



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



**Estimación y Modelado del
Potencial de Recurso Eólico, Caso:
Zona Costera de Tabasco**

TESIS

para obtener el grado de

Doctor en Ciencias en Ingeniería

Presenta:

M.C Luis Manuel López Manrique

Directores:

Dr. Edgar Vicente Macias Melo

Dr. Bassam Alí



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura**



DIRECCIÓN

OFICIO: DIR/DAIA/2481/2019
FECHA: 6 de Septiembre 2019
ASUNTO: Autorización de Impresión Definitiva

**C. M. en C. LUIS MANUEL LÓPEZ MANRIQUE
PASANTE DEL DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
PRESENTE.**

En virtud de haber elaborado su trabajo de Tesis denominado:

"ESTIMACIÓN Y MODELADO DEL POTENCIAL DE RECURSO EÓLICO, CASO: ZONA COSTERA DE TABASCO"

Para obtener el grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería y en el cual el Dr. Edgar Vicente Macías Melo ha sido el Director de Tesis.

Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen de obtención de grado.

Sin otro particular, le envío un afectuoso saludo.

ATENTAMENTE

**DR. GERMÁN PÉREZ HERNÁNDEZ
DIRECTOR**

C.c.p. Archivo

Dr.GPH/Dra. MAAL/apl.



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura**



DIRECCIÓN

Cunduacán, Tabasco, a 6 de septiembre de 2019
MEM/DCI/023/2019

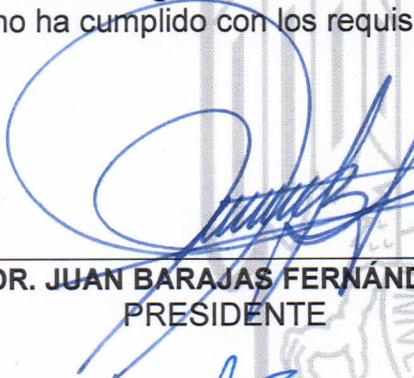
PARA: DR. GERMÁN PÉREZ HERNÁNDEZ
DIRECTOR DE LA DAIA
DE: COMISIÓN SINODAL
ASUNTO: APROBACIÓN DE IMPRESIÓN TESIS DE DOCTORADO

Una vez hecha la revisión detallada del Trabajo de Tesis denominado:

"ESTIMACIÓN Y MODELADO DEL POTENCIAL DE RECURSO EÓLICO, CASO: ZONA COSTERA DE TABASCO.

Desarrollado por el C. M. en C. **LUIS MANUEL LÓPEZ MANRIQUE** del Doctorado en **Ciencias en Ingeniería**, le comunicamos que aceptamos la impresión del trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

COMISIÓN SINODAL



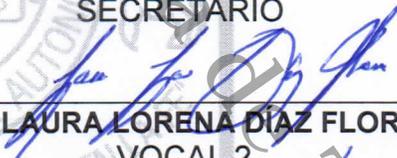
DR. JUAN BARAJAS FERNÁNDEZ
PRESIDENTE



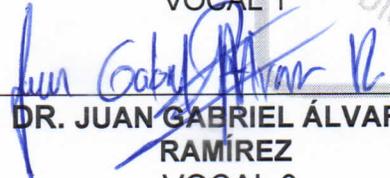
**DRA. KARLA MARÍA AGUILAR
CASTRO**
SECRETARIO



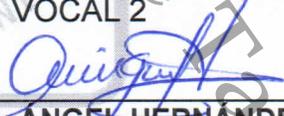
DR. EDAR VICENTE MACÍAS MELO
VOCAL 1



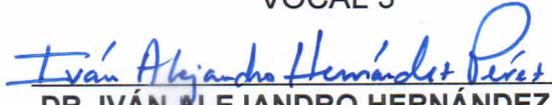
DRA. LAURA LORENA DÍAZ FLORES
VOCAL 2



**DR. JUAN GABRIEL ÁLVAREZ
RAMÍREZ**
VOCAL 3



**DR. MIGUEL ÁNGEL HERNÁNDEZ
RIVERA**
VOCAL 4



DR. IVÁN ALEJANDRO HERNÁNDEZ PÉREZ
VOCAL 5

CARTA AUTORIZACIÓN

La que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente la tesis de grado denominada "Estimación y Modelado del Potencial de Recurso Eólico, Caso: Zona Costera de Tabasco", de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de la tesis antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en éste documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco a los 30 días del mes de octubre del año 2019.

AUTORIZO



C. LUIS MANUEL LOPEZ MANRIQUE

"Gracias a mi sólida formación académica, hoy puedo escribir cientos de palabras sobre prácticamente cualquier tema sin poseer un fragmento de información, que es como conseguí realizar otros trabajos y publicar sus resultados".

LUIS MANUEL LÓPEZ MANRIQUE

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Dedicado con amor: a mi madre Yolanda Manrique Broca; en memoria de mi padre Lucio Manuel López (finado) por haberme dado la vida y formarme como persona y de Josefina Guadalupe Villareal Segovia, el amor y compañera de mi vida (finada); a mis hijos: Sandra, Lucio Manuel, Luis Fernando y Luis, todos ellos por darme los ánimos, el apoyo moral y la paz necesaria para llevar a cabo esta obra; a mis nietos: Ámelie Gillian, Giovanna Bethsabe, Oscar, Mía Camila, Ximena, Luis Fernando, Sofía Fernanda y Jorge Emilio, especialmente para que ellos tengan un referente en las metas de su educación y formación personal; también con mucho agradecimiento a mis asesores, a las compañeras y todos los compañeros de trabajo y amistades de vida que me demostraron su sinceridad y ánimo para no renunciar a la meta de concluir este trabajo.

Agradecimientos

A la División Académica de Ingeniería y Arquitectura Unidad Chontalpa de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por la oportunidad de realizar mis estudios de doctorado, las facilidades y apoyos brindados para el desarrollo de este trabajo de Tesis.

A mis directores de Tesis Dr. Edgar Vicente Macías Melo y Dr. Bassam Alí por su invaluable dirección y asesoramiento para realizar la investigación y el trabajo recepcional de principio a fin.

A todos los miembros de mi comité revisor, a la Dra. Karla María Aguilar Castro, al Dr. Juan Barajas Fernández, a la Dra. Laura Lorena Díaz Flores, al Dr. Juan Gabriel, al Dr. Edgar Vicente Macías Melo, Dr. Miguel Angel Hernández Rivera y el Dr. Ivan Hernández Pérez por el tiempo dedicado con esmero, sin conflictos de interés, en hacerme las recomendaciones para mejorar mi formación y la síntesis del trabajo recepcional. Gracias a todos ustedes por las aportaciones, comentarios, correcciones y sugerencias vertidas la edición de este documento, también por la confianza depositada en mi persona, para desarrollar este proyecto y mi trayectoria académica.

A Oscar May Tzuc por su colaboración y asesoría en la comprensión del uso de herramientas de Inteligencia Artificial y análisis. Al Dr. Iván Hernández Pérez, Sandra Miranda, Dr. Paraguay y la Dra. Susana Silva Martínez por sus consejos para redactar artículos científicos en Inglés e iniciarme en el uso del LaTeX y apoyo en la redacción de artículos en Inglés.

Al Ing. Luis Enrique Angeles Montero, Ing. Ana Guzmán, Ing. César Calcaneo, Mtro. Luis Fernando López Villarreal, Pasante Lucio Manuel López Villarreal, Ing. Manuel Ceballos y demás colaboradores de sitio por su apoyo en la implementación de dos estaciones meteorológicas y red de estaciones Meteorológicas de LERMER.

Al Dr. José Manuel Piña Gutiérrez Rector de la UJAT por la confianza depositada para encargarme de la infraestructura de LERMER del cual se utilizaron los registros para el desarrollo de la investigación.

Al Secretario Jose Juan Sosa Ramos, Dra. Laura Judith Quiñones Díaz y comisión negociadora del SPIUJAT por su gestión ante la administración de la UJAT para acceder a la "licencia laboral para escribir y defender la Tesis".

Resumen

En este trabajo se presentan resultados derivados de la estimación y modelación del potencial de recurso eólico (RE). Con estos resultados se cumplen los objetivos general y específicos propuestos al inicio de la investigación. Las mediciones, análisis de registros y ensayos de modelos eólicos confirman una potencia disponible libre en energía eólica de 264.66 W m^{-2} a una altura de 54 m.s.n.s. Con esta potencia específica es posible inyectar a la red eléctrica con una potencia eléctrica específica 95 W m^{-2} de área de rotor de turbinas eólicas. Con la instalación de dos estaciones meteorológicas en una zona costera de Tabasco (Cuauhtemoczin I y II) se ensayaron modelación y evaluación de RE para ambos sitios. La problemática de modelación encontrada fue la falta de ajuste fiel a las distribuciones de frecuencia de la rapidez del viento. Se encontró y verificó que las distribuciones de frecuencia y funciones de densidad de probabilidad en las mediciones eólicas exhiben multimodalidad. Esta multimodalidad de la frecuencia y densidad de la probabilidad de los registros medidos condiciona el ajuste del modelo de Weibull, Rayleigh y otros. Se muestra aquí la metodología para el desarrollo, prueba, contraste y la validación de nuevas versiones multimodales de Weibull y de modelos de nueva creación. Estos modelos exhibieron mejores ajustes a las distribuciones de frecuencia y probabilidades de las principales variables relacionadas a la Energía Eólica EE . Se ensayó y demostró que la rapidez del viento r_v a alturas mayores puede ser estimada a partir de un par de mediciones modeladas para diferentes alturas para un sitio específico SE empleando la ecuación ley de potencias. Se comprobó que existen variaciones en el exponente de esta ecuación de potencias. Esto quedó sustentada por variaciones psicrométricas de la temperatura T_{air} , humedad relativa HR y en consecuencia la densidad del aire ρ_{air} . Las variaciones en la potencia disponible de EE por variaciones de la ρ_{air} puede representar $\approx 10\%$. En conclusión los modelos desarrollados en este trabajo fueron denominados PDF-Weibull-2 Tetra-modal de 9 y 12 parámetros y el modelo PolyPI-N. Estos fueron probados tanto para modelar los valores medios de gráficos de dispersión como de distribuciones de frecuencias y densidad de probabilidades. PolyPI-N es un modelo inspirado en eigenvalores y eigenvectores con solución numérica computacional y características polimorfa, multimodal y grado de multiplicidad. Se ensayaron modelaciones sobre las variables físicas en EE para una y dos variables independientes. Los modelos desarrollados y probados mostraron mejores ajuste y versatilidad que los modelos utilizados normalmente. La potencia por unidad de área en función de la altura mostraron proporcionalidad de acuerdo a los ensayos previstos.

Abstract

This paper presents results derived from the estimation and modeling of the wind resource (WR) potential. With these results the general and specific objectives proposed at the beginning of the investigation are met. Measurements, analysis of records and tests of wind models confirm a free available power in wind energy of 264.66 W m^{-2} at a height of 54 m.s.n.s. With this specific power it is possible to inject into the electrical network with a specific electrical power 95 W m^{-2} of wind turbine rotor area. With the installation of two meteorological stations in a coastal area of Tabasco (Cuauhtemoczin I and II) modeling and evaluation of WR for both sites were tested. It was found and verified that frequency distributions and probability density functions in wind measurements exhibit multimodality. This multimodality of the frequency and density of the probability of the measured records determines the adjustment of the Weibull, Rayleigh and others model. The modeling problem found was the lack of faithful adjustment to the frequency distributions of wind speed. The methodology for the development, testing, contrast and validation of new multimodal versions of Weibull and newly created models is shown here. These models exhibited better adjustments to the frequency distributions and probabilities of the main variables related to wind energy WE . Here it was tested and proved that the wind speed w_s at higher heights can be estimated from a couple of measurements. Modeled these for different heights for a specific site (SS) using the power law equation. It was found here that there are variations in the exponent of this power law equation. This was supported by psychrometric variations of the temperature T_{air} , relative humidity RH and consequently the air density ρ_{air} . The variations in the available power of EE for variations of the ρ_{air} can represent $\approx 10\%$. In conclusion the models developed in this work were called PDF-Weibull-2 Tetra-modal of 9 and 12 parameters and the PolyPI-N model. These were tested both to model the mean values of scatterplots as well as frequency distributions and probability density. PolyPI-N is a model inspired by eigenvalues and eigenvectors with computational numerical solution and polymorphic characteristics, multimodal and multiplicity degree. Modeling was carried out on the physical variables in WE for one and two independent variables. The models developed and tested showed better fit and versatility than the models normally used. The power per unit area as a function of height showed proportionality according to the planned tests.

Índice

Lista de Figuras	xv
Lista de Tablas	xxi
Lista de Abreviaciones	xxv
Constantes Físicas	xxvii
Lista de Símbolos	xxix
1 Introducción a la Energía Eólica	1
1.1 Prospección y búsqueda de un sitio específico con energía eólica .	2
1.1.1 Física del viento	3
1.1.1.1 Efecto y fuerza de coriolis	3
1.1.1.2 Viento geostrófico	4
1.1.1.3 Vientos alisios	6
1.1.1.4 Viento mar-tierra-mar	6
1.1.2 Detalles y características del terreno	6
1.1.2.1 Rugosidad del suelo y perfil de viento	7
1.1.2.2 Coordenadas globales del <i>sitio eólico</i>	8
1.2 Conceptos, clasificación y normatividad en temas eólicos	8
1.2.1 Normas para evaluar recurso eólico en un sitio específico .	11
1.3 Problema de la intermitencia y variabilidad del viento	15
1.3.1 Disponibilidad y acceso a bases de datos satelitales	18
1.3.2 Vientos extremos, fuerzas y efectos	20
1.4 Tecnología de las evaluaciones y gestión de los resultados	21
1.4.1 Tratamiento de los Registros, Evaluación y Reporte	24
1.5 Objetivo General y Específicos	26
1.5.1 Objetivo general	26
1.5.2 Objetivos específicos	26
2 Antecedentes y teoría de la evaluación en energía eólica	29
2.1 Potencia de un flujo másico de aire y la ley de Betz	29
2.1.1 Potencia eólica disponible	30
2.1.2 Ley de Betz	30
2.1.2.1 Fuerza de empuje eólico axial	32
2.1.2.2 Análisis cinemático del viento en la turbina eólica	32
2.1.2.3 Factor de inducción o frenado del viento	33

2.1.2.4	Potencia mecánica máxima de salida en una turbina eólica	33
2.1.2.5	Coeficiente de potencia	34
2.1.2.6	Potencia mecánica y potencia eléctrica generada	35
2.1.3	Rugosidad del suelo y capa límite	36
2.1.4	Ley de potencias y calculo del índice	38
2.1.5	Perfil del viento	41
2.2	Rosa de vientos	42
2.2.1	Rosa de viento anual	43
2.2.2	Rosa de vientos Mensual	44
2.3	Histogramas y diagramas de dispersión de velocidad	45
2.4	Funciones para distribuciones de probabilidad y acumulativa	48
2.5	Estimación de la densidad de potencia eólica	50
2.5.1	Producción anual de energía eólica	51
3	Montaje experimental y metodologías de modelación	53
3.1	Selección e instalación de estaciones meteorológicas automáticas	53
3.1.1	Selección de sensores y registradores	55
3.1.2	Diseño del montaje de instrumentos y configuración	55
3.2	Histogramas y distribuciones de rapidez <i>versus</i> velocidad del viento	57
3.2.1	Modelos de Weibull <i>versus</i> Rayleigh (rapidez del viento)	58
3.2.2	Modelos de Weibull <i>versus</i> Weibull bimodal	60
3.3	Modelo alternativo de Lopman-Multimodal	62
3.3.1	Desarrollo del modelo de Lopman-Multimodal	64
3.3.2	Ensayos y pruebas de ajuste	68
3.4	Metodología para evaluación del recurso eólico	68
3.4.1	Modelo eólico de un sitio específico: Caso Cuauhtemoczin	75
3.4.2	Modelo Lopman-Multimodal de un sitio específico	75
3.4.3	Cálculo y ajuste de parámetros	77
4	Detalles de la energía eólica experimental en Cuauhtemoczin I	83
4.1	Modelación de la rapidez del viento	83
4.1.1	Modelo de Weibull y otros <i>versus</i> Weibull bimodal	90
4.2	Evaluación del recurso eólico	93
4.2.1	Modelo eólico de un sitio específico: Caso Cuauhtemoczin I	102
4.2.1.1	Modelo Weibull-2 bimodal	102
4.3	Modelos Lopman-Multimodal para r_v y v_v	103
4.3.1	Cálculo y ajuste de parámetros del modelo	108
4.3.2	Evaluación energética	111
4.3.2.1	Densidad de potencia	121
4.3.2.2	Producción de energía anual	121
5	Detalles de la energía eólica experimental en Cuauhtemoczin II	129
5.1	Modelación de la rapidez del viento	129
5.1.1	Modelo de Weibull-2 <i>versus</i> Weibull-2 Bimodal	130
5.2	Evaluación del recurso eólico	133

5.2.1	Modelo eólico de un sitio específico: Caso Cuauhtemoczin II	133
5.2.1.1	Modelo Weibull bimodal	133
5.2.1.2	Modelos Lopman-Multimodal para r_v y v_v	135
5.2.2	Cálculo y ajuste de parámetros	139
5.2.3	Evaluación energética	148
5.2.3.1	Producción de energía anual	148
6	Conclusión y Recomendaciones	151
6.1	Conclusiones	151
6.2	Recomendaciones para trabajos futuros.	154
	Referencias Bibliográficas	155
A	Preguntas Frecuentes, detalles y demostraciones	161
A.1	La Fuerza de Coriolis Atmosférica	161
A.2	Desarrollo de la ley extendida de potencias	162
A.2.1	Ecuaciones de conservación	163
A.3	Tablas de Equivalencias	163
A.3.1	modelos	164
B	Actividades Académicas Complementarias	167

