6.3213	0.9587	6.1363	2.5718	0.84143	4.3839	11.935	13.273

Tabla E.15: Datos de velocidad de viento del 21 al 31 de julio de 2017.

Hora \ Día	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
0	13.901	10.71	4.7256	6.9704	8.5236	13.523	14.041	12.561	8.1938	2.8465	5.2277
1	13.783	10.417	4.5756	6.8231	8.449	13.782	14.056	12.136	7.7196	3.0606	5.1212
2	13.809	10.305	4.4522	6.7877	8.2824	14.196	14.341	11.726	7.0063	3.1197	5.3977
3	13.856	9.8673	4.4106	6.5812	7.7425	14.287	14.268	11.458	6.4386	3.2877	5.5433
4	13.834	9.5264	4.3909	6.5454	8.3783	14.205	14.181	11.324	6.0517	3.5814	6.0635
5	13.771	9.2452	4.3464	6.5758	8.893	14.044	14.055	11.158	5.6901	3.8979	6.3956
6	13.6	9.0132	4.3351	6.6891	9.2142	13.865	13.872	10.866	5.3851	4.2493	6.5311
7	13.321	8.8843	4.3336	6.8518	9.6008	13.732	13.793	10.599	5.2445	4.7072	6.3879
8	13.304	9.2955	4.7113	7.9937	10.01	13.238	13.75	10.841	5.2785	5.6016	6.1765
9	13.12	8.8178	5.0747	8.0602	10.303	13.31	13.42	10.54	5.0367	5.8758	6.3871
10	12.681	8.2271	5.2024	7.8346	10.448	13.544	13.238	10.145	4.6871	6.0516	6.2075
11	12.186	7.6317	5.2113	7.6197	10.703	13.741	12.996	9.7797	4.259	6.011	6.0573
12	11.323	6.6435	5.0167	7.3453	11.105	13.824	12.532	9.2019	3.6283	5.4143	5.5197
13	10.382	5.3788	4.814	7.0805	11.199	13.762	12.021	8.5715	2.8852	4.7294	5.1977
14	9.8803	4.3287	4.7237	7.0959	11.391	13.515	11.823	8.2085	2.1679	4.3575	4.8924
15	9.8008	3.7292	4.5636	7.1837	11.854	13.309	11.81	8.2343	1.2112	4.1176	4.3666
16	10.072	3.8273	4.2533	7.356	12.29	13.275	11.948	8.3512	0.63478	3.3993	3.8267
17	10.449	3.6023	3.8313	7.7127	12.623	13.325	12.112	8.5024	1.5602	2.0832	3.3882
18	10.623	4.0056	3.4745	8.2823	12.918	13.454	12.297	8.8899	1.5051	1.0604	3.2274
19	10.717	4.6837	4.1305	9.0727	13.168	13.788	12.524	9.4714	1.2894	1.2525	2.9379
20	10.56	5.3996	4.8383	9.1371	13.279	13.906	12.863	9.5951	0.36143	2.478	2.7363
21	10.599	6.046	5.0618	8.79	13.224	13.899	13.096	9.141	0.40948	3.2747	2.779
22	10.409	6.2192	5.1953	8.6628	13.435	13.699	13.133	8.4707	1.229	4.0467	2.9415
23	10.18	6.1425	5.4271	8.4847	13.001	13.375	13.079	7.8608	2.3239	4.2973	2.8736

Tabla E.16: Datos de velocidad de viento del 1 al 10 de agosto de 2017.