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Lista de Figuras

1.1	Efecto de Coriolis sobre los vientos [0.5ex] Adaptado desde [6] . . .	5
1.2	Instrumentación congelada en climas muy fríos, adaptado desde [19], [20].	13
1.3	Sensores con fallo por congelación o adherencia, adaptado desde [19], [20].	14
2.1	Efecto del viento sobre el rotor de la <i>TE</i> Adaptado desde [62]. . .	31
2.2	Coeficiente de Potencia $C_p(a)$	35
2.3	Efecto de la rugosidad del suelo sobre el perfil de viento local. . .	42
2.4	Perfil del viento de acuerdo a la rugosidad del suelo con viento local.	43
2.5	Rosa de vientos del año 2016 de la Estación Automática Cuauhtemocztzin II.	44
2.6	Rosa de vientos del mes de Agosto de 2017 de la Estación Automática Cuauhtemocztzin II.	45
2.7	Histograma de la r_v anual Cuauhtemocztzin II a 26 m de altura. . .	46
2.8	Histograma indicador absoluto para una muestra de registros para cada dirección.	47
2.9	Histograma indicador absoluto para una muestra de registros para cada dirección.	48
2.10	Diagrama de dispersión de una muestra de registros de v_v Cuauh II a 26 m de altura.	49
2.11	Funciones De densidad de probabilidades y distribución acumulativa de la v_v Cuauhtemocztzin II a 26 m de altura.	50
3.1	Anemometro marca NRG de tres copas, Clase I [0.5ex] Adaptado desde NRG Systems [0.5ex] Extraído de [66].	54
3.2	Veleta marca NRG de modelo 200P, Banda muerta centrada en 0° con un máximo de 8° [0.5ex] Adaptado desde NRG Systems [0.5ex] Extraído de [67].	56
3.3	Histograma y gráfico de la rapidez del viento.	57
3.4	Histograma de la r_v y de la rapidez del viento.	58
3.5	Comparativo de modelos Weibull y Rayleigh respecto a la distribución Normal de la rapidez del viento a 26 m.s.n.s.	61
3.6	Comparativo de modelos Weibull y Rayleigh respecto a la distribución Normal de la rapidez del viento a 33 m.s.n.s.	61
3.7	Comparativo de modelos Weibull y Rayleigh respecto a la distribución Normal de la rapidez del viento a 54 m.s.n.s.	62

3.8 Distribución Bimodal de la rapidez del viento a 26 m.s.n.s. separados por: a) la d_v NE (0° a 90°) y b) otras d_v .(90° a 360°). . . 63

3.9 Distribución Bimodal de la rapidez del viento a 26 m.s.n.s. ensamblados por la d_v NE y las otras d_v 63

3.10 Histograma de la v_v para los años 2016-2017 Cuauhtemoczin II @ 26 m.s.n.s. 65

3.11 Gráfico de dispersión de la v_v para Cuauhtemoczin II @ 26 m.s.n.s. 65

3.12 Gráfico de distribución de la v_v modelado con PolyPI-6 en una función de densidad de probabilidades $p(v) - d_v$ para Cuauhtemoczin II @ 26 m.s.n.s. 69

3.13 Gráfico de dispersión de la v_v en probabilidades para Cuauhtemoczin II @ 26 m.s.n.s. 69

3.14 Gráfico de dispersión de la v_v en probabilidades para Cuauhtemoczin II @ 26 m.s.n.s. 70

3.15 Modelo de la distribución de Frecuencias de r_v para Cuauhtemoczin II @ 26 m.s.n.s. 75

3.16 Modelo de la densidad de probabilidades de r_v para Cuauhtemoczin II @ 26 m.s.n.s. 76

3.17 Obtención de la \bar{r}_v por máxima verosimilitud para Cuauhtemoczin I y II @ 26 m.s.n.s., 33 m.s.n.s. y 54 m.s.n.s. 78

3.18 Modelo de la de $\bar{T}_{air} - d_v$ para Cuauhtemoczin II @ 26 m.s.n.s. . . 80

4.1 (a) Vista general de base de datos anual de la r_v , (b) modelo de Weibull-2 y distribución de frecuencias anual de la r_v en 16 bins, (c) Modelo Weibull-2 Q-Q y (d) Modelo Normal Q-Q anual para la r_v en Cuauhtemoczin I a 33 m.s.n.s. 85

4.2 (a) Vista general de base de datos anual de la r_v , (b) modelo de Weibull-2 y distribución de frecuencias anual de la r_v en 16 bins, (c) Modelo Weibull-2 Q-Q y (d) Modelo Normal Q-Q anual para la r_v en Cuauhtemoczin I a 54 m.s.n.s. 87

4.3 (a) Vista general de base de datos anual de la r_v con registros sustitutos en 9%, (b) modelo de Weibull-2, distribución acumulativa y distribución de frecuencias anual de la r_v en 16 bins, (c) Modelo Weibull-2 Q-Q y (d) Modelo Normal Q-Q anual para la r_v en Cuauhtemoczin I a 33 m.s.n.s. 88

4.4 (a) Vista general de base de datos anual de la r_v con registros sustitutos en 9%, (b) modelo de Weibull-2, distribución acumulativa y distribución de frecuencias anual de la r_v en 16 bins, (c) Modelo Weibull-2 Q-Q y (d) Modelo Normal Q-Q anual para la r_v en Cuauhtemoczin I a 33 m.s.n.s. 89

4.5 Comparativo de modelos Normal, Rayleigh, Weibull-2 y otros de funciones de densidad de la probabilidad en r_v para Cuauhtemoczin I en 33 m.s.n.s., ensayado en 16 bins, Kernel es un modelo No-Paramétrico. 91

4.6	Comparativo de modelos Normal, Rayleigh, Weibull-2 y otros de funciones de densidad de la probabilidad en r_v para Cuauhtemoctzin I en 54 m.s.n.s., ensayado en 16 bins, Kernel es un modelo No-Paramétrico.	92
4.7	Modelo de Weibull-2 bimodal para la r_v en Cuauhtemoctzin I a 54 m.s.n.s., ensayado con 36 bins (sub-clases).	93
4.8	Modelo de Weibull-2 bimodal para la r_v en Cuauhtemoctzin I a 54 m.s.n.s., ensayado con 20 bins (sub-clases).	95
4.9	Modelación de la $\overline{\rho_{air}}$ móvil para Cuauhtemoctzin I mediante un modelo de Fourier-3 de ocho parámetros.	97
4.10	Modelación de la $\overline{\rho_{air}}$ movil para Cuauhtemoctzin I mediante un modelo PolyPi-6 de siete parámetros.	97
4.11	Modelación de la función de Densidad de la probabilidad de la ρ_{air} para Cuauhtemoctzin I mediante un modelo Fourier-3 de ocho parámetros.	99
4.12	Modelación de la ρ_{air} para Cuauhtemoctzin I mediante un modelo PolyPi-7 de ocho parámetros.	99
4.13	Diagrama de Flujo de la metodología para estimar el RE y parámetros del modelo.	101
4.14	Modelo PDF-Weibull-2 bimodal para la r_v en Cuauhtemoctzin I en 33 m.s.n.s., ensayado en 20 bins (sub-clases).	104
4.15	Modelo PDF-Weibull-2 bimodal para la r_v en Cuauhtemoctzin I en 54 m.s.n.s., ensayado en 20 bins (sub-clases).	104
4.16	Modelo de Weibull-2 Tetramodal-Lopman para la r_v en Cuauhtemoctzin I en 33 m.s.n.s., ensayado en 20 bins (sub-clases).106	
4.17	Modelo de Weibull-2 Tetramodal-Lopman para la r_v en Cuauhtemoctzin I en 54 m.s.n.s., ensayado en 20 bins (sub-clases).107	
4.18	Modelo PolyPI-N-Lopman para la $\overline{v_v}$ en Cuauhtemoctzin I en 33 m.s.n.s., ensayado con 6 modos.	108
4.19	Modelo PolyPI-N-Lopman para la $\overline{v_v}$ en Cuauhtemoctzin I en 54 m.s.n.s., ensayado con 6 modos.	109
4.20	Modelo PolyPI-8-Lopman para la d_v en Cuauhtemoctzin I a 54 m.s.n.s., ensayado con 8 modales, un grado de multiplicidad 3 y 20 bins (sub-clases), ver Tabla 4.8.	109
4.21	Modelo PolyPI-7-Lopman ajustada a la densidad de probabilidad de la r_v en Cuauhtemoctzin I a 54 m.s.n.s., ensayado con 7 modales y 20 bins (sub-clases) sobre base de registros perturbados.	110
4.22	Modelo de PolyPI-9-Lopman para la r_v en Cuauhtemoctzin I en 54 m.s.n.s., ensayado con 9 modales, dos grados de multiplicidad 3 y 20 bins (sub-clases), ver Tabla 4.8.	110
4.23	Estimación de la Potencia Eólica por unidad de area en función de la ρ_{air} , T_{air} , r_v , y P_{atm} , ver Ec. 4.4.	115
4.24	Modelación de la Potencia Eólica por unidad de area en función de la ρ_{air} y r_v a 33 msn s en Cuauhtemoctzin I, utilizando PolyPI-5, con grado de multiplicidad $m = 3$, ver Tabla 4.9.	116

4.25 Modelación de la Potencia Eólica por unidad de area en función de la ρ_{air} y r_v a 54 m s n s en Cuauhtemoctzin I, utilizando PolyPI-5, con grado de multiplicidad $m = 3$, ver Tabla 4.9. 116

4.26 Comparación de la Potencia Eólica por unidad de area disponible con la potencia generada y tomada por una turbina eólica G58/850 manufacturada por Gamesa y en operación en La Venta Oaxaca en 2015. 117

4.27 Comparación de la Potencia Eólica disponible atravesando la turbina *versus* la potencia producida por una GTE modelo G58/850 Gamesa de 850 kW de capacidad en La Central eólica La Venta II, CFE, Oax. Registros proporcionados por cortesía de CFE. 118

4.28 Modelación con PolyPI-6 de la Potencia disponible como función de r_v , ρ_{air} a 54 m.s.n.s., con multiplicidad modal $m = 3$, ver Tabla. 4.10. 119

4.29 Modelación con PolyPI-6 de la Potencia disponible como función de r_v , RH a 54 m.s.n.s., con multiplicidad modal $m = 3$, ver Tabla 4.10. 120

4.30 Histograma de distribución de la potencia por unidad de área anual en Cuauhtemoctzin I, 54 m. 122

4.31 Distribución frecuencias de la potencia disponible por unidad de área anual en Cuauhtemoctzin I, 54 m. 122

4.32 Detalles de la distribución frecuencias de la potencia disponible por unidad de área anual en Cuauhtemoctzin I, 54 m., usando 50 bins. 123

4.33 Producción de energía anual por unidad de área en Cuauhtemoctzin I, 54 m. 124

5.1 (a) Vista general de base de datos anual de la r_v , (b) modelo de Weibull-2, distribución acumulativa y distribución de frecuencias anual de la r_v en 10 bins, (c) Gráfico de ajuste de Weibull-2 Q-Q y (d) Gráfico de ajuste del modelo Normal Q-Q anual para la r_v en Cuauhtemoctzin II a 26 m.s.n.s., subclasificado con 12 bins. 131

5.2 Comparativo de modelación de la distribución de frecuencias anual para la r_v en Cuauhtemoctzin II a 26 m.s.n.s., subclasificado con 14 bins, utilizando modelos de funciones de densidad de probabilidades: PDF-Normal, PDF-Rayleigh, PDF-Weibull-2, PDF-Exponencial, PDF-Gamma, PDF-Kernel y PDF-LogNormal. 132

5.3 Modelación de la distribución de frecuencias anual para la r_v en Cuauhtemoctzin II a 26 m.s.n.s., subclasificado con 14 bins, PDF-Weibull-2 bimodal como función de densidad de probabilidades. 132

5.4 Ajuste de la distribución de frecuencias de la r_v en Cuauhtemoctzin II a 26 m.s.n.s., en 20 bins (sub-clases), con el modelo de Weibull-2 Bimodal anual de la función de densidad de probabilidad. 134

5.5	Ajuste de la distribución de frecuencias bimodal seleccionada para dos sectores de d_v para Cuauhtemocztin II y ajustada en modo multimodal con Weibull-2 Tetra-modal de 9 parámetros. . .	137
5.6	Distribución de frecuencia de Cuauhtemocztin II, ajustada en modo multimodal Weibull-2 Tetra-modal como función de densidad de probabilidad.	138
5.7	Distribución bimodal de Cuauhtemocztin II y ajustada en modo multimodal Weibull-2 Tetra-modal como función de densidad de probabilidad con mejor ajuste.	138
5.8	Modelación con PolyPI-7 de la \bar{v}_v anual en Cuauhtemocztin II a 26 m.s.n.s.	139
5.9	Modelación de la distribución de la frecuencia de r_v de Cuauhtemocztin II y ajustada en modo multimodal con PolyPI-7 con multiplicidad modal $m = 3$ como función de la distribución de frecuencia de la r_v representada por $f(x) = \lambda(x - a)(x - b)(x - c)(x - d)(x - e)^3 + f$, donde $p(r_v) = f(x)$, ver Tabla 5.2. .	140
5.10	Modelación de función de densidad de probabilidad de Cuauhtemocztin II y ajustada en modo multimodal con PolyPI-7 con multiplicidad modal $m = 3$ como función de la densidad de la probabilidad representada por $f(x) = \lambda(x - a)(x - b)(x - c)(x - d)(x - e)^3 + f$, donde $p(r_v) = f(x)$, ver Tabla 5.2.	141
5.11	Comparación de ajuste del modelo de Distribución bimodal de Cuauhtemocztin II ajustada en modo multimodal Weibull-2 Tetra-modal de 9 parámetros (con y sin factor de probabilidades global)	142
5.12	Modelación Distribución Tetramodal Weibull-2 para Cuauhtemocztin II ajustada en modo multimodal de Weibull-2 Tetra-Modal de 12 parámetros exhibiendo mejor ajuste, ver Ec. 5.4.	144
5.13	Calculo de la $P(v_v)$ en función de sus componentes para Cuauhtemocztin II	146
5.14	Calculo de la potencia total de Cuauhtemocztin II usando un V27	147
5.15	Comparativo del comportamiento de la potencia total disponible de Cuauhtemocztin I y II usando un V27	149
A.1	Coeficiente de Potencia	165
A.2	Coeficiente de Potencia $C_{p(a)}$ empleado en la conversión de energía cinética eólica a energía mecánica en una TE	165
A.3	Variación de la ρ_{air} en función de la r_v para Cuauhtemocztin . . .	166
A.4	Comparativo de la P_{disp} de la energía eólica en función de la r_v para La Venta, Oaxaca con un aerogenerador G52/850 kW	166
B.1	Carta de aceptación de estancia II en la UADY	169
B.2	Carta de conclusión de estancia I en la UADY	171
B.3	Certificado de capacitación para la redacción de artículos científicos en Inglés.	172
B.4	Cartel para presentación en Congreso de Acuerdo al programa . .	173
B.5	Artículo 1 para publicación en revista ISSN de CRAE	174
B.6	Carta de aceptación de la UADY	175

B.7 Constancia de presentación de Ponencia en Congreso CRAE de la UADY 176

B.8 Constancia de participación con un cartel de la UADY 177

B.9 Curso en Redacción de artículos científicos 178

B.10 Curso para transferencia de Tecnología 179

B.11 Carta de conclusión de estancia II en la UADY 180

B.12 Artículo 1 para publicación en Energies MDPI 181

B.13 Artículo 2 para publicación en Energies Energy and Environment 182

B.14 Artículo 2 Acuse de recibo de la revista Energy and Environment 183

B.15 Artículo 2 Acuse de recibo de la revista Energy and Environment 184

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Lista de Tablas

1.1	Estandares IEC para <i>GTE</i> , para más información y normas, ver Apéndice A o [IEC2017online.]	9
1.2	Resumen de los métodos, herramientas, medios, ventajas y desventajas utilizadas en las estimaciones, evaluaciones y modelos de <i>RE</i>	22
2.1	Clases de rugosidad y la longitud de la rugosidad equivalente. . .	37
3.1	Modelos <i>Weibull</i> ₍₂₋₃₎ y casos especiales para las funciones densidad de Probabilidades (PDF) de la r_v	60
3.2	Resumen de ecuaciones para obtener parámetros para Weibull-2 en energía eólica, para extrapolaciones ver [64].	73
3.3	Modelación con PolyPI-7 para la <i>Frecuencia</i> (r_v) = $0.210005 (r_v - a)(r_v - b)(r_v - c)(r_v - d)(r_v - e) + f$ para Coeficientes (con límites de confianza en 95%): para la función de distribución de frecuencias la r_v , ver Fig. 3.16	76
3.4	Modelación con PolyPI-7 para la <i>Probabilidad</i> (r_v) = $1.552611e - 5 (r_v - a)(r_v - b)(r_v - c)(r_v - d)^2 + 0.01$ para Coeficientes (con límites de confianza en 95%): para la función de distribución de frecuencias la r_v , ver Fig. 3.16	77
3.5	Modelación con PolyPI-7 para la $\overline{T_{air}(d_v)} = f(r_v) = 1.511e - 13 (r_v - a)(r_v - b)(r_v - c)(r_v - d)(r_v - e) + f$ para coeficientes (con límites de confianza en 95%): para la función de dispersión $r_v - T_{air}$, ver Fig. 3.18	79
4.1	Resultados de ensayos de modelaciones Weibull-2 a diferentes alturas sin y con perturbación de registros en Cuauhtemoczin I, ver Figs. 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4.	90
4.2	Modelos Weibull-2, Rayleigh, Normal y otros para las funciones de densidad de Probabilidades (PDF) de la r_v , ver Figs. 4.5 y 4.6. .	92
4.3	Modelación Weibull-2 Bimodal de la r_v a 54 m.s.n.s en 36 bins (sub-clases) y 20 bins con la forma $\mathcal{F}_{2W}(r_v) = e^{(\frac{k_1}{c_1})(\frac{r_v}{c_1})^{(k_1-1)}} \exp(-(\frac{r_v}{c_1})^{k_1}) + f(\frac{k_2}{c_2})(\frac{r_v}{c_2})^{(k_2-1)} \exp(-(\frac{r_v}{c_2})^{k_2})$: función de densidad de probabilidades para coeficientes con límites de confianza y predicción en 95% de la r_v , ver Figs. 4.7 y 4.8, ver Apdo. 4.2.1.1.	94

- 4.4 Resultados comparativos en el desempeño de Modelación de la $\overline{\rho_{air}}$ utilizando PolyPI-6 en la forma $f(x) = \lambda a(x - b)(x - c)(x - d)(x - e)^2 + f$ con grado 2 de multiplicidad modal *versus* el modelo de Fourier-3 con la forma: $f(x) = a_0 + a_1 \cos(xw) + b_1 \sin(xw) + a_2 \cos(2xw) + b_2 \sin(2xw) + a_3 \cos(3xw) + b_3 \sin(3xw)$, donde $x = \rho_{air}$ y $f(x)$: función de la ρ_{air} móvil, ver Figs. 4.9 y 4.10. 98
- 4.5 comparación en el desempeño de la Modelación de la función de densidad de probabilidades que ajusta a la distribución de frecuencias de la ρ_{air} utilizando PolyPI-N en la forma $f(x) = \lambda(x - a)(x - b)(x - c)(x - d)(x - e)(x - f)^2 + g$ con multiplicidad de modos y utilizando modelo de Fourier3 $f(x) = a_0 + a_1 \cos(xw) + b_1 \sin(xw) + a_2 \cos(2xw) + b_2 \sin(2xw) + a_3 \cos(3xw) + b_3 \sin(3xw)$, donde $x = \rho_{air}$ y $f(x)$: función de densidad de probabilidades, ver Figs. 4.11 y 4.12. . . . 100
- 4.6 Comparativo de la modelación con PDF-Weibull-2 Bimodal a 33 m.s.n.s. y 54 m.s.n.s. subclasificado en 20 bins para la función PDF $\mathcal{F}_{2W}(r_v) = e^{\left(\frac{k_1}{c_1}\right)\left(\frac{r_v}{c_1}\right)^{(k_1-1)} \exp\left(-\left(\frac{r_v}{c_1}\right)^{k_1}\right) + f\left(\frac{k_2}{c_2}\right)\left(\frac{r_v}{c_2}\right)^{(k_2-1)} \exp\left(-\left(\frac{r_v}{c_2}\right)^{k_2}\right)}$ para coeficientes con límites de confianza y predicción en 95 %, $\mathcal{F}_{2W}(r_v)$: función de densidad de probabilidades de la r_v , ver Ec. 4.1, Figs. 4.14 y 4.15 105
- 4.7 Modelación con Weibull-2 Tetramodal para la $\mathcal{F}_{4W}(r_v) = (0.09, 0.8)\left(\frac{k_1}{c_1}\right)\left(\frac{r_v}{c_1}\right)^{(k_1-1)} \exp\left(-\left(\frac{r_v}{c_1}\right)^{k_1}\right) + (0.41, 0.40)\left(\frac{k_2}{c_2}\right)\left(\frac{r_v}{c_2}\right)^{(k_2-1)} \exp\left(-\left(\frac{r_v}{c_2}\right)^{k_2}\right) + (0.33, 0.35)\left(\frac{k_3}{c_3}\right)\left(\frac{r_v}{c_3}\right)^{(k_3-1)} \exp\left(-\left(\frac{r_v}{c_3}\right)^{k_3}\right) + (0.07, 0.15)\left(\frac{k_4}{c_4}\right)\left(\frac{r_v}{c_4}\right)^{(k_4-1)} \exp\left(-\left(\frac{r_v}{c_4}\right)^{k_4}\right)$ para Coeficientes con límites de confianza y predicción en 95 %: función de densidad de probabilidades de la r_v , donde $(p_{33}(m), p_{54}(m))$: set de probabilidades por altura y modal $\forall m \in 1, 2, \dots, M$, ver Figs. 4.16 y 4.17 en Apdo. 4.3. 112
- 4.8 comparación en el desempeño de la Modelación de la función de densidad de probabilidades que ajusta a la distribución de frecuencias de la ρ_{air} utilizando PolyPI-N en la forma (1) $f_1(x) = \lambda(x - a)(x - b)(x - c)(x - d)(x - e)(x - f)^3 + g$ y la forma (2) $f_2(x) = \lambda(x - a)(x - b)(x - c)(x - d)(x - e)(x - f)^3 + (x - g)^3 + h$, medido a 54 m.s.n.s. donde $x = v_v$ y $f(x)$: función de densidad de probabilidades, ver Figs. 4.20 y 4.22, Apdo. 4.3. . . . 113
- 4.9 Modelación de la curva de potencia por unidad de area como función de la r_v y ρ_{air} a 33 m.s.n.s. y 54 m.s.n.s. utilizando PolyPI-5 en la forma $f(x) = \lambda(x - a)^3(x - b)(x - c) + d$, donde $P(r_v) = f(x)$ y $\rho_{air} = x$, con multiplicidad modal de $m = 3$, ver Fig. 4.24 y Fig. 4.25. 114

4.10	Modelación de la curva de potencia por unidad de area como función de la r_v , ρ_{air} y HR a 54 m.s.n.s. utilizando PolyPI-6 en la forma $f(x, y) = \lambda (x - a)^3 (x - b) (y - c) (y - d) + e$, donde $r_v = x$, $(\rho_{air}, HR) = y$ y $P(r_v) = f(x, y)$ con grado de multiplicidad $m = 3$, ver Fig. 4.28 y Fig. 4.29.	120
4.11	Rango Energético para Cuauhtemoczin I a 33 m.s.n.s. en (Latitud base=18.21° Norte; Longitud Base=94.09° Oeste).	126
4.12	Rango Energético para Cuauhtemoczin I a 54 m.s.n.s. en (Latitud base=18.21° Norte; Longitud Base=94.09° Oeste).	127
5.1	Modelación con Weibull-2 Tetramodal de 12 parámetros usando $\mathcal{F}_{4W}(r_v) = 0.12 * (a/b) * (x/b)^{(a-1)} * \exp(-(x/b)^a) + 0.45 * (c/d) * (x/d)^{(c-1)} * \exp(-(x/d)^c) + 0.3 * (e/f) * (x/f)^{(e-1)} * \exp(-(x/f)^e) + 0.13 * (h/g) * (x/g)^{(h-1)} * \exp(-(x/g)^h)$ para Coeficientes con límites de confianza y predicción en 95%: como función de densidad de probabilidades de la r_v , ver Figs. 5.6 y 5.7.	143
5.2	Modelación con PolyPI-7 para la r_v como función $f(x) = \lambda (x - a) (x - b) (x - c) (x - d) (x - e)^3 + f$ para Coeficientes con límites de confianza y predicción en 95% ensayado sobre: (1) función de distribución de frecuencias y (2) función de densidad de probabilidades de la r_v , ver Figs. 5.9 y 5.10	145
A.1	Equivalencias de Unidades de Energía	164
A.2	Unidades de Energía de Gran Escala	164

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Lista de Abreviaciones

ARMA	A uto R egresive M oving A verage M odel
BADC	B ritish A tmospheric D ata C enter
BED	B alance de E nergía- D emanda
CFD	C omputational F luid D ynamic
CFSR	C limate F orecast S ystem R eanalysis
EA	E stación A nomométrica
ECMWF	E uropean C enter for M edium- R ange W eather F orecast
EE	E nergía E ólica
ERA	E uropean R esearch A nalysis
ERESE	E valuation del R ecurso E ólico en S itio E specífico
ESEPEE	E valuación de S itio E specífico con P robable E nergía E ólica
ES	E nergía S olar
EV	E nergía del V iento
GEVD	G eneralized E xtrme V alue D istribution
GPD	G eneralized P areto D istribution
GPS	G lobal P ositioning S ystem (Sistema de Posicionamiento Global)
GTE	G enerador de T urbina E ólica
HVTL	H igh V oltage T ransmission L ine (Línea de Transmisión de Alto Voltaje)
IEA	I nternational E nergy A gency
IEA WIND	I nternational E nergy A gency W IND (Agencia Internacional de Energía Eólica)
IEC	I nternational E lectrotechnical C ommission
IAVWS	I nter A nnual V ariability W Sind W ind S peed
IFS	I ntegrated F orecast S ystem
KAMM	K arlsruhe A mospheric M esoscale M odel
LTAV	L inea de T rasmisión de A lto V oltaje
MCP	M easure C orrelate P redict
MEASNET	M EASuring N ETwork of W ind E nergy I nstitutes
MERRA	M odern E ra R etrospective- A nalysis for R esearch and A plication
MDG	M étodo de D istribución de G umbel
NASA	N ational A eronautic and S pace A ministration (Aeronáutica Nacional y Administración Espacial)
NCAR	N ational C enter for A tmospheric R esearch
NCEP	N ational C enter for E nvironmental P rediction
NMPC	N ational M odel for P rediction of C limate
NNGR	N ational N etwork of G lobal R eanalysis
OMM	O rganización M undial de M eteorología
PDF	P robability D ensity F unction
PE	P arque E ólico

RE	Recurso Eólico
SE	Sitio Eólico
SEE	Sub Estación Eléctrica
SEEE	Sub Estación Eléctrica Eólica
SEPEE	Sitio Específico con Probable Energía Eólica
SP	Sistema de Potencia
TE	Turbina Eólica
UTM	Unidades Traverso Mercator
ZCIT	Zona de Convergencia InterTropical
WAsP	Wind Atlas Analysis and Aplication Program
WRF	Weather Research and Forecasting
WTG	Wind Turbine Generator

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Constantes Físicas

Velocidad de la Luz	$c_0 = 3.00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
Velocidad Angular de Rotación de la Tierra	$\Omega = 7.29 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$
Constante Universal de los Gases	$R = 8.31 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Masa Molar del Aire Seco	$M = 0.03 \text{ kg mol}^{-1}$
Presión atmosférica estándar al nivel del mar	$P_{atm(0)} = 101\,325 \text{ Pa}$
Aceleración de la gravedad en la sup. de la tierra	$g = 9.81 \text{ ms}^{-2}$

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Lista de Símbolos

Símbolo	Nombre	Unidad
a	Factor o parámetro de inducción axial	[-]
a_c	Aceleración de Coriolis	m s^{-2}
c	Parámetro de escala Weibull	m s^{-1}
$C_P(a)$	Coefficiente de Potencia de la TE	[-]
C_{vi}	Coefficiente de variación de la v_v	[-]
CR	Coefficiente de rug. del terreno frente a la TE	[-]
d_v	Dirección del viento	°
E	energía	Ws (J)
f_c	Fuerza de Coriolis	$\text{N (kg m s}^{-2})$
f	Parámetro de coriolis	[-]
f_{v_v}	Función de densidad probabilidades de v_v	[-]
f_P	Gradiente de presión	kPam^{-1} (mbarm^{-1})
$Frec(v_v)$	Frecuencia de la v_v	[-]
$\mathcal{F}_W(v_v)$	Función Weibull de densidad de prob. de v_v	[-]
k	Parámetro de forma Weibull	[-]
η_{mec}	Eficiencia mec. de la transmisión de la TE	%
η_{elect}	Eficiencia eléct. del generador de la TE	%
v_l	Vientos locales	m s^{-1}
v_g	Vientos geostróficos	m s^{-1}
v_s	Vientos de superficie (medidos a 10 m)	m s^{-1}
z_0	rugosidad del terreno o superficie	m
$\overline{v_v}$	Velocidad media del viento	m s^{-1}
v_v	Velocidad del viento	m s^{-1}
$v_v(z)$	v_v a la altura deseada z	m s^{-1}
$v_{v_{ref}}$	v_v en la cota de referencia	m s^{-1}
$v_{v_{EMax}}$	Velocidad del viento con máxima energía	m s^{-1}
$v_{v_{MP}}$	Velocidad del viento con máxima potencia	m s^{-1}
z	Altura deseada	m
z_{ref}	Altura de referencia	m
$\mathcal{P}_{TE}(v_v GTE)$	Modelo de la curva de P de una TE dada	$\text{W (J s}^{-1})$
P_{atm}	Presión atmosférica (1 atm al nivel del mar)	kPa (mbar)
x_d	Distancia en la dirección x (horizontal)	m
P_N	Potencia nominal del GTE	$\text{W (J s}^{-1})$
P_{disp}	Potencia eólica disponible según Betz	$\text{W (J s}^{-1})$
P_{v_v}	Potencia de la v_v	$\text{W (J s}^{-1})$
$P_p(v_v GTE)$	Potencia probable de la v_v dada una GTE	$\text{W (J s}^{-1})$

P_{elect}	Potencia eléctrica	W (Js ⁻¹)
P_{mec}	Potencia mecánica	W (Js ⁻¹)
P_r	Periodo de retorno	años
p_{v_v}	Probabilidad de v_v	%
Símbolo en Letras griegas	Nombre	Unidad
α	Exponente o índice de la Ley de Potencia	[-]
ρ_{air}	Densidad del aire seco	kgm ⁻³
Ω	Velocidad angular de rotación de la Tierra	rad s ⁻¹
ω	Frecuencia angular	rad
ϕ	Latitud de un SE o parcela	° ' " (h min s)

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Capítulo 1

Introducción a la Energía Eólica

La energía eólica es abordada desde su fuente primaria hasta sus clasificaciones e impacto del viento sobre las turbinas eólicas. Esto también incluye el impacto sobre la infraestructura que forman parte los parques eólicos. La prospección y búsqueda de un sitio específico con energía eólica toma en cuenta la física del viento. Esta incluye la revisión del fenómeno del efecto y la fuerza de Coriolis que explican la dirección y sentido del viento que va desde una zona de alta presión atmosférica a una de baja presión atmosférica. Se describen los vientos geostrofos y su modelo para diferenciarlos de los vientos locales y otros. La dinámica de los vientos alisios son descritos en lo general para su comprensión e identificación. Los vientos mar-tierra-mar son descritos en su dinámica para su comprensión y discriminación. Esto para distinguir de cada componente en la mezcla de vientos que atraviesan el sitio específico en el que se evalúa el recurso eólico. Los detalles y características del terreno son parte de la conveniencia, restructuración y desestimación de uso del sitio específico. El cálculo de la rugosidad del terreno en las diferentes direcciones con características distintas permite la toma de decisiones. También la rugosidad del terreno permite obtener el perfil de viento más realista del sitio para un rango de alturas. Las coordenadas globales del sitio permite establecer con precisión el sitio específico. Estas coordenadas son importantes porque en mapas orográficos se puede contrastar con los sitios circundantes. Los conceptos, la clasificación y normatividad de los temas eólicos son revisados a profundidad y se presentan en forma clasificada. La normatividad vigente es ordenada e identificada para su uso en el desarrollo de parques eólicos. La norma para evaluar recurso eólico de un sitio específico se identifica desde el universo de normas del IEC. Se reconoce que hasta el momento de redactar esta tesis no se ha publicado la versión final la norma para evaluar recurso eólico. Una versión para revisión fue liberada para que colaboradores del grupo hagan correcciones y aportaciones al documento. Se abordan el problema de intermitencia y variabilidad del viento incluyendo el acceso a bases de datos satelitales. y se aborda el problema de vientos extremos, fuerzas y efectos del viento sobre la infraestructura eólica. La tecnología de las evaluaciones del recurso eólico y la gestión de los resultados son descritos. Incluye el

tratamiento de los registros, evaluación y reporte. Se enuncian en este capítulo el objetivo general de la tesis y los objetivos específicos. Cada uno de los elementos y problemas aquí abordados son utilizados en la elaboración del reporte global de la evaluación del recurso eólico cuya normatividad es tema en construcción y que puede ser abordado en otra investigación.

1.1 Prospección y búsqueda de un sitio específico con energía eólica

La *Energía Eólica (EE)* proviene desde la *Energía Solar (ES)* convertida desde la fusión nuclear del hidrógeno en helio dentro del núcleo del sol. Esta energía atraviesa la atmósfera y llega a la superficie terrestre en forma de radiación electromagnética y otras partículas nucleares energéticas [1]. Una parte de esta es reflejada al espacio y otra es absorbida por el suelo, valles, montañas, océanos, mares, lagos y ríos. El balance energético de esta absorción y pérdida se manifiesta en almacenamiento de calor que depende de las capacitancias térmicas de cada cuerpo irradiado como en [2]. Las diferencias en inercias térmicas producen fenómenos muy diversos, entre ellas la evapotranspiración del agua superficial. Ésta a su vez se manifiesta en diferencias de *presión atmosférica (P_{atm})*. Las diferencias de P_{atm} en regiones son debidas a diferencias en el calentamiento o de insolación global. Estas diferencias de presión son el motor del "viento" (proveniente de los vocablos *Ventus*: del Latín y *Wind*: del Alemán y Holandés).

La búsqueda de un *sitio específico (SE)* ideal para aprovechar la *EE* implica realizar actividades bien definidas y en constante construcción. Estas van desde revisar previamente históricos de registros de diversas fuentes e indicios de su existencia. Estas actividades son: visitar los *SE* físicamente para entrevistar a los naturales del lugar; hacer secuencias fotográficas de los árboles y vegetación circundantes; tomar en cuenta que la interacción mar-tierra, tierra-mar, valle-montaña, superficie de una isla, istmos, golfos son lugares propicios para explorar la localización de un *SE* con probable *EE*, (*SEPEE*). La rugosidad del suelo afecta la *velocidad del viento (v_v)* y esta debe evaluarse adecuadamente de acuerdo a lo expuesto por [3]. Los sitios ubicados mar adentro son mejores porque el viento puede acelerar sin obstáculos. Éstos se clasifican con los valores de rugosidad superficial mínima o cero por periodos. Una vez corroborados los indicios, se diseña una campaña de medición para prospección eólica en el *SEPEE*. Para hacer la evaluación, modelación, estimación de recurso, etc. Para concluir, la exploración se debe hacer la elaboración del informe técnico final que es un tema en construcción al igual que la normatividad relacionada a la evaluación del recurso y diseño de parques eólicos (*PEs*).

1.1.1 Física del viento

El viento es consecuencia de las diferencias de P_{atm} y de la rotación del globo terraqueo. Las diferencias de P_{atm} son debido a las diferencias de calor absorbido por las diferentes regiones de la superficie terrestre, océanos, mares y cuerpos de agua. Los vientos son afectados por la rotación de la tierra pero—dado que la Tierra rota sobre sí misma—ésta no es un sistema inercial. Por esto se introduce una *fuerza ficticia* llamada *fuerza de Coriolis* (f_c) [4]. La *aceleración de Coriolis* (a_c) desvía los flujos de masas de aire a la derecha en el hemisferio norte y a la izquierda en el hemisferio sur. Las direcciones de los vientos d_v , distancia y superficie de influencia en donde—aleatoriamente—se presentan las diferencias de P_{atm} son modeladas por la ecuación de *vientos geostroficos*, ver Ec. 1.2. En meteorología este es considerado un viento teórico, o una aproximación del viento real.

Los *vientos locales* (v_l) tienen extensiones de varias decenas de kilómetros y predominan sobre los de circulación global. Estos vientos están influenciados por la topografía, inercia térmica, uso del suelo y otros. Los v_l incluyen las *brisas Mar-Tierra-Mar* y las *brisas Valle-Montaña*. En forma general la OMM teniendo en cuenta que la v_v se ve afectada por la *rugosidad del terreno* (z_0), considera que el *viento de superficie* (v_s) es el que sopla a una altura geométrica de 10 m y con una longitud de rugosidad de 0.03 m según la clasificación de Davenport. Sin embargo, para prospección eólica se debe medir a la altura del buje (*HUB*) del aerogenerador que se instalará según el proyecto eólico.

1.1.1.1 Efecto y fuerza de coriolis

El *efecto Coriolis* consiste en la aceleración relativa de un cuerpo en el mismo sistema de rotación. Coriolis predice que este efecto siempre que se observen cuerpos. En caso que se estudien movimientos relativos de máquinas o de fluidos respecto al eje de rotación estos son afectados por una fuerza adicional equilibrante denominada la fuerza de Coriolis [4, 5]. El *efecto de Coriolis* es uno de los tres mecanismos dimensionales de desviación identificados que ha discutido la comunidad científica en tres distintas épocas históricas separadas hasta nuestros días.

1. La *desviación horizontal* debida a *movimiento vertical* abordada en los siglos 17 y 19.
2. La *desviación vertical* debida a *movimiento horizontal* "El efecto Eötvös" fue abordado en el siglo 19 y el pasado siglo 20.
3. La *desviación horizontal* debida a *movimiento horizontal* o "Efecto Coriolis" abordada desde el siglo 18 hasta nuestros días del siglo 21.