Hora \ Día	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
0	5.7736	1.7273	0.52814	5.4631	10.739	9.8485	4.8831	4.8912	2.1584	5.709
1	5.5367	2.2073	0.35039	5.6124	10.842	9.7026	4.9856	4.934	2.4989	6.0497
2	4.7806	2.4838	0.77068	5.7554	11.164	9.5862	5.2964	5.3948	3.3951	5.8492
3	3.7273	2.7803	0.76453	6.0993	11.146	9.801	5.4456	5.1728	3.8581	6.2549
4	3.3483	2.7989	1.3341	6.8375	11.079	10.005	5.9835	5.0491	3.3891	6.4854
5	3.0992	3.1226	1.8016	7.5864	10.784	10.174	6.347	4.9306	3.0484	6.3667
6	3.2	3.5005	2.1515	8.0721	10.486	10.303	6.6857	4.8628	2.3969	5.8877
7	3.8356	3.8033	2.3909	8.6361	10.243	10.14	7.0126	4.7992	1.6791	5.0407
8	3.5506	4.3425	2.6182	9.222	10.017	10.113	7.957	5.5393	0.85506	4.9331
9	2.9124	4.4787	2.7821	9.2335	9.9565	9.6839	7.9381	5.5506	1.1741	4.4038
10	3.5631	4.6095	3.2986	9.4507	10.151	9.4197	7.5504	5.6149	1.7656	4.1471
11	4.1289	4.5145	3.6065	9.527	10.316	9.0518	7.147	5.6783	2.5609	4.1068
12	4.2383	3.9012	3.7843	9.1677	10.264	8.3162	6.6346	5.5527	3.5689	4.4657
13	4.1253	2.5645	3.7679	8.8458	9.8751	7.3843	6.3236	5.6938	5.0529	4.8918
14	3.829	1.0938	3.7331	8.8178	9.5115	6.6893	6.4078	5.7728	6.8461	5.1657
15	3.403	0.07289	3.6999	9.0252	9.3268	6.4379	6.8321	5.4182	8.5882	5.1392
16	2.655	1.3608	3.7513	9.5241	9.1793	6.6005	7.1634	4.8574	8.2873	4.7914
17	1.079	2.8884	3.8815	10.197	8.9522	6.6272	7.2897	4.0628	6.7912	4.3166
18	0.71439	3.8184	3.8835	10.768	8.7934	6.8392	7.3153	3.0422	7.1305	3.5495
19	1.3003	4.1419	3.5149	11.197	8.7177	7.1183	7.0181	2.4726	7.0913	2.7771
20	1.2244	3.8634	3.4618	11.486	9.0949	7.0315	6.753	3.0152	6.7691	1.7937
21	0.92484	3.5032	3.804	11.39	8.6209	5.9433	6.7277	3.7075	6.8382	0.31811
22	0.65978	2.9996	4.2199	11.175	8.5554	5.7933	6.7311	4.1568	7.2149	1.5448
23	0.27594	1.9229	4.5761	11.047	8.3065	5.7928	6.7102	4.6358	6.9613	2.7222

Tabla E.17: Datos de velocidad de viento del 11 al 20 de agosto de 2017.

Hora \ Día	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	2.3588	6.6178	9.4742	7.9773	1.9344	1.2427	2.1584	10.939	9.958	11.094
1	2.5065	6.843	9.3002	7.9517	1.8079	1.1298	2.4375	10.851	9.9984	10.962
2	3.7714	7.799	8.9632	7.6454	1.488	1.1208	3.3593	11.032	10.16	11.058
3	4.6411	8.1814	9.0176	7.638	1.3193	1.1037	4.2316	11.374	10.263	11.082
4	5.7172	8.278	9.1098	7.1303	1.2438	1.0258	5.0678	11.437	10.38	11.076
5	6.7826	8.4171	9.1939	6.7741	1.17	0.92386	5.9018	11.56	10.649	11.116
6	7.686	8.4387	9.1724	6.6199	0.99523	0.75004	6.5801	11.509	10.868	11.222
7	7.8741	8.3801	9.1565	6.5865	0.84744	0.54051	7.5829	11.406	11.074	11.351
8	7.9557	9.1975	8.7524	6.5853	0.9443	0.56207	8.7384	11.618	11.024	11.678
9	7.8022	9.1336	8.8773	6.4053	0.33012	0.25307	9.3999	11.588	10.697	11.238
10	7.2664	8.9979	8.5089	6.1064	0.72294	0.89148	9.7165	11.226	10.553	10.881
11	6.7296	8.7827	8.2072	5.6206	1.7479	1.6143	9.9476	10.944	10.413	10.62
12	6.0911	8.3864	7.8436	4.9661	2.5524	1.6492	9.8563	10.404	10.065	10.388
13	5.6386	7.7849	7.5446	4.0637	3.3968	1.691	9.7714	10.01	9.7996	10.233
14	5.3572	7.4395	7.2258	3.2687	4.3302	1.9368	10.022	9.7696	9.6371	10.295
15	5.2537	7.2383	7.3311	2.0677	5.1405	2.2075	10.36	9.7678	9.6719	10.657
16	4.4653	7.1791	7.6459	1.4165	5.7213	2.6088	10.7	9.7097	9.8971	11.131
17	3.1298	7.4507	7.9255	2.9361	6.1392	3.3978	11.195	9.9764	10.398	11.576
18	2.3641	8.3275	8.1215	3.9215	6.0135	4.1006	11.676	10.412	11.079	12.02
19	2.3709	9.2942	8.1281	3.9189	5.5661	3.8359	12.011	10.683	11.675	12.285
20	2.8215	9.5096	7.6634	3.3805	4.9397	2.7296	12.023	10.8	11.933	12.309
21	3.154	9.4196	7.1199	2.7863	4.0312	1.1654	11.606	10.529	11.711	11.978
22	3.597	8.9265	6.8945	2.5474	2.8641	0.64067	11.477	10.336	11.467	11.761
23	3.8985	8.7609	7.0511	2.439	1.9258	1.4202	11.328	9.9912	11.419	11.672