El valor de la fuerza de Coriolis es $f_c = \rho_{air} f \overline{v_v}$, donde la variable $\overline{v_v}$: velocidad media del viento, ρ_{air} : densidad del aire, f : parámetro de coriolis.

El parámetro de Coriolis se define como $f = 2\Omega \text{sen}\phi$, donde $\Omega = \frac{2\pi}{86400}$: velocidad angular del globo terráqueo, ϕ : latitud del SE. Ejemplo si un SE tiene una latitud $\phi = 27^\circ \Rightarrow f = 0.000139$, ver Apéndice A. El efecto de Coriolis sobre los *vientos de circulación general en la atmósfera* se puede ver en la Fig. 1.1.

1.1.1.2 Viento geostrófico

El *viento geostrófico* es la resultante entre las *fuerzas de Coriolis* y la fuerza del gradiente de la P_{atm} , en estado estable es representado por una tendencia a un flujo paralelo a las isobaras. Las isobaras son las líneas que delimitan las zonas de igual P_{atm} y el viento, por principio meteorológico, este va de una zona de alta presión a una zona de baja presión. Sin embargo, debido a la rotación de la tierra este viento se convierte en *viento geostrófico* cuando alcanza estabilidad, ver Ec. 1.2.

Esta estabilidad se logra por medio del balance que imprime la *fuerza de Coriolis*, de tal forma que esta fuerza equilibra a la fuerza ejercida por el gradiente de P_{atm} , ver Ec. 1.1. Una vez alcanzado el equilibrio y que además toma un tiempo en lograrse el *viento geostrófico* teóricamente se mueve paralelo a las líneas isobaras. Este modelo en algunos casos de isobaras con radios reducidos presenta algunas diferencias, como es el caso de huracanes y tornados. En la atmosfera libre su valor se aparta del valor real en $\pm 10\%$ por lo que su uso puede ser de utilidad práctica como en la Ec. 1.2, mientras que en la proximidad de una circulación ciclónica resulta mas conveniente modelar como *viento de gradiente*. Dado que la *fuerza ficticia de Coriolis* $f_c = \rho_{air} f v_v$ eventualmente alcanza un estado estable relativo al gradiente de la P_{atm} , esta se expresa como $f_p = \frac{\partial P_{atm}}{\partial x}$ entonces cuando ambas ecuaciones se igualan en el eje x obtenemos la *ecuación de viento geostrófico*:

$$\frac{\partial P_{atm}}{\partial x} = \rho_{air} f v_v \quad (1.1)$$

$$v_g = \frac{-1}{\rho_{air} f} \frac{\partial P_{atm}}{\partial x} \quad (1.2)$$

Donde:

v_g : viento geostrófico; f : factor de Coriolis; v_v : velocidad del viento; ρ_{air} : densidad del aire y P_{atm} : presión atmosférica.

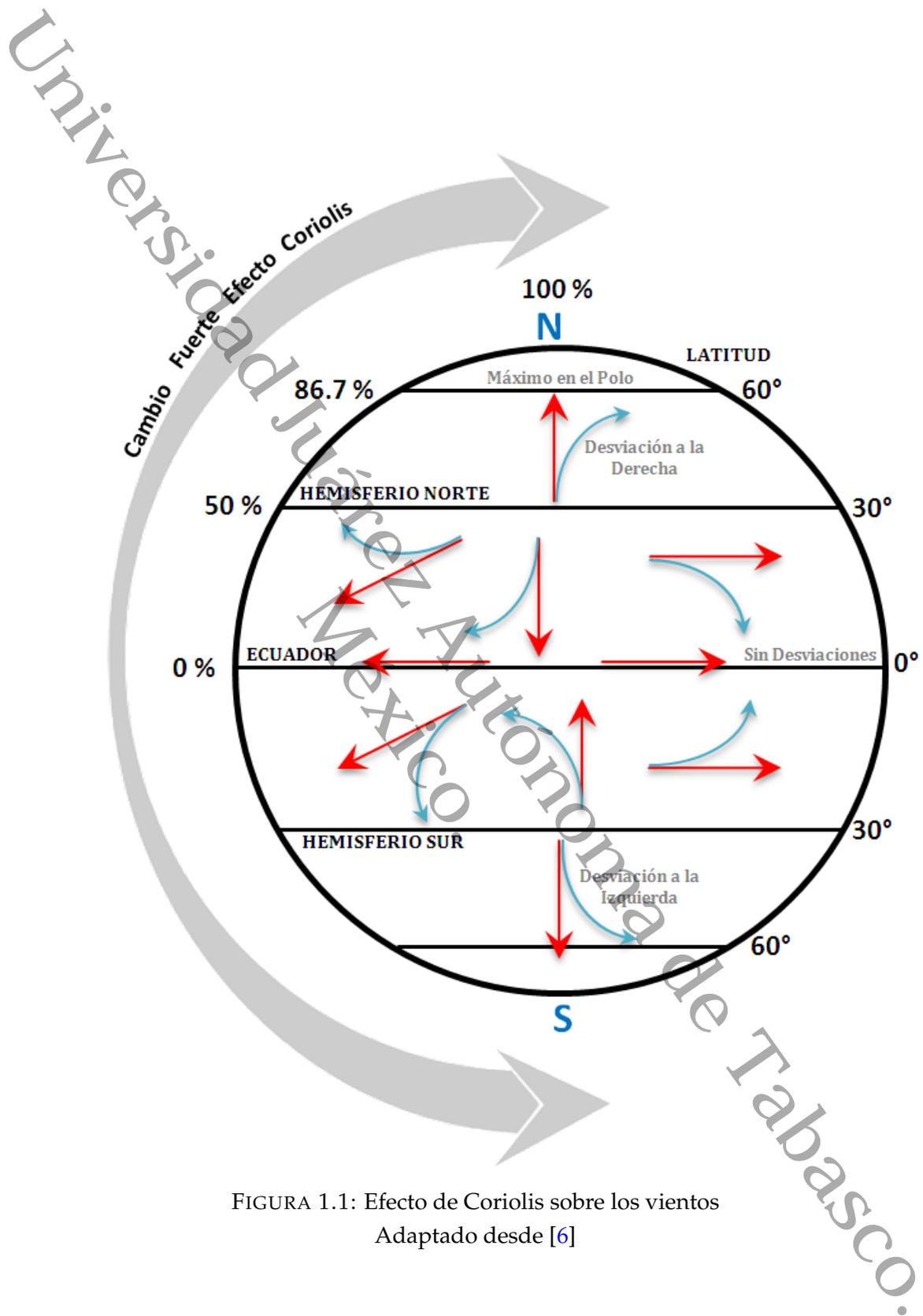


FIGURA 1.1: Efecto de Coriolis sobre los vientos
Adaptado desde [6]

1.1.1.3 Vientos alisios

Los *vientos alisios* forman parte de la *circulación de Hadley*. Estos transportan el calor desde la zona marcada por la línea del ecuador hasta las zonas subtropicales. Estos reemplazan el aire caliente por aire más frío provenientes de las latitudes superiores. Cuando convergen los *vientos alisios* desde ambos hemisferios se origina la zona de convergencia inter tropical (ZCIT). Esta se ubica en la línea ecuatorial donde el valor del *factor de Coriolis* es nulo. En el ecuador un ascenso de masas de aire caliente se produce, originando una zona de bajas presiones. Estas son sustituidas por otras masas de aire que proporcionan los *vientos alisios* de la circulación general de la atmósfera.

1.1.1.4 Viento mar-tierra-mar

En las zonas costeras durante el día la radiación solar calienta más rápidamente el suelo terrestre ya que el agua de mar o lagos tienen mayor *inercia* o *capacitancia térmica*. Durante el día la tierra alcanza más rápidamente altas temperaturas. Así el aire aumenta su p_{atm} y disminuye su ρ_{air} . Estos cambios originan un desplazamiento de las masas altas de aire hacia el mar. Conforme el suelo se calienta un vacío se forma en la zona costera. Para recuperar el aire que se ha escapado por las zonas altas, se produce un viento hacia la costa desde el mar. De este modo durante el día se origina la brisa marina o *viento Mar-Tierra*.

Durante la noche el proceso se invierte transitando el viento desde la costa hacia el mar. Este *viento tierra-mar* se produce debido a que la tierra se enfría también más rápidamente que el mar. Esto es debido a su gran capacitancia e inercia térmica. Esta propiedad hace que ahora las masas de aire por encima de los mares y océanos incrementen su p_{atm} y su ρ_{air} disminuya. Esta variación dan origen a una circulación inversa del viento. Una característica que puede observarse, es que el *viento mar-tierra* es de mayor velocidad. Esto es debido a que la diferencia de ρ_{air} debido a la influencia de la radiación solar es mayor. Por tanto durante el día se observan olas de mayor altura llegando a las costas. Estas son de menor altura y en sentido inverso durante la noche. Precisamente los *escaterómetros* instalados en algunos satélites miden la velocidad del viento a partir de la altura de estas olas en los mares.

1.1.2 Detalles y características del terreno

La forma u orografía superficial del terreno es clave porque dependiendo de esta el viento puede fluir en forma horizontal sin el efecto de la fuerza centripeta. Por ejemplo el viento puede moverse con menor resistencia en los océanos que en tierra firme. En tierra existen clasificaciones que pueden utilizarse para determinar el valor del perfil de v_v a partir del valor de la \bar{v}_v . Esta se mide a una altura definida por la campaña de medición con precisión

relativa a la determinación de las características reales del terreno. De esta característica depende la viabilidad de un proyecto eólico rentable.

1.1.2.1 Rugosidad del suelo y perfil de viento

La *rugosidad del suelo* (z_0) es una variable asociada al *SE*. Si la z_0 es conocida se puede determinar la velocidad del viento a cualquier altura utilizando la Ec. 1.3, teniendo disponible el valor de la velocidad del viento con bastante precisión a una altura de referencia z_{ref} , ya sea por una campaña de medición previa (para una evaluación eólica o de otra naturaleza) o por una medición instantánea desde un dispositivo monitoreado remotamente (para un pronóstico por ejemplo).

$$v_v(z) = v_{ref} \left[\frac{\ln(\frac{z}{z_0})}{\ln(\frac{z_{ref}}{z_0})} \right] \quad (1.3)$$

Donde

$v_v(z)$: velocidad del viento a la altura deseada z , v_{ref} : velocidad del viento medida a una altura de referencia z_{ref} , z_0 : altura de la rugosidad del *SE*.

Los perfiles de v_v pueden variar para un mismo *SE*. Si hacemos el cálculo para cada una de las direcciones se tendrá un perfil de velocidades de viento distinto. Cada una de las direcciones del *SE* tiene asociada una z_0 . El perfil depende de los obstáculos que se interpongan entre el *SE* y el origen del viento en esa dirección. Cada dirección con una z_0 se puede identificar en el procedimiento como $z_{0(z,\phi^\circ)} \Leftrightarrow v_{(z,\phi^\circ)}$ y de este modo se puede modelar el perfil para cada dirección independientemente si se cuenta con el binomio $v_{ref} \Leftrightarrow z_{ref}$ para la dirección geográfica de interés, así $v_v = f(z_0, v_{ref}, z_{ref})$ o para modelarla como función generalizada incluyendo su dirección geográfica Ec. 1.4.

$$v_{v(z,\phi^\circ)} = f \left\{ z(\phi^\circ), z_{0(\phi^\circ)}, v_{ref(\phi^\circ)}, z_{ref(\phi^\circ)} \right\} \quad (1.4)$$

Donde:

ϕ° : dirección geográfica en arco grados [$^\circ$ '] medidos a partir del norte;
 $z_{0(\phi^\circ)}$: longitud de la rugosidad en la dirección indicada; $v_{ref(\phi^\circ)}$: velocidad del viento de referencia en la dirección indicada; $z_{ref(\phi^\circ)}$: altura de la medición en la dirección indicada.

1.1.2.2 Coordenadas globales del sitio eólico

Las coordenadas globales son una malla de líneas imaginarias identificadas por paralelos y meridianos sobre el globo terraqueo. Los paralelos representan la *latitud* partiendo del ecuador en $0^{\circ} 0' 0''$ hacia ambos polos en intervalos de 10° . La *longitud* es representada por los meridianos que unen los polos, iniciando en el meridiano de Greenwich ambos parámetros sirven para localizar con precisión cualquier punto en la superficie terrestre. La *longitud* representa en grados de giro o rotación de $15^{\circ} 0' 0''$ y en tiempo $\approx 1 h$.

Los parámetros de *longitud* y *latitud* se pueden representar o convertir en grados decimales; grados, minutos, segundos; grados, minutos decimales; Unidades Tránsito de Mercator (*UTM*) o en el sistema de referencia de cuadrícula militar. Esta conversión se puede hacer directamente en un *GPS* o en Google Earth Pro, también se pueden hacer las operaciones de conversión manualmente.

1.2 Conceptos, clasificación y normatividad en temas eólicos

Los desarrollos eólicos están compuestos de una o varias turbinas eólicas (*TE*) o (*WT: Wind Turbine*) y cada *TE* esta compuesta de diversos componentes fabricados por la industria internacional, algunos componentes son de uso general y otros, en mayor número, especificados exclusivamente para la industria eólica. Las *TEs* pueden ser de eje vertical o de eje horizontal. Estas a su vez pueden ser tamaño micro, mini, medio y gran escala.

La diversidad de condiciones climáticas, localizaciones, situaciones orográficas, además de la cantidad de modelos, marcas y tamaños de las *TE* y generadores con *TE*, (*GTE* o *WTG*) para generar energía eléctrica es incuantificable. Estos son y deben ser capaces de operar aisladamente o interconectados a una red eléctrica. Para su utilización se tiene que contar con estándares que normalicen las operaciones de fabricación, compra, venta, seguridad, confiabilidad y las garantías. Se deben cumplir especificaciones que los desarrolladores deben entregar a los inversionistas. Además de garantizar la seguridad y confiabilidad de estos desarrollos para operar interconectados a la red eléctrica. Lo anterior es adicional al estudio de prospección eólica, evaluación y modelación del *RE* en el *SE*. Este tema es necesario porque de la disponibilidad tecnológica y selección de los *GTE* depende el aprovechamiento eólico.

TABLA 1.1: Estándares IEC para GTE, para más información y normas, ver Apéndice A o [IEC2017online.]

Núm. Parte	Título del Estándar	Referencia, Edición (Fecha)
1	WT - Part 1	Requerimientos de Diseño.
		IEC 61400-1:2005+AMD1:2010 CSV, Ed. 3.1 (2014-04-15).
2	WT - Part 1	Requerimientos de Diseño.
		IEC 61400-1:2005+AMD1:2010 CSV/COR1:2016, Ed. 3.1 (2016-02-03), Corrigendum 1.
3	WT - Part 1	Requerimientos de Diseño.
		IEC 61400-1:2005/AMD1:2010, Ed. 3.0 (2010-10-13), Amendment 1.
4	WT - Part 1	Requerimientos de Diseño.
		IEC 61400-1:2005, Ed. 3.0 (2005-08-31).
5	WT - Part 2	Turbinas Eólicas Pequeñas.
		IEC 61400-2:2013, Ed. 3.0 (2013-12-12).
6	WT - Part 3	Req. de Diseño TE marinas.
		IEC 61400-3:2009, Ed. 1.0 (2009-02-11).
7	WT - Part 4	Req. de Diseño para Transm. de TE
		IEC 61400-4:2012, Ed. 1.0 (2012-12-04).
8	WT - Part 11	Técnicas de Medición de Ruido Acústico
		IEC 61400-11:2012+AMD1:2018 CSV, Ed. 3.1 (2018-06-15).
9	WT - Part 11	Técnicas de Medición de Ruido Acústico
		IEC 61400-11:2012, Ed. 3.0 (2012-11-07).
10	WT - Part 11	Técnicas de Medición de Ruido Acústico
		IEC 61400-11:2012/AMD:2018, Ed. 3.0 (2018-06-15), Amendment 1.
11	WEGS - Part 12-1	Mediciones del rend. de pot. eléct. prod. por la TE
		IEC 61400-12-1:2017, Ed. 2.0 (2017-03-03).
12	WEGS - Part 12-1	Med. del rend. de pot. eléct. prod. por la TE
		IEC 61400-12-1:2017 RLV, Ed. 2.0 (2017-03-03).
13	WT - Part 12-2	Med. del rend. de pot. eléct. prod. por la TE. basado en anemometría en la góndola
		IEC 61400-12-2:2013, Ed. 1.0 (2013-03-28).
14	WT - Part 12-2	Med. del rend. de pot. eléct. prod. por la TE. basado en anemometría en la góndola
		IEC 61400-12-2:2013/COR1:2016, Ed. 1.0 (2016-09-29), Corrigendum 1.
15	WT - Part 13	Medición de cargas mecánicas
		IEC 61400-13:2015, Ed. 1 (2015-12-21).
16	WT - Part 14	Declaración de nivel de pot. del sonido aparente y valores de tonalidad
		IEC TS 61400-14:2005, Ed.1 (2005-03-22).
17	WT - Part 21	Medición y evaluación de las características de calidad de potencia de la red conectada. WT.
		IEC 61400-21:2008, Ed. 2.0 (2008-08-13).
18	WT - Part 22	Pruebas de conformidad y certificación. WT.
		IEC 61400-22:2010, Ed. 1.0 (2010-05-31).
19	WT - Part 23	Ensayos estructurales a gran escala de las palas del rotor.
		IEC 61400-23:2014, Ed. 1.0 (2014-04-08).

Continuación de Tabla 1.1

Núm. Parte	Título del Estándar	Referencia, Edición (Fecha)
20 WT - Part 24	Protección contra rayos.	IEC 61400-24:2010, Ed. 1.0 (2010-06-16).
21 WEGS - Part 25-1	Comunicaciones para el seguimiento y control de centrales eólicas. - Descripción general de los principios y modelos.	IEC 61400-25-1:2017, Ed. 2.0 (2017-07-20).
22 WEGS - Part 25-1	Comunicaciones para el seguimiento y control de centrales eólicas. - Descripción general de los principios y modelos.	IEC 61400-25-1:2017 RLV, Ed. 2.0 (2017-07-20).
23 WT - Part 25-2	Comunicaciones para monitoreo y control de centrales eólicas - Modelos de información.	IEC 61400-25-2:2015, Ed. 2.0 (2015-06-30).
24 WT - Part 25-3	Comunicaciones para monitoreo y control de centrales eólicas - Modelos de intercambio de información.	IEC 61400-25-3:2015 RLV, Ed. 2.0 (2015-06-30).
25 WT - Part 25-3	Comunicaciones para monitoreo y control de centrales eólicas - Modelos de intercambio de información.	IEC 61400-25-3:2015, Ed. 2.0 (2015-06-30).
26 WEGS - Part 25-4	Comunicaciones para monitoreo y control de plantas WP - Mapeo a perfil de comunicación	IEC 61400-25-4:2016 RLV, Ed. 2.0 (2016-11-30).
27 WEGS - Part 25-4	Comunicaciones para el monitoreo y control de plantas de energía eólica - Mapeo al perfil de comunicación	IEC 61400-25-4:2016, Ed. 2.0 (2016-11-30).
28 WEGS - Part 25-5	Comunicaciones para monitorización y control de centrales eólicas - Pruebas de conformidad.	IEC 61400-25-5:2017, Ed. 2.0 (2017-09-20).
29 WEGS - Part 25-6	Comunicaciones para monitoreo y control de plantas de energía eólica. Clases de nodos lógicos y clases de datos para monitoreo de condición.	IEC 61400-25-6:2016, Ed. 2.0 (2016-12-16).
30 WT - Part 26-1	Disponibilidad basada en el tiempo para el sistema generador de turbinas eólicas.	IEC TS 61400-26-1:2011, Ed. 1.0 (2011-11-14).
31 WT - Part 26-2	Disponibilidad basada en producción para aerogenerador.	IEC TS 61400-26-2:2014, Ed. 1.0 (2014-06-04).
32 WTGS - Part 26-3	Disponibilidad para estaciones de energía eólica.	IEC TS 61400-26-3:2016, Ed. 1.0 (2016-08-09).
33 WT - Part 27-1	Modelos de simulación eléctrica - Aerogenerador.	IEC 61400-27-1:2015, Ed. 1.0 (2015-02-13).

Los estándares y normatividad de referencia son temas que deben ser considerados antes de hacer la búsqueda del *SE* y deberán ser aplicados durante el estudio y el proceso de diseño de un parque eólico. Hoy en día no todas las áreas de desarrollo en *EE* están soportados por estándares internacionales y nacionales de cada país, ver Tabla 1.1.

Principalmente, la normatividad se encuentra desarrollada y clasificada por organismos internacionales. Estos estándares están enfocados principalmente a: las especificaciones de diseño de las *TEs*; *GTEs*; sus generadores; sus multiplicadores de velocidad; sus rotores; sus palas; sus sistemas mecatrónicos; sus telecomunicaciones; sus eficiencias de conversión de la energía; las mediciones del ruido que estas emiten; sus disponibilidades; sus confiabilidades, etc., ver Tabla 1.1. Aquí se presenta en forma clasificada y temporal para identificar cada uno de los estandares de referencia en los sistemas y equipamiento eólico de la *TE*. Esta tabla se preparó en este trabajo como una referencia esencial cuando se quiere hacer un desarrollo o certificar cumplimientos normativos que van desde una mini *GTE* hasta grandes aerogeneradores *GTEs*.

Se debe cumplir con las especificaciones de interconexión a la red eléctrica y las especificaciones ambientales internacionalmente aceptadas. Esta tabla clasificada permite comparar si una turbina eólica cumple con el estandar correspondiente ya sea para certificarlas, para su proyección de producción anual de energía o para su comercialización. Sobre todo para hacer las pruebas de cumplimiento y conformidad.

En México no hay estándares relacionados a la fabricación, certificación, pruebas de *GTE*, componentes aplicados a la Energía Eólica, solo se encontraron algunas líneas en documentos sobre la tenencia de la tierra y la interconexión a la red nacional.

1.2.1 Normas para evaluar recurso eólico en un sitio específico

En México no existen estándares nacionales, ni estándares análogos a los estándares internacionales para evaluar el *RE* en *SE* alguno. También faltan regulaciones publicadas para su práctica o pautas para el uso de los archivos conteniendo mediciones de v_v . La mayoría de los registros se obtienen normalmente de mediciones con fines meteorológicos, agrícolas o hidrológicos [7]. Los registros disponibles de otras actividades como la actividad aeroportuaria, entre otros. Estos tienen un alcance y un propósito sustancialmente diferente de los registros que deben obtenerse específicamente

al evaluar el *RE* para un *SE*. En muchos casos, los registros utilizados son de origen para otros fines. Estos no corresponden al sitio exacto, ni a las condiciones orográficas o topográficas. Muchas veces no son adecuados ni extrapolando la ubicación donde se necesita la estimación y el pronóstico de *RE* [8, 9].

También se han identificado brechas en los contenidos técnicos en la legislación nacional mexicana [10]. Entre las más recientes legislaciones puede consultarse la Ley para el uso de *RE* y el Financiamiento de la Transición de Energía, última reforma del Boletín Oficial de la Federación (DOF) 12-01-2012, [11]. En México no se cuenta con regulaciones ni recomendaciones, sobre temas que van desde las campañas de medición hasta la fabricación de *TEs* y la construcción de Parques eólicos (*PE*). Por ejemplo, Canadá está utilizando sus propios estándares, basados en otros estándares como el de la Comisión Electrotécnica Internacional (*IEC : International Electrotechnical Commission*),[12].

Con respecto a las recomendaciones de mejores prácticas para medir *RE* en Argentina. La guía escrita [13] que se basa en compilaciones descritas en [14, 15] y otras referencias técnicas que son muy útiles para tales tareas como se presenta en [16]. A nivel internacional, existe un número considerable de estándares aplicables a las pruebas de turbinas, generadores, cajas de engranajes, equipos eléctricos y electrónicos, entre otros, relacionados con el uso y la validación de las especificaciones de *TE*. También hay recomendaciones detalladas para las mediciones de la v_v y para la implementación de estaciones meteorológicas [17]. Sin embargo, los estándares actuales de la serie IEC 61400 no abordaron las condiciones de Evaluación de la energía eólica para un *SE* y el contenido del informe técnico final.

Los estándares existentes se utilizan para verificar y certificar las características eléctricas y mecánicas de *TE* en todos los tamaños, principalmente del tipo de eje horizontal. Los resultados obtenidos de la evaluación, estimación y pronóstico de *RE* de un *SE* por lo general varían según las técnicas empleadas por los especialistas en el tema [8, 18]. Estas diferencias se pueden atribuir a factores como la selección de puntos de medición, la calidad del equipo, la implementación práctica de las campañas de medición, las metodologías utilizadas, entre otras, incluida la presentación del informe final. Otras razones de tales diferencias se deben a las diferentes condiciones climáticas y orográficas de un *SE*, por ejemplo, continental o costero, así como diferencias



FIGURA 1.2: Instrumentación congelada en climas muy fríos, adaptado desde [19], [20].

entre un *SE* con el clima cálido y clima muy frío.

IEA WIND informó que la medición de la v_0 en lugares muy fríos reduce la calidad y confiabilidad de los registros, ya que los anemómetros pueden detenerse, disminuir la velocidad o sufrir daños debido a la congelación o la caída del hielo y la nieve ver Fig. 1.2 [19]. Incluso si los sensores están equipados con calentadores estos pueden presentar fallas o no ser confiables. Los sensores afectados por problemas físicos o ambientales no pueden detectarse fácilmente en los propios sensores ni en los registros, lo que dificulta su identificación ver Fig. 1.3. Los círculos verde y rojo indican problemas de medición y registro. Aún más crítico es cuando consumen energía eléctrica para calefacción. Esta energía puede estar ausente en el sitio por períodos que originalmente no se tuvieron en cuenta [19, 20]. La norma IEC 60721-3-3 define los límites relacionados con las condiciones climáticas para equipos eléctricos, como transformadores y conmutadores, entre otros, utilizados en *TEs* y *PEs* lo que hace al tema muy extenso [21–23].

En conclusión al tema de la normatividad, a la fecha sigue en proceso el estandar WG 15 para la evaluación de los *REs*, el rendimiento energético y la idoneidad del sitio para las plantas de energía eólica (*EE*) (IEC-61400-15:

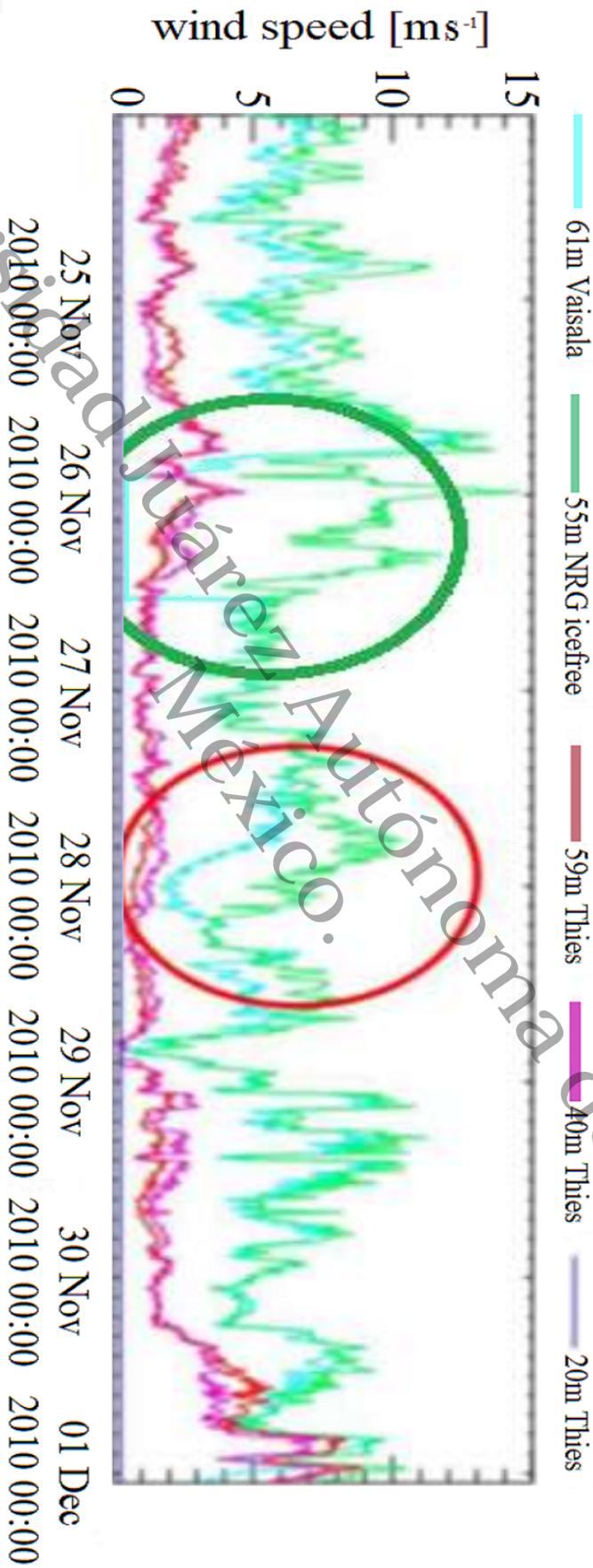


FIGURA 1.3: Sensores con fallo por congelación o adherencia, adaptado desde [19], [20].

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Assessment of wind resource, energy yield and site suitability input conditions for wind power plants), con la participación de MEASNET como líder del proyecto. El desarrollo de este estándar tiene la intención de definir un marco para la evaluación del RE y la redacción del informe final, el rendimiento energético y las condiciones de entrada de idoneidad al SE para las centrales de EE en tierra y en alta mar [24]. Esto incluye:

1. Definición, medición y predicción de las características meteorológicas y de flujo del viento a largo plazo en el sitio.
2. Integración de las características meteorológicas y de flujo del viento a largo plazo con la TE y el equilibrio de las características de la planta para predecir el rendimiento energético neto.
3. Caracterizar los extremos ambientales y otros factores relevantes del diseño de la planta.
4. Evaluar la incertidumbre asociada a cada uno de estos pasos.
5. Abordar los requisitos de documentación e informes para ayudar a garantizar la trazabilidad de los procesos de evaluación.

1.3 Problema de la intermitencia y variabilidad del viento

Debido a que la v_v y la EE es intermitente e incontrolable, existen varias metodologías determinísticas y empíricas para estimar los recursos eólicos. Igualmente existen metodologías que consideran la dinámica estocástica de interacción del PE con las líneas de transmisión y subestaciones eléctricas. El tema es muy amplio y puede ser analizado desde diferentes puntos de vista y en diferentes etapas. Esto puede ser antes de desarrollar un PE, o ya sea durante la operación, incluso después de que el PE haya estado en funcionamiento.

Cheng *et al* propuso que las metodologías existentes sean revisadas y refinadas para obtener un modelo probabilístico más apropiado para determinar la Potencia Eólica (P_{eolica}) o $P_{cinetica}$ [25]. La P_{eolica} es convertida en energía mecánica $E_{mecánica}$ y mediante un generador de energía eléctrica (E_{elect}). Este grupo electrógeno eólico es el corazón de una TE o un PE.

Ramakumar y Naeter propusieron evaluar la confiabilidad de la EE en los sistemas de potencia (SP) a donde esta se inyecta de forma integral, midiendo

simultáneamente la EE de entrada a un GTE y la E_{elect} que el GTE entrega al PE . Determinar la producción de energía de un PE y un GTE sigue siendo un desafío, ya que esta prueba puede abarcar aspectos como determinar la función de densidad de probabilidad (PDF : *Probability Density Function*) hasta cálculos muy complejos como: el modelado dinámico del flujo de viento que pasa por un GTE , el efecto de estela entre otras variables como fallas internas y provocadas por el viento [26].

Las averías y reparaciones comunes de los $GTEs$ en PEs interconectados a una red eléctrica también se pueden examinar en función de: su diseño, fabricante, normatividad, operación, eficiencia, mantenimiento, etc., ver también Tabla ??, en el apartado 1.2.1. La confiabilidad de la EE cuando esta interactúa con una Subestación Eléctrica (SEE) a través de las redes eléctricas regionales o nacionales es crucial. Esta interacción se ha abordado a través de modelos probabilísticos [27]. La confiabilidad es muy importante para la continuidad de la entrega e incorporación de la EE en las subestaciones eléctricas $SEEs$.

Para estudios de los fenómenos y análisis cinemático y dinámico de la v_v y EE . Esta se representa usando datos registrados por hora de las medias aritméticas de mediciones con muestreos de 1 Hz o mayores. Por comodidad en el cálculo se basa en la media horaria de la v_v . Estas pueden integrarse en series de tiempo ARMA, series de tiempo de Promedio Móvil (PM) de las mediciones, series de distribución normal y modelos representados en cadenas de Markov, estas se han usado para obtener índices [28].

Para la interacción dinámica de PEs se tiene en cuenta el nivel jerárquico dentro del Sistema de Energía (SE). Por ejemplo para un PE en altamar, N. Barberis Negra *et al* revisó nueve de los factores más relevantes que influyen en la confiabilidad del sistema de P_{elect} . Los autores consideraron la adecuación y seguridad del sistema mediante la simulación de diferentes configuraciones y fallas de las redes de interconexión utilizando el método de Monte Carlo para mejorar el Balance de Energía Demandada (BED). Ellos también consideraron el caso cuando la ubicación geográfica de un $SEEE$ en alta mar con un buen y suficiente RE no esté cerca de una Línea de Transmisión de Alto Voltaje ($LTAV$ o $HVTL$: *high Voltage Transmission Line*) o de una subestación eléctrica [29]. Para estos casos es necesario simular, diseñar y construir ambos subsistemas para garantizar la confiabilidad del PE de acuerdo a la intermitencia del viento.

La v_v además de ser intermitente durante el día y la noche, puede cambiar su intensidad promedio a largo plazo, esto se conoce como *Variabilidad interanual de la velocidad del viento*, (*IAVWS:Inter Annual Variability Wind Speed*). Watson *et al* usaron 57 estaciones meteorológicas del Reino Unido pertenecientes al Centro Británico de Datos Atmosféricos (*BADC-57:British Atmospheric Data Center*) y un índice de viento regional calculado para el período 1983-2011. Ellos también consideraron un grupo más pequeño de 7 estaciones llamado *BADC – 7* y un índice adicional para el período 1957-2011. Ambos índices mostraron un *IAVWS* de 4 % (esto corresponde a una variación típica de 7 % del factor de capacidad). Estos índices se compararon con índices de otras fuentes, como (*ERA-40:European Re-Analysis-40*), calculados con interpolación bilineal que muestra declinaciones en los índices de los grupos *BACD – 57* y *BACD – 7*, mientras que los obtenidos por *ERA – 40* muestran un aumento [30, 31]. Estas diferencias encontradas entre estos índices de estos grupos son importantes porque revelan incertidumbres en la predicción en producción de energía eólica a partir de la v_v . Normalmente, los valores estimados de la variabilidad del viento se hacen a partir de registros de estaciones anemométricas (*EA*) existentes e instaladas para otras aplicaciones, por lo que su uso tiene desventajas como:

1. Los *SEs* con probable *EE* (*SEPEE*) no se encuentran cerca de las *EAs* existentes con históricos de registros suficientes.
2. Las *EAs* están con frecuencia cerca de edificios, mientras que los *SEPEE* tienden a ubicarse en la parte superior de terrenos escarpados, costas y otros tipos de terrenos libres de obstáculos.
3. En la mayoría de *EAs*, la configuración de los instrumentos, los protocolos de medición utilizados no cumplen con especificaciones de evaluación energética.
4. El entorno, las ubicaciones y la altura de las torres de las *EAs* cambian con los años, lo que produce importantes discontinuidades dinámicas y en las tendencias de sus registros. históricos.

Si en el proceso de evaluación de un *SEPEE* se presentan las desventajas anteriores enunciadas referente a los datos existentes, es posible usar como una primera aproximación los metadatos provenientes de modelos numéricos utilizados para la predicción del clima (*NMPC:Numérical Model for Prediction of Climate*) en el rango de Mesoescala; los del Centro Nacional para Investigación atmosférica (*NCAR:National Center for Atmospheric Research*); el Centro Nacional para la Predicción Ambiental (*NCEP:National Center for Environmental*

prediction) y la Red Nacional de Re-Análisis Global (NNGR: *National Network of Global Re-Analysis: Versiones 1 y 2*).

En lo general la *EE* se deriva indirectamente del sol y a partir de este proceso se originan las principales causas de la variabilidad de la v_v y potencia del viento (P_v). Tomando en cuenta que el viento no sopla continuamente en cada *SEPEE*.

En lo regional la falta de entrada de viento en cualquier *PE* que pertenezca a un grupo de *PEs* interconectados a la red regional o nacional tiene poco del impacto general de la *EE* global, porque en ese corredor eólico la *EE* se puede visualizar como un tren atravesando los *PEs*. Al igual que cada vagón de tren se mueve de una latitud a la siguiente, y a medida que el "tren" eólico se desplaza por la vía (corredor eólico), el viento tiene períodos con una cantidad específica de energía. Por lo tanto, donde hay muchos *PEs* en un mismo corredor eólico, el viento funciona en una secuencia—el viento siempre "sopla" en alguna parte—constante. La falta de salida de una o mas unidades de *GTE* en el *PE* tiene un efecto insignificante en la disponibilidad de salida global de un corredor global de *PEs* o región.