Tabla E.18: Datos de velocidad de viento del 21 al 31 de agosto de 2017.

Hora	Día	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
0		10.566	10.103	5.7689	3.3442	2.7046	3.921	4.3958	4.2896	3.2036	0.81762	1.685
1		10.45	9.7452	5.8135	3.088	2.4811	4.0619	3.8665	4.3308	2.8518	1.1448	1.9183
2		10.4	9.6462	6.387	3.2364	2.3902	3.316	3.3646	4.7027	3.0343	1.5864	2.5124
3		10.135	9.6779	6.3642	2.9649	2.4876	3.1171	2.7779	4.7123	2.9798	1.9174	2.8007
4		9.7619	9.7076	6.2823	2.4625	2.1705	2.8239	2.3855	4.5503	2.4332	2.1262	3.2961
5		9.4196	9.6563	6.095	2.0526	1.9169	2.43	1.8651	4.4643	1.9662	2.3257	3.7861
6		9.4066	9.5375	5.7194	1.7585	1.6519	1.7378	1.4211	4.2527	1.5283	2.5304	4.1081
7		9.5192	9.2044	5.3941	1.606	1.4037	1.0509	1.2309	3.7773	1.0419	2.6989	4.6022
8		10.364	9.5866	5.8601	1.3961	0.7895	0.81002	1.2484	3.3605	0.78068	3.2201	4.7734
9		10.49	8.8863	6.0289	1.0688	1.1436	0.48884	2.2134	3.5843	0.095084	2.8835	4.9883
10		10.245	8.3353	6.211	1.8592	2.4846	1.5334	3.1528	4.1937	1.023	2.5122	5.2388
11		10.075	7.8759	6.3829	3.0933	3.931	2.7914	4.3896	5.1248	2.3379	2.051	5.5532
12		9.9372	7.3096	6.3455	4.0073	4.9945	4.1608	5.3568	5.8832	3.4844	1.4033	5.5151
13		9.8427	6.7084	6.2968	4.9192	5.8889	5.4747	6.2496	6.6349	4.4993	0.6456	5.4366
14		9.693	6.3477	6.1604	5.7564	6.3611	6.5365	6.8745	7.2952	5.259	0.46829	5.3897
15		9.8322	6.3875	5.8955	6.2036	6.7343	7.1485	7.3411	7.7007	5.766	0.98965	5.4287
16		10.481	6.5858	5.2849	6.3134	6.981	7.1279	7.6117	7.8894	6.0312	1.7794	5.3017
17		11.3	6.903	3.8728	6.3852	7.1022	6.9195	7.7155	7.7377	6.0452	2.5812	5.1488
18		11.678	6.8122	1.9252	6.3559	6.9159	6.6191	7.4225	7.3129	5.7828	3.3951	5.3939
19		11.401	6.3825	1.0558	5.7102	6.5006	6.1534	6.8348	6.6985	5.2247	3.1822	6.4635
20		11.162	6.5732	1.5553	5.2379	6.1565	5.782	6.239	5.9691	3.9591	2.2809	6.2486
21		10.806	6.5254	2.3558	4.0507	5.3576	5.2067	5.3282	5.0205	2.4672	1.6426	5.7283
22		10.293	6.6345	2.9628	2.6043	4.7466	4.8052	4.8537	4.2041	1.0328	0.87295	5.473
23		9.8757	7.0836	3.3027	1.7875	4.2575	4.453	4.8075	3.5113	0.43811	0.49759	5.4324