Expresado lo anterior en forma sintética, es necesario correlacionar la salida de todas los *PEs* de una región con la *EE* global. Esto se hace ingresando todos los *PEs* en esa región o sistemas de forma secuencial. Esta correlación significa que a través de todo el sistema hay interacción secuencial: $Clima_{global} - Clima_{local} - EE - TE - PE - SP - Carga - Otras\ fuentes$. El viento puede ser aprovechado o cosechado para proporcionar una salida estable del corredor o región incluso si el viento no está disponible todo el tiempo en algún *SEPEE*.

En conclusión, la variabilidad de la v_v y la *EE* producida debe examinarse en el contexto más amplio, no solo desde la perspectiva de la estabilidad eléctrica y la confiabilidad de los *SP*, del *PE* individual, *GTEs* o sus respectivos modelos, pero en un contexto amplio que incluye todos los subsistemas mencionados anteriormente y la dinámica del clima global o regional combinada.

1.3.1 Disponibilidad y acceso a bases de datos satelitales

Algunos evaluadores de *RE* al instrumentar sus metodologías y modelos están empleando metadatos como observaciones base. Estos metadatos provienen de registros, datos históricos, de satélites, aviones, globos incluyendo estaciones anemométricas de superficie o *EA*. Con estos modelos, es

posible generar series de tiempo en una cuadrícula superficial atmosférica y prolongarlas durante varias décadas. Estas pueden incluir otras variables como: temperatura, presión atmosférica, humedad, precipitación entre otras [32].

Hoy en día están disponibles nuevas versiones del Reanálisis del Sistema de Pronóstico del Clima (*CFSR:Climate Forecast System Re-Analysis*). El modelo *NCEP* tiene una mejor resolución de ~ 38 km en el período desde 1979 a la fecha [33]. La mayoría de los parámetros de este modelo están disponibles cada 6 h, aunque las variables pueden seleccionarse cada 1 h.

Soares *et al* obtuvieron datos usando el modelo Weather Research and Forecasting (*WRF*) y los evaluó contra Campañas de evaluación de *SE* con *EE* (*ESEEE*), para representar mejor una prueba ciega. Los autores validaron los datos de viento de Mesoescala cuantificando las estadísticas de error entre los datos de viento observados y los simulados para comprender mejor las posibles fuentes de desviaciones. La Aeronáutica Nacional¹ y Administración del Espacio de los EE. UU., (*NASA:National Aeronautics and Space Administration*) tiene un sistema global de asimilación de datos. Esto lo realiza en Análisis Retrospectivo de la Era Moderna para investigación y aplicaciones - (*MERRA:Modern Era Retrospective-analysis for Research and Applications*). Este sistema tiene una resolución de ~ 55 km, (0.5° latitud, 0.66° longitud) y tiene registros desde 1979 hasta la fecha. La mayoría de sus parámetros también están disponibles cada seis horas y las variables pueden ser seleccionado cada hora [34, 35].

El modelo (*ERA:ECMWF Re-Analysis*), se derivó del modelo principal del Centro Europeo para Pronósticos Climáticos de Mediano Alcance, conocido como (*ECMWF:European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) [36]. Los satélites de este centro están equipados con dispersómetros (scatterometers). Estos son instrumentos con un radar de microondas que proporciona medidas radiométricas de alta precisión de sección transversal. La salida del radar normalizada es tomada desde la superficie del océano con múltiples ángulos de visión. La intensidad de la señal devuelta desde la superficie del océano depende principalmente de su rugosidad (oleaje). Este sistema incluye los siguientes modelos: *ERA - 15*, *ERA - 40* y *ERA - Interim*, basado en el sistema de pronóstico integrado (*IFS:Integrated Forecasting System*). Todo esto con una resolución horizontal de \sim km (0.85° latitud) con registros que datan desde 1979 hasta la fecha. La mayoría de las variables están disponibles cada

¹<https://earthdata.nasa.gov/>

tres horas [37].

1.3.2 Vientos extremos, fuerzas y efectos

Las v_v s extremos tienen un período de retorno (P_r) y es necesario conocer tanto sus magnitudes como su P_r . Esto es para evitar y estimar daños en la maquinaria eólica principalmente, las personas y sus bienes. Lakshmanan *et al* realizaron análisis en 70 estaciones meteorológicas en la India utilizando los datos de ráfagas de viento diarias en km h^{-1} para cada uno de los sitios. Ellos utilizaron como herramienta el papel probabilístico de Gumbel, los valores extremos se derivaron de registros de v_v dispersos, considerando un período de retorno de 50 años para la v_v con un valor de 126 km h^{-1} (35 m s^{-1} a 38 m s^{-1}) desde 1969 hasta 2005 [38].

Razali usó registros de 12 estaciones meteorológicas en Malasia en el período 1975-2008 para obtener el valor extremo de v_v utilizando el Método de distribución de Gumbel (*MDG*) para períodos de retorno de 10, 30, 50 y 100 años. Los autores encontraron que, a corto plazo, el valor extremo no supera los 15 m s^{-1} , determinaron que no existe riesgo de daño para el *GTE* en la vecindad de las *EA* que sirvieron como referencia, sin embargo, el riesgo de daño aumenta a medida que se extiende a períodos de 50 y 100 años [39].

En el caso de instalaciones donde se genera electricidad a partir de la v_v , más *PEs* estarían en riesgo, incluidas las instalaciones dedicadas a la agricultura y aplicaciones como el riego, entre otras. También porque las políticas siempre deberían permitir proporcionar porcentajes más altos de *EE* a la mezcla energética de cada región o nación, de acuerdo a la demanda. Por ejemplo, en los Estados Unidos 20% de su demanda se satisfarán con *EE* para 2030. Esto hace que sea muy necesario tener registros de los valores de vientos extremos de cada *SEPEE* [40].

Las velocidades extremas del viento no solo son importantes para las instalaciones de *PE*, sino también para otras instalaciones de generación de energía, como plantas de energía nuclear, líneas de transmisión de alta tensión y subestaciones eléctricas, ya que, como nos recuerda [41], pueden ocurrir accidentes durante la construcción y operación de estas *PE* y plantas nucleares. XG Larsén *et al* examinaron varias fuentes de incertidumbres en la aplicación de dos funciones de distribución de valor extremo ampliamente utilizadas: la distribución de valores extremos generalizada (*GEVD*) y la distribución

de Pareto generalizada (*GPD*). Además propusieron sus contribuciones como una guía para aplicar *GEVD* y *GPD* a la serie temporal de v_v de duración limitada [42]. Los autores sugirieron también que estas series podrían extrapolarse a partir de modelos globales o de mesoescala. Ellos concluyeron que la falta de representatividad climatológica es una fuente importante de incertidumbre en el uso de ambos modelos.

1.4 Tecnología de las evaluaciones y gestión de los resultados

Los analistas de todo el mundo están usando varias herramientas y tecnologías para la evaluación y estimación de *RE*. J. S. Rodrigo realizó un estudio basado en 72 preguntas hechas a 48 organizaciones diferentes en la comunidad de evaluadores de *EE* [18]. De esta encuesta, el autor concluyó que:

1. La duración de la capacitación recibida por los analistas varió de un mes a un año, con diferencias significativas tanto en la homogeneización de los criterios técnicos como en la valoración de las incertidumbres.
2. 50% de las organizaciones usan estaciones terrestres convencionales y el resto está tratando de usar instrumentos con medición remota.
3. Existe cierto consenso de que el uso de *CFD* puede ser más preciso que el uso de modelos lineales en la estimación del recurso eólico en terrenos complejos.
4. Los modelos para *EE* están utilizando los modelos de mesoescala, 75% de ellos han generado atlas regionales. Este sector muestra que carece de metodologías para adaptar los datos de las condiciones del viento de mesoescala a la microescala y para la estimación de los valores extremos del viento, lo que implica incertidumbres
5. Las principales prioridades de investigación en la estimación de la *EE* se centran en cuatro metodologías: (I) Desarrollo de instrumentos con técnicas de medición remota y posprocesamiento; (II) Validación de modelos de estimación de *EE* basados en campañas de medición dedicadas a terrenos complejos, alta mar, etc.; (III) Desarrollo de modelos de turbulencia para el arranque de *GTEs*; (IV) Desarrollo de modelos para el flujo de entrada y alrededor de áreas boscosas.
6. La reducción de escala y la microescala, los efectos de estabilidad no neutros, el modelado y las especificaciones *CFD* son necesidades específicas de los desarrolladores, fabricantes y consultores, respectivamente.

En conclusión existen muchas herramientas matemáticas, estadísticas y computacionales, así como dispositivos, equipos y sensores de baja, mediana y alta precisión y confiabilidad. La confiabilidad de los resultados dependerá de la reducción del conjunto de incertidumbres posibles desde la selección del sitio hasta la elaboración del documento final de una ERESE, ver Tabla 1.2. El informe de este estudio concluyó que una receta de tres pasos para el éxito es:

1. Evaluación de la *EE* en programas de capacitación específicos.
2. Verificación y validación de metodologías con campañas de medición dedicadas.
3. Definición de procedimientos de control de calidad.

Algunos procedimientos y estándares disponibles en la Internet son: MEASNET [14, 17] y IEC [43], pero estos son para pruebas de operación de los *GTEs* y la validación de pequeños y grandes *TEs*.

La tecnología para realizar la evaluación del *SE* puede variar dependiendo de la disponibilidad del tipo de registros y de las herramientas utilizadas para obtener los valores e indicadores de disponibilidad eólica, ver Tabla 1.2.

TABLA 1.2: Resumen de los métodos, herramientas, medios, ventajas y desventajas utilizadas en las estimaciones, evaluaciones y modelos de *RE*.

Métodos	Herramientas / Medios	(V)ventajas / (D)esventajas
Método 1: Folklore.	Desde entrevistar a personas con conocimientos locales; identificar árboles inclinados en el paisaje; de la práctica onomatológica como: "Windy Wellington" (Nueva Zelanda); "Windy City" (Chicago); "Windeby" (Dinamarca); "La Ventosa y La Venta" (México); "Windy Standard" (Escocia), [44].	(V) Muy barato y rápido. (D) Casi siempre hay una tendencia a sobreestimar, principalmente porque el viento en áreas ventosas, generalmente se evalúa en términos del factor de frío: cuando hace frío, incluso los vientos moderados se sienten fuertes. En segundo lugar, no hay certeza de que el área haya sido inspeccionada en su totalidad. Se debe usar solo si no hay otro método disponible [44].
Método 2: Mediciones únicamente.	Sensores: anemómetros [14]; paletas; termómetros; presión atmosférica; Humedad relativa; mástiles y booms; registradores de datos; SODAR; LIDAR. A través de mediciones de terceros como: observaciones de aeropuertos, observaciones de servicios meteorológicos regionales; Normas sobre la evaluación de los recursos eólicos de un sitio específico IEC-61400-15 (aun no disponible), o directrices como en [17, 32, 44, 45].	(A) Cuando las mediciones se realizan ad-hoc directamente en el área exacta, altura y punto. (D) Existe un gran riesgo de sobre-estimación severa si el estudio se basa principalmente en observaciones en la acumulación o en la sub-estimación del recurso si las observaciones son principalmente en terrenos de baja rugosidad muy expuestas áreas (A) Usando los estándares en la evaluación de <i>RE</i> o <i>SEPEE</i> . (D) Debe hacerse para cada sitio específico en la posición tridimensional o posición del <i>HUB</i> [44].

Continuación de Tabla 1.2

Métodos	Herramientas / Medios	(V)entajas / (D)esventajas
Método 3: Medir-Correlacion-Predecir, (MCP) y Modelado de dinámica de fluidos computacional (CFD).	<i>WA_{5P}</i> , [46]; <i>MS-Micro</i> [47] y <i>Raptor</i> ,[48]; <i>Raptor-NL.6</i> Incluso <i>MCP-CFD</i> [49]. Uso de una campaña de medición corta en el sitio que se correlaciona con la representatividad de las series temporales climatológicas de 5 a 10 años del <i>SE</i> [44].	(A) Las ventajas incluyen el hecho de que solo se requieren mediciones en el sitio a corto plazo. (D) A menudo, la correlación entre la serie temporal en el <i>SE</i> y la climatológica es bastante baja, lo que produce más errores; (A) Costo de evaluar el <i>RE</i> de un <i>SE</i> . Para muchos propósitos, estas herramientas son adecuadas [44].
Método 4: Bases de datos Globales.	De los Centros Nacionales para la Predicción Ambiental / Centro Nacional para la Investigación Atmosférica (NCEP/NCAR) y el Centro Europeo para la Predicción Meteorológica a Mediano Plazo (ECMWF). El uso de bases de datos globales de vientos en la atmósfera libre ha permitido obtener datos de los últimos 4 a 5 años según la ley de dibujo geostrófico: $G = \frac{u_*}{k} \sqrt{\left(\frac{u_*}{z_0} + A\right)^2 + B^2}$, donde <i>G</i> : valor de viento geostrófico [50]; <i>u*</i> : velocidad de fricción; <i>k</i> = 0.4: constante de von Karman; <i>f</i> : parámetro de Coriolis; <i>z</i> ₀ : rugosidad de la superficie; <i>A</i> = 1.8; <i>B</i> = 4.5 [44].	(A) En la medida en que estas bases de datos son globales; El método puede ser aplicado a cualquier área; ya que se utilizan vientos de alto nivel; Los efectos locales no se introducen en primer lugar; Las bases de datos generalmente tienen un rango de 10 años o más, las estimaciones son climatológicamente estables. (D) La resolución está en grados de coordenadas geográficas (GC), es decir, 100 km cada grado GC cerca del ecuador); Los vientos en altura no son representativos de los sitios locales; el parámetro Coriolis es pequeño o incluso cero en las regiones ecuatoriales [44].
Método 5: Metodología de Atlas de Viento (CFD Models).	Los scatterómetros y otras herramientas de Satélite [37] son fuentes importantes para las mejores prácticas [51]; <i>MERRA-NASA</i> es una buena fuente de conjuntos de datos [35]; utilizado en países con densas redes de observaciones [52]; CFD [49].	(A) Mejora la precisión de la predicción en comparación con el modelo <i>WA_{5P}</i> donde ocurre la separación de flujo o los efectos de estabilidad térmica son importantes en terrenos complejos. El software de modelado de la <i>v_v</i> CFD que se está utilizando hace necesario que los módulos se calibren con los datos capturados de las mediciones en el sitio [44]
Método 6: Modelación del sitio basado en datos.	<i>LINCOM</i> , <i>MS-Micro</i> , <i>CFD</i> , <i>WA_{5P}</i> También se puede usar. Si existe algún tipo de medición en el sitio, ya sea a partir de un cálculo de la campaña a corto plazo MCP o ambos [44].	(A) Está libre de errores de extrapolación (en el caso de datos que no son MCP) y no se requieren datos que no estén en el sitio. (D) Posible falta de representatividad climatológica (en el caso de no MCP) y riesgo de mejorar cualquier error de medición o correlación [44].

Continuación de Tabla 1.2

Métodos	Herramientas / Medios	(V)entajas / (D)esventajas
Método 7: Modelación Mesoscala (MMS).	WRF modelo [53]; WRF-derivado series de tiempo; Karlsruhe Modelo de mesoescala atmosférica KAMM, [51]; Modo de mesoescala Penn State/NCAR de quinta generación MM5; Modelo de comunidad compresible de mesoescala MC2; Análisis retrospectivo de la era moderna para investigación y aplicaciones MERRA [54]. El tamaño de la cuadrícula de los modelos es del orden de unos pocos kilómetros [44].	(A) MSs Los modelos son buenos capturando procesos de mesoescala; (D) La resolución de la cuadrícula de MS es mayor que $5 \delta x$, ($\delta x \cong 1:15 \text{ km}$); no puede describir el efecto topográfico más pequeño que la cuadrícula; no puede resolver explícitamente la turbulencia; confiar en las condiciones iniciales, las condiciones de frontera y, a veces, las observaciones extra locales MERRA MS no puede proporcionar mediciones de velocidad del viento a diferentes alturas en tierra directamente [54]; no puede describir explícitamente los cambios de rugosidad; se necesita un conjunto de mesoescala para diagnosticar la probabilidad de ciertos resultados climáticos [55].
Method 8: Modelación Microescala- Mesoscala combinada.	Mesoescala combinado con microescala KAMM, WA_5P , KAMM/ WA_5P (resolución $\sim 5 \text{ km}$ [44, 56, 57]).	(A) La microescala se complementa con WA_5P , los detalles locales de predicción 5 km se resuelven con WA_5P o WindScape, Raptor o Raptor NL. (D) Se necesitan dos o más aplicaciones de software [44].

La gestión de los resultados de la evaluación del RE es importante. Hay que tener en cuenta que los niveles de detalle y análisis de estos estudios en el SE generalmente aumentan con el tamaño y costo de los GTEs que se vayan a instalar en el PE. Si se trata de un proyecto donde se colocarán GTEs pequeños, el documento del reporte ejecutivo de la evaluación del RE en el SE podría estar basada en una evaluación simplificada utilizando bases de datos o metadatos de bajo nivel de precisión o confiabilidad y posteriormente este podría ir seguido de un análisis eólico más detallado. Este debe ser un análisis y estudio de viabilidad que incluye la recopilación de datos in situ para reducir el riesgo. Generalmente puede ensayarse la producción de energía anual (PEA) utilizando las curvas certificadas de los GTEs (suministradas por los fabricantes) conforme a los Estándares apropiados como el (IEC) 61400-2, ver Tabla ??.

1.4.1 Tratamiento de los Registros, Evaluación y Reporte

El tratamiento de los registros de v_v disponibles debe realizarse de forma sistemática para identificar las fuentes de incertidumbres en los resultados. En realidad la Evaluación del RE en el SE (ERESE) consiste de varias etapas:

1. Selección de la representatividad y alcance de los datos disponibles de entrada, ya sea metadatos para procesar o generar los registros en una campaña de medición que contemple los requerimientos

(documentación) de los *GTE* que se proyecten instalar: Equipo de medición, Altura, localización, históricos de mediciones y series de datos.

2. La selección de variables de entrada que deben ser consideradas comúnmente en la *ERESE*, para las condiciones del viento como: Dirección y velocidad del viento, temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica como mínimo, tal como se realiza en los procedimientos de la red de medición del instituto *MEASNET* [17], el cual es un programa de evaluación de calidad considerado uno de los más completos y aceptados internacionalmente.
3. Los datos se evalúan de acuerdo a la altura elegida en la campaña de medición y se pueden extrapolar a otras alturas según sea requerido.
4. Evaluar la integridad y calidad de los registros contenidos en las bases de datos mediante una revisión y clasificación minuciosa (A-E), checando por datos erróneos, sustitutos, que estén completos, prueba de valor constante, prueba de rango, pruebas de tendencias e inconsistencias, prueba de parámetros relacionados, pruebas de correlación, incluyendo elaboración de graficos de prueba. Debe incluirse en la documentación el número total o porcentaje de datos rechazados, lista de los periodos en que los registros fueron filtrados (por sensor), evaluación de la distribución de los datos filtrados (ej. acumulación estacional), consideraciones de incertidumbres resultantes del filtrado, conclusión sobre la usabilidad o incertidumbre de los datos (por sensor)
5. Proceso de llenado de datos faltantes de algún sensor con registros de otro con pocas diferencias o desviaciones en altura, especificando en la documentación el total o porcentaje de datos llenados, lista de los periodos el cual fueron llenados (por sensor), evaluación de la distribución de datos llenados (ej, acumulación estacional), evaluación de la influencia de los datos llenados sobre las medias y distribuciones de cantidades relevantes, consideraciones de incertidumbres resultantes desde el llenado, conclusiones sobre la usabilidad o incertidumbre de los datos llenados (por sensor).
6. Aplicar en datos concurrentes en tiempo un procedimiento medir-correlacionar-predecir (*MCP*) para la extrapolación de mediciones del *SE* a bases de datos de largo plazo utilizando bases de datos muchos años de medición de otras fuentes para filtrar y validar el valor medio de las mediciones que será mas confiable tomando en cuenta la variación interanual y la variación estacional y logra una media estable de largo plazo en cada variable que es mas confiable para las condiciones de viento en el futuro. Los registros de la base de datos de largo plazo deberá estar libre de errores y verificada con otra similar con un periodo entre 10-30 años.
7. Aplicar un método de modelación espacial aproximada de flujo basada en los datos de velocidad de viento medidos y la descripción orográfica del *SE* incluyendo los alrededores. El modelo debe poder incluir

variaciones como la rugosidad del suelo, vegetación, obstáculos, cambios atmosféricos, estratificación de la temperatura, la dirección del viento, etc.

8. Además se debe calcular la densidad del aire, la turbulencia del viento, exponente de cizalladura del viento, vientos extremos y la inclinación del flujo.

Para una primera aproximación en el proceso de *ERESE* como en el caso de diseñar un *PE* con pequeños *GTEs* o para un estudio preliminar de proyectar un *PE* donde se instalarán *GTEs* de gran tamaño. Existen varios sitios donde obtener series de registros con históricos de largo plazo como en la *NASA – earthdata*, *NCAR*, *UCAR*, entre otros [58]. Estos sitios contienen metadatos producto del preprocesamiento de mediciones de diversos satélites y estaciones de observación diversas que se sintetizan en series de registros presentados de forma resumida de geo-cuadros [59]. Estos resúmenes cuadrangulares son generalmente de uno a cinco grados georeferenciados. Proporcionan el recuento de observación para una "rosa de los vientos" de ocho puntos, sus medias y desviaciones estándar de: velocidad del viento, presión, temperatura del aire, temperatura del bulbo húmedo, temperatura de la superficie del mar-aire. Diferencia de temperatura del mar y altura de las olas [60]. El período general resumido es de 1850 a 1970, pero el período real resumido varía según la cuenca oceánica de donde se requieran los datos. Estos promedios mensuales a largo plazo se utilizaron para producir el Atlas Climático Marino de la Marina de los Estados Unidos.

En conclusión estos registros típicamente son sobre mares y océanos. Hay que extrapolar y contrastar con registros medidos con Estaciones Meteorológicas Automáticas *EMAs* en tierra, que forman parte de una campaña de medición *ad-hoc*, ver Tabla 1.2.1.

1.5 Objetivo General y Específicos

1.5.1 Objetivo general

Estimar y modelar el recurso eólico considerando dos puntos de referencia de la zona costera de Tabasco ([Cuauhtemoctzin](#)).

1.5.2 Objetivos específicos

- Instalar o reconfigurar dos estaciones meteorológicas adicionales a las existentes para el monitoreo de las variables meteorológicas.
- Recuperar información de [SEPEE](#) en los que se mide velocidad y dirección del viento en la zona costera de Tabasco ([Cuauhtemoctzin](#)).
- Realizar modelación de la dinámica de vientos de la zona costera y tierras adentro.

- Realizar estimaciones y validaciones del recurso eólico en la zona de medición.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Capítulo 2

Antecedentes y teoría de la evaluación en energía eólica

En este capítulo se abordan los antecedentes y la teoría para evaluar la energía eólica. En esta parte se introducen las ecuaciones para obtener la potencia disponible contenida de un flujo másico del aire y la aplicación de la Ley de Betz. La fuerza de empuje eólico axial al igual que el análisis cinemático del viento en una TE es deducida. El factor de inducción o frenado del viento, la potencia mecánica máxima de salida de una TE , coeficiente de potencia es demostrada. La potencia mecánica y potencia eléctrica generada es aquí también introducida. Se aborda el cálculo de la rugosidad del suelo y capa límite. Se presenta la ley de potencia y cálculo del índice para obtener el perfil de viento. Se muestra la construcción de rosas de vientos y de forma alternativa se proponen histogramas y diagramas de dispersión de velocidad. También las funciones para distribución de probabilidad y acumulativa son introducidas. Estas son adaptadas para la estimación de la densidad de la potencia eólica y producción anual de energía eólica.

2.1 Potencia de un flujo másico de aire y la ley de Betz

La ley de Betz representa la potencia máxima contenida en un flujo de viento y que puede ser extraído de este para una área determinada de barrido del rotor de un GTE . Esta ley nos permite determinar la potencia máxima que el viento puede entregar a la TE , máquina donde la energía cinética contenida en el viento se convierte en energía mecánica. La energía cinética depende de la cantidad de flujo másico del aire que pasa por la TE y de la velocidad del viento, ver Ec. 2.1.

$$E_c = \frac{1}{2} \dot{m} v_{vi}^2 \quad (2.1)$$

donde \dot{m} : flujo másico del aire, v_{vi} : Velocidad del viento de ingreso a la TE , mientras que la potencia específica disponible de un flujo másico de aire por definición es:

$$P_{disp} = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} q v_{vi}^2 \quad (2.2)$$

donde

P_{disp} : Potencia disponible; el flujo de masa se define como: $q = \frac{dm}{dt} = \dot{m}$, pero también $\dot{m} = \rho A_T v_{vi}$, ρ : densidad del aire y A_T : area transversal de la TE. Esta se sustituye en la Ec. 2.2. Esta representa la potencia específica disponible en un flujo másico de aire, ver Ec. 2.3, Apart. 2.1.1.

2.1.1 Potencia eólica disponible

Mediante el cambio de variable y derivación del flujo másico del aire y dado que el valor de la v_{vi} y de A_T : area transversal del rotor están disponibles, la potencia específica que pasa por A_T como la de un rotor puede calcularse con:

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \rho_{air} A_T v_{vi}^3 \quad (2.3)$$

Para determinar la potencia extraída por una TE ideal de un viento incidente perpendicular al A_T del rotor de la TE viene dada por la ecuación de potencia específica disponible, ver Ec. 2.3.

2.1.2 Ley de Betz

Generalmente se usa un modelo simplificado desarrollado por Albert Betz [61]. Bajo la premisa que mientras mayor sea la E_c del viento que la TE consiga extraer de la v_{vi} , menor será la velocidad v_{vo} de la salida de la TE. El viento se desacelera, de manera que la v_{vo} estará comprendida entre cero y el valor de v_{vi} . La teoría que sustenta la ley de Betz se basa en las siguientes hipótesis:

1. La masa de aire que fluye a través del rotor de la TE permanece separada de la masa que lo rodea (tubo de flujo), ver Fig. 2.1;
2. La masa de aire fluye solo en dirección longitudinal;
3. La desaceleración del aire en el rotor de la TE se distribuye uniformemente en toda la sección del rotor;
4. En las secciones suficientemente lejanas a la entrada y a la salida de la TE la presión es igual a la atmosférica;
5. Aparte de la TE, el flujo eólico no encuentra obstáculos ni en la entrada ni en la salida;
6. El viento es estacionario y su intensidad permanece constante con la altura;
7. No se producen efectos rotativos sobre la masa de aire;

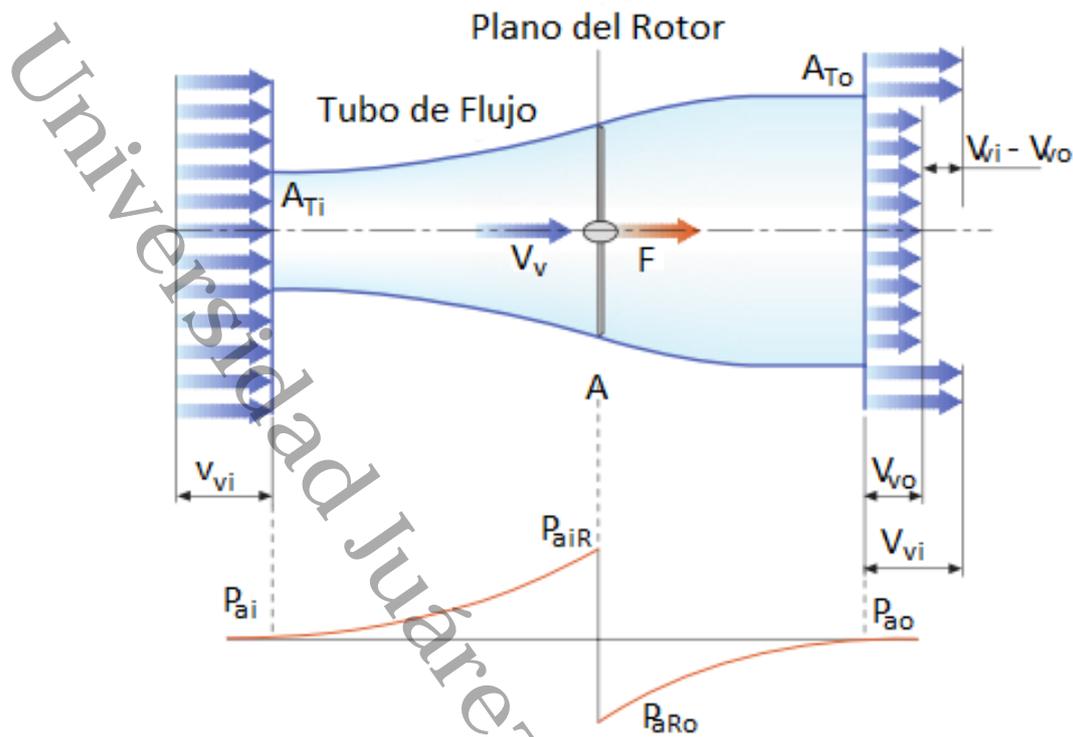


FIGURA 2.1: Efecto del viento sobre el rotor de la TE Adaptado desde [62].

8. Se desprecia la compresibilidad del aire, es decir, la densidad se considera constante;
9. El conjunto de las palas de la TE equivale a un "disco poroso" de espesor nulo – disco actuador con un número infinito de palas, ver Fig. 2.1.
10. A la presión P_{ai} y v_{vi} en la sección transversal A_{Ti} a la entrada del tubo de flujo, está suficientemente alejada de la TE;
11. P_{ao} y v_{vo} a la presión y a la velocidad del viento en la sección A_{To} a la salida del tubo de flujo, suficientemente alejada de la TE;
12. A las presiones P_{aiR} y P_{aRo} inmediatamente antes y después de la sección A_{TR} del rotor de la TE;
13. A la v_v en el plano del rotor en la hipótesis de que no haya variación de energía potencial ni intercambio de calor o extracción de trabajo entre A_{Ti} y A_{TR} .

Si no hay variación de energía potencial ni intercambio calorífico se puede reformular la ecuación de potencia específica máxima en forma mecánica empleando las hipótesis de Betz y la ecuación de Bernoulli en un tubo de control, tomando como referencia las variables indicadas en la figura 2.1 se expresan como sigue:

$$P_{ai} + \rho_{air} \frac{v_{vi}^2}{2} = P_{aiR} + \rho_{air} \frac{v_v^2}{2} \quad (2.4)$$

Igualmente aplicando Bernoulli entre A_{TR} y A_{To} :

$$P_{aRo} + \rho_{air} \frac{v_v^2}{2} = P_{ao} + \rho_{air} \frac{v_{vo}^2}{2} \quad (2.5)$$

El cambio de presión en el rotor de la TE se puede deducir desde las Ecs. 2.4 y 2.5 como sigue:

$$\Delta P = P_{aiR} - P_{aRo} = \rho_{air} \frac{v_{vi}^2 - v_{vo}^2}{2} \quad (2.6)$$

2.1.2.1 Fuerza de empuje eólico axial

A partir de la Ec. 2.6 podemos deducir la fuerza que ejerce el viento sobre el eje del rotor de la TE en la dirección del viento como sigue:

$$F = \Delta P A = \rho_{air} A \frac{v_{vi}^2 - v_{vo}^2}{2} \quad (2.7)$$

Empleando el teorema de flujo de aire y de cantidad de movimiento desde las Ecs. 2.3 y 2.7, esta fuerza es igual a la variación de la cantidad de movimiento del flujo de aire

$$F = F_{aiR} - F_{aRo} = \dot{m} (v_{vi} - v_{vo}) \quad (2.8)$$

De este modo se tiene la fuerza de empuje eólico de modo explícito en términos de variables medidas en una campaña de *ERESE*

$$F = \rho_{air} A v_v (v_{vi} - v_{vo}) \quad (2.9)$$

2.1.2.2 Análisis cinemático del viento en la turbina eólica

El valor de la v_v que hace contacto instantáneo con el rotor de la TE e impulsa sus palas se puede obtener igualando las Ecs. 2.7 y 2.9:

$$v_v = \frac{1}{2} (v_{vi} + v_{vo}) \quad (2.10)$$

La desaceleración del viento se reparte a medias en el tramo de entrada y el tramo de salida como se indica en la Ec. 2.10. Esta es la v_v que contiene la P_{eolica} y EE para ser convertida en energía mecánica (EM) al pasar a través de una TE . Esta conversión de energía se refleja en un frenado del viento que

ingresa por el frente de la TE y se puede medir a la salida de la TE como v_{v0} . La desaceleración del viento es un indicador de conversión y aprovechamiento de la EE .

2.1.2.3 Factor de inducción o frenado del viento

La disminución que la v_{vi} sufre al alcanzar el plano del rotor y convertirse en v_v , ver Fig. 2.1, se representa con a : factor de inducción y puede expresarse como:

$$a = \frac{v_{vi} - v_v}{v_{vi}} = 1 - \frac{v_v}{v_{vi}} \quad (2.11)$$

La v_v en el plano del rotor de la TE es posible calcularla desde la Ec. 2.11 si se conoce el valor de la v_{vi} y el valor del a de la siguiente forma:

$$v_v = v_{vi} - a v_{vi} = (1 - a) v_{vi} \quad (2.12)$$

Incluso a permite calcular el valor de v_{v0} en la salida del rotor de la TE en términos del valor de a y del valor de v_{vi} despejando desde la Ec. 2.10 resulta en la velocidad del viento en la salida, ver Fig. 2.1 y Ec. 2.13

$$v_{v0} = 2 v_v - v_{vi} = 2(1 - a) v_{vi} - v_{vi} = (1 - 2a) v_{vi} \quad (2.13)$$

2.1.2.4 Potencia mecánica máxima de salida en una turbina eólica

La potencia mecánica disponible en el eje del rotor de la TE y captado desde sus palas puede expresarse como:

$$P_{mec} = F v_v = (\rho_{air} A v_v (v_{vi} - v_{v0})) v_v \quad (2.14)$$

Sustituyendo el valor de la v_v por su equivalente desde la Ec. 2.10 se obtiene también la $P_{mec} = F v_v = (\rho_{air} A \frac{(v_{vi} + v_{v0})}{2} (v_{vi} - v_{v0})) \frac{(v_{vi} + v_{v0})}{2}$ resultando en:

$$P_{mec} = F v_v = \left(\rho_{air} A \frac{v_{vi} + v_{v0}}{2} \right) \left(\frac{v_{vi}^2 - v_{v0}^2}{2} \right) \quad (2.15)$$

La potencia mecánica se puede expresar también en términos del factor a sustituyendo y simplificando desde las Ecs. 2.12 y 2.13 de la velocidad en el plano del rotor de la TE y de la salida, quedando como sigue:

$$P_{mec} = 2 \rho_{air} A v_{vi}^3 a(1 - a)^2 \quad (2.16)$$

Esta potencia mecánica expresada en términos de la fuerza de empuje del viento y la velocidad del viento v_v en el plano del rotor del TE o de su

factor a debe tener un máximo que puede obtenerse al derivar la Ec. 2.16 e igualando ésta a cero como sigue: $\frac{\partial P_{mec}}{\partial a} = \frac{\partial}{\partial a} (2 \rho_{air} A v_{vi}^3 (a - 2a^2 + a^3)) = 0$; reacomodando en $\frac{\partial P_{mec}}{\partial a} = \frac{\partial}{\partial a} (a - 2a^2 + a^3) = 0$; entonces $\frac{\partial P_{mec}}{\partial a} = 1 - 4a + 3a^2 = 0$, que resulta en una función de segundo grado y tiene dos soluciones cuyos valores son $a = 1$ y $a = 0.3333 = 1/3$, valores dentro de los cuales está el máximo requerido para obtener la P_{max} .

Resulta intuitivo identificar desde la Ec. 2.13 y de la premisa inicial de la ley de Betz se comprueba que para $a = \frac{1}{3}$ el valor de la $v_{vo} = 0.3333 v_{vi}$ mientras que cuando $a = 1$ el valor de la $v_{vo} = -v_{vi}$ lo que resulta en un cambio de signo que implica un retroceso o rebote.

En conclusión el valor óptimo de $a = \frac{1}{3}$, el cual verifica la hipótesis de Betz de ser el valor óptimo de a para el cual existe una $P_{mec} = máxima$ que implica que la velocidad de entrada v_{vi} experimenta un frenado de $\frac{2}{3}$ de su magnitud debido a la conversión de su energía cinética en energía mecánica al pasar por el rotor de la TE, ver Ec. 2.13 cuya potencia mecánica máxima resulta en:

$$P_{mec(max)} = \frac{8}{27} \rho_{air} A v_{vi}^3 \quad (2.17)$$

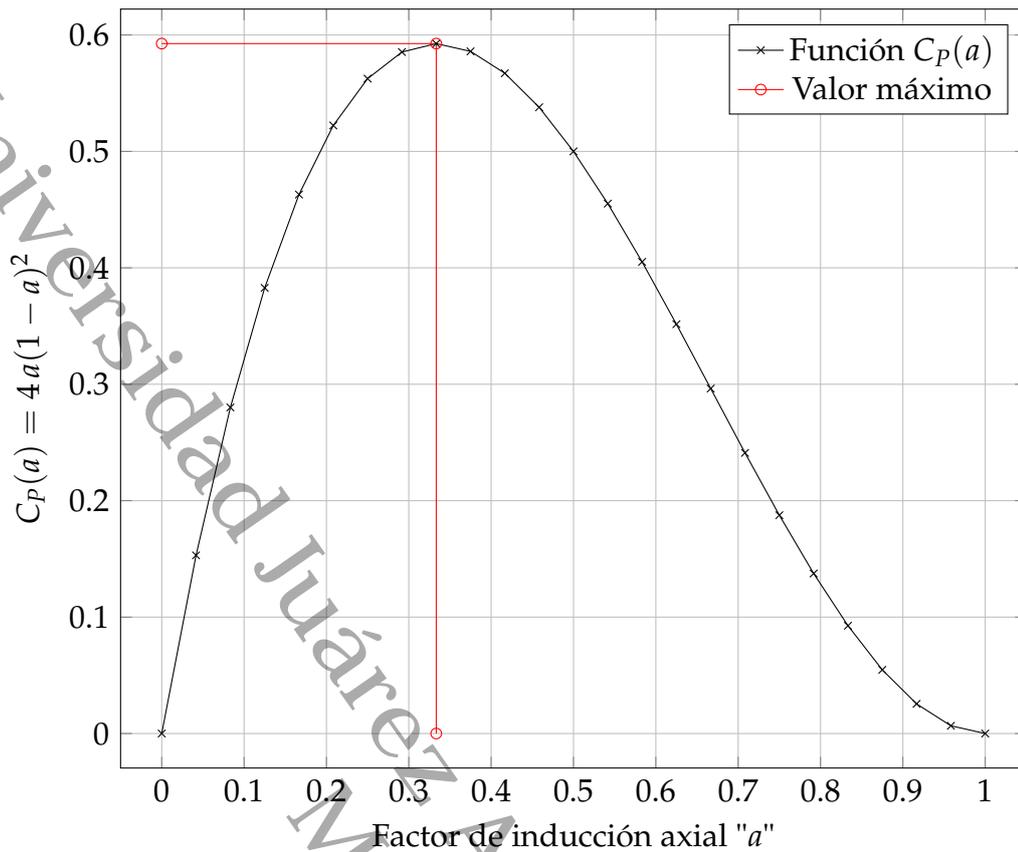
2.1.2.5 Coeficiente de potencia

El Coeficiente de potencia en el proceso de conversión de energía cinética del viento a energía mecánica en la flecha de la TE se define como la relación entre la potencia mecánica en la flecha de la TE a la potencia cinética disponible en el viento entre de la TE como sigue:

$$C_p(a) = \frac{P_{mec}}{P_{disp}} = \frac{2 \rho_{air} A v_{vi}^3 a (1 - a)^2}{\frac{1}{2} \rho_{air} A_T v_{vi}^3} = 4a(1 - a)^2 \quad (2.18)$$

Para un valor óptimo del coeficiente de inducción axial, $a = \frac{1}{3}$ sustituyendo en la Ec. 2.18 se obtiene que $C_p(a) = 0.5926$, valor que se conoce como el límite de Betz, su comportamiento se puede observar en la Fig. 2.2.

De este modo la P_{max} extraída del viento se logra cuando $C_p(a) = 0.59$. Esto se logra cuando la relación entre las v_v pasando a través del disco del rotor de la TE y el de entrada al tubo de control del flujo de aire v_{vi} es máximo, ver Fig. 2.1. Aquí el coeficiente de inducción axial registra un valor $a = \frac{1}{3}$, como se muestra con la línea color rojo en la Fig. 2.2. Los valores típicos de $C_p(a)$ en las TE comerciales de eje horizontal oscila entre 0.35 – 0.45, por lo que el rango de valores de "a" están entre 0.1 – 0.15. Esto implica menor frenado del viento desde el punto de entrada del tubo imaginario del flujo másico de aire hasta el punto donde esta masa de aire hace contacto con las palas del rotor, ver Ec. 2.11.

FIGURA 2.2: Coeficiente de Potencia $C_p(a)$.

2.1.2.6 Potencia mecánica y potencia eléctrica generada

La P_{mec} disponible en el eje de la TE puede expresarse empleando las Ecs. 2.18 y 2.3 como sigue:

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho_{air} A v_{vi}^3 C_p(a) \quad (2.19)$$

Entre la TE y el generador eléctrico está la caja de engranaje y transmisión de la TE para multiplicar las revoluciones. Esto para entregar una potencia mecánica a la velocidad angular y torque requeridos por el generador eléctrico del GTE . Esta transmisión tiene un rendimiento mecánico η_{mec} , por lo que, una TE comercial deberá incluir este factor quedando la potencia mecánica en la entrada del generador como sigue:

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho_{air} A v_{vi}^3 C_p(a) \eta_{mec} \quad (2.20)$$

La potencia eléctrica generada y entregada por GTE a la carga eléctrica, el bus eléctrico o la subestación eléctrica de un PE se puede expresar en términos del rendimiento eléctrico del generador η_{elect} que por lo regular tienen valores altos hoy día, la ecuación final con aplicación práctica puede expresarse como:

$$P_{elect} = \frac{1}{2} \rho_{air} A v_{vi}^3 C_{p(a)} \eta_{mec} \eta_{elect} \quad (2.21)$$

Los valores de los rendimientos de las transmisiones típicamente se encuentran en el rango de 97% – 99.5%, igualmente el rendimiento de los generadores eléctricos tienen un rango de eficiencia de 86% – 98% para un rango de potencia desarrollada 0.2 – 1.0 p.u.. En general el valor de η_{elect} depende del factor de carga alimentada y su factor de potencia equivalente.

2.1.3 Rugosidad del suelo y capa límite

La rugosidad del suelo se clasifica en términos de una longitud o altura equivalente asociada al tipo de uso de suelo, obstáculos y el efecto de los contornos del terreno u orografía circundante. Los edificios o construcciones altas, arboles altos entre otros reducen la velocidad del viento en mayor medida que pastizales, carreteras, autopistas, lagos, mares. etc. Todos los obstáculos que estén en un radio de 10 km tendrán efectos negativos sobre la v_v y el aprovechamiento de la *EE* del sitio donde se este midiendo.

Conociendo el promedio de la v_v , dirección del viento (d_v) entre otras variables meteorológicas es posible hacer evaluaciones y modelaciones eólicas. Estos promedios deben ser tomados desde el informe de una campaña de medición de un *SE*. Deben ser modelados con una función de distribución o densidad de probabilidades (*PDF : Probability Density Function*) con Weibull o equivalente. Los registros deben ser medidos para una altura dada donde el buje del *GTE* seleccionado se instalará. Se debe utilizar la curva nominal de producción de energía del modelo de *GTE* seleccionado. Con estos elementos es posible hacer una estimación del potencial de la *EE* disponible en el lugar. Con los resultados de la campaña de *ERESE* y la Ec. 2.21 se pueden realizar las primeras estimaciones financieras que den origen a la consolidación de los fondos para la construcción de un *PE*.

La variación de la v_v por efecto de la rugosidad del suelo obliga a realizar las estimaciones del valor que esta representa. Esto es porque la altura efectiva del buje del *GTE* que se propone instalar normalmente es diferente de las alturas típicas de las *EA* con registros anemométricos históricos. Es importante definir las características de la variación de la v_v según la altura sobre el suelo. También la fricción entre el aire y el terreno provoca un perfil de v_v en función de la altura, conocido también como capa límite. Los cambios de superficies menos rugosas a superficies rugosas imprimen un fennado en la v_v y el cambio de superficie rugosa a lisa producirá una aceleración de la v_v . Dependiendo de la distancia y dirección de estos cambios respecto al *SE* el perfil de la v_v sufrirá modificaciones. Si la v_v no logra estabilizarse antes de llegar al punto donde hará contacto con las palas del rotor de la *TE* es muy probable que esta tenga un comportamiento turbulento que es crítico para el aprovechamiento de la *EE*.

Si algún cambio ocurre posteriormente a la instalación de un *GTE* es necesario relizar las estimaciones necesarias para calcular el impacto de estas en el aprovechamiento del *RE*. Entonces debe haber en algún momento una referencia mediante una rosa de rugosidad del terreno, recomendada esta recientemente por la comunidad eólica.

TABLA 2.1: Clases de rugosidad y la longitud de la rugosidad equivalente.

Clase de Rugosidad (<i>CR</i>)	Longitud de Rugosidad [<i>m</i>]	Índice de Energía [%]	Escenario o Paisaje en la dirección que se evalúa
0	0.0002	100	Superficies de agua sin oleaje.
0.5	0.0024	73	Terreno completamente abierto con una superficie suave como: autopistas de concreto, pistas de aterrizaje, pasto podado.
1	0.03	52	Áreas abiertas de agricultura sin cercas y setos, edificios dispersos y únicamente lomas suaves.
1.5	0.055	45	Tierra agrícola con algunas casas y cercas, con altura de hasta 8 <i>m</i> de altura a una distancia aproximada 1,250 <i>m</i> del <i>GTE</i> .
2	0.1	39	Tierra agrícola con algunas casas y cercas, con altura de hasta 8 <i>m</i> de alto a una distancia aproximada 500 <i>m</i> del <i>GTE</i> .
2.5	0.2	31	Tierra agrícola con algunas casas y cercas, con altura de hasta 8 <i>m</i> de alto a una distancia aproximada 250 <i>m</i> del <i>GTE</i> .
3	0.4	24	Villas, pequeños pueblos, tierra agrícola, o vallas altas, vegetación y terrenos muy accidentados y desigual.
3.5	0.8	18	Ciudades grandes con edificios altos.
4	1.6	13	Ciudades grandes con edificios altos y rascacielos.

La Tabla 2.1 es auxiliar para una primera aproximación de la u_0 en una altura deseada utilizando el valor de la longitud de rugosidad. La selección se hace a partir de la observación del lugar en cualquier dirección cardinal identificando el paisaje, orografía y obstáculos presentes. Si los obstáculos son mas grandes alrededor de la *TE* el índice de energía disponible y aprovechable se reduce inversamente con el tamaño del obstáculo. Esta limitación ocurre en la dirección del viento visto desde el punto específico donde se proyecta

instalar un *GTE* o un *PE*. Para efectos de prospección o evaluación eólica el método consiste en:

1. Extraer la media de la v_v de las mediciones en el *SE* a una altura determinada o de referencia, incluyendo su dirección y de su *PDF*.
2. Seleccionar el valor de la longitud de rugosidad del sitio en la dirección que sirvió de referencia.
3. Aplicar la Ecu. 2.22 para un valor de altura z deseado.

La Ecu. 2.22 asume condiciones de estabilidad neutrales en las que no existe ni calentamiento o enfriamiento del suelo comparado al aire en movimiento.

$$v_v(z) = v_{ref} \left[\frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{z_{ref}}{z_0}} \right] \quad (2.22)$$

Donde

$v_v(z)$: valor de la velocidad del viento a la altura deseada; v_{ref} y z_{ref} : velocidad del viento y altura de referencia de las mediciones descitas en el punto 1 del método; z_0 : longitud de rugosidad extraída de la Tabla 1.2.

El valor de la *CR* se puede estimar utilizando el grupo de Ecs. 2.23.

$$\begin{aligned} CR &= 1.699832015 + \frac{\ln z_0}{\ln 150}, & \text{Si } z_0 \leq 0.03 \\ CR &= 3.912489289 + \frac{\ln z_0}{\ln 3.3333}, & \text{Si } z_0 > 0.03 \end{aligned} \quad (2.23)$$

La elección de la Ecuación apropiada para calcular la *CR* más próxima a la real es crucial porque a partir de este cálculo uno puede obtener el valor más apropiado de la longitud de la rugosidad haciendo una interpolación desde los valores más próximos extraídos de la Tabla 2.1, ver Apartado 2.1.5

2.1.4 Ley de potencias y calculo del índice

Las diferencias en las alturas y posiciones de las *EAs* disponibles en los alrededores de un *SEPEE* es una fuente de incertidumbres. Las diferencias en las configuraciones de la orografía del terreno y las diferencias entre los registros disponibles para realizar una *ERESE* obliga a realizar algunas verificaciones. Para explorar con un enfoque rápido el *RE*, es común usar a priori un modelo eólico. Aunque estos modelos presentan un cierto grado de

incertidumbre (consulte Folklore y métodos de medición 1 y 2 descritos en la Tabla 1.2), siempre debe corroborarse o compararse con modelos tales como: Weibull, Rayleigh u otros, utilizando los registros disponibles. La ecuación de la ley de potencias presenta incertidumbres en la vecindad del suelo hasta 200 m de altura.

$$\frac{v_{v(z)}}{v_{v_0}} = \left[\frac{z}{z_0} \right]^\alpha \quad (2.24)$$

Donde

$v_{v(z)}$: velocidad del viento a la altura z deseada, v_{v_0} : velocidad del viento de referencia o cota cero, z : altura de deseada, z_{v_0} : altura de referencia o cota cero.

La Ec. 2.24 además de no contemplar la influencia de la rugosidad y uso del suelo tiene la particularidad de temporalidad. La Ec. 2.24 es válida para un día en promedio pues presenta diferencias de un mes a otro o de una estación a otra durante el año debido al cambio de condiciones climáticas que no estan contempladas en ella.

Como ejemplo el cambio en la p_a o en la temperatura del aire t_a entre otros, para ellos algunos investigadores como en [63] han reportado ajustes para su cálculo en un SE. También puede utilizarse la versión extendida de la ley de potencia [64], ver Apéndice A para detalles del desarrollo de la Ec. 2.26, esta representa la versión extendida de la Ley de potencias de velocidad del viento.

$$\left(\frac{z_{v_0}}{z} \right)^\alpha = \left(\frac{\overline{v_{v_0}}}{\overline{v_{v(z)}}} \right) \left(1 - \frac{S_{v_0} S_{v_{v(z)}}}{\overline{v_0} \overline{v_{v(z)}}} r_{v_{v_0} v_{v(z)}} + \frac{S_{v_{v_0}}^2}{\overline{v_{v(z)}}^2} \right) \quad (2.25)$$

Donde

S_{v_0} : desviación estándar de la velocidad del viento de referencia o cota cero, $S_{v_{v(z)}}$: desviación estándar de la velocidad del viento en la altura deseada, $r_{v_{v_0} v_{v(z)}}$: coeficiente de correlación entre las velocidades, v_{v_0} : velocidad de referencia y $v_{v(z)}$: velocidad a la altura deseada.

Por definición el coeficiente de variación de la velocidad del viento $C_{v_{v_0}}$ es la relación de la desviación estándar de la velocidad del viento S_{v_0} a la media aritmética de su respectiva velocidad del viento $\overline{v_0}$.

$$\left(\frac{z_{v_0}}{z}\right)^\alpha = \left(\frac{\overline{v_{v_0}}}{\overline{v_{v(z)}}}\right) \left(1 - C_{v_{v_0}} C_{v_{v(z)}} r_{v_{v_0} v_{v(z)}} + C_{v_{v(z)}}^2\right) \quad (2.26)$$

Para calcular estos coeficientes es necesario utilizar la función de densidad de probabilidad (PDF):

$$p(v_v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v_v}{c}\right)^{k-1} \exp^{-\left(\frac{v_v}{c}\right)^k} \quad (2.27)$$

Donde

$p(v_v)$: probabilidad de v_v ; c : parámetro Weibull de escala en unidades [m s^{-1}] y k : parámetro Weibull de forma adimensional [-]. Desde los parámetros obtenidos desde el modelo de Weibull ó función de la densidad de probabilidades de Weibull podemos establecer las siguientes ecuaciones:

$$E(v_v) = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (2.28)$$

$$\text{Var}(v_v) = c^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right] \quad (2.29)$$

$$E(v_v^m) = c^m \Gamma\left(1 + \frac{m}{k}\right) \quad (2.30)$$

Donde

$E(v_v)$: expectativa de la v_v a la altura que se midió; $\text{Var}(v_v)$: varianza de v_v del punto medido, $E(v_v^m)$: momento de orden m^{th} de la v_v ; Γ : función Gamma.

Desde la Ec. 2.27, se obtienen las Ecs. 2.28, 2.29 y 2.30. Por definición la relación entre expectativa (Ec. 2.28) y la varianza (Ec. 2.29) de la v_v permite calcular los parámetros del coeficiente de variación expresados en la Ec. 2.26. Esta quedó establecida como ley extendida de potencias [64]. Esta se aplica para cada una de las alturas, explícitamente usando los valores de v_v en las Ec. 2.31 para la altura deseada y la Ec. 2.32 para la altura de referencia respectivamente:

$$C_{v_{v(z)}} = \sqrt{\frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} - 1} \quad (2.31)$$

$$C_{v_{v_0}} = \sqrt{\frac{\Gamma(1 + \frac{2}{k})}{\Gamma^2(1 + \frac{1}{k})}} - 1 \quad (2.32)$$

Donde:

$C_{v_{v(z)}}$: coeficiente de variación de la v_v en la altura de z ; $C_{v_{v_0}}$: coeficiente de variación de la v_v a la altura de referencia.

$$k = \frac{1}{C_{v_{v(ref,z)}}^{1.086}} \quad (2.33)$$

$$c = \frac{\bar{v}_v}{\Gamma(1 + \frac{1}{k})} \quad (2.34)$$

Sustituyendo las Ecs. 2.33 y 2.34 en la Ec. 2.26 se obtiene la Ec. 2.35.

$$\left(\frac{z_{v_0}}{z}\right)^\alpha = \left(\frac{c_0}{c_1}\right) \left(1 - r_{01} (k_0 k_1)^{-0.921} + k_1^{-1.841}\right) \quad (2.35)$$

Aplicando logaritmos de ambos lados de la Ec. 2.35 se obtiene la Ec. 2.36

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{c_0}{c_1}\right) + \ln\left(1 - r_{01} (k_0 k_1)^{-0.921} + k_1^{-1.841}\right)}{\ln\left(\frac{z_0}{z_1}\right)} \quad (2.36)$$

Donde:

c_0 : parámetro Weibull de escala para el modelo a la altura de referencia obtenido de las mediciones; c_1 : parámetro Weibull de escala para el modelo a la altura requerida por extrapolación; r_{01} : Coeficiente de correlación cruzada entre los valores de los registros \bar{v}_{v_0} , \bar{v}_{v_1} medidos y estimados; $k_0 k_1$: parámetros Weibull de forma en las alturas de referencia y extrapolada respectivamente [65].

2.1.5 Perfil del viento

El uso de suelo y la orografía de los alrededores del SEPEE tiene asociado un valor diferente de la z_0 y esta a su vez le da un desarrollo distinto al perfil de vientos del SE obtenido a partir de esta longitud en [m], una $v_{v,ref}$ en [$m s^{-1}$] y la altura z_{ref} en [m] a la que esta se midió y comprobó previamente.

En la Fig. 2.3 se observan las formas típicas de las curvas de los perfiles de viento en función del usos del suelo. También de la Tabla 2.1 se observa que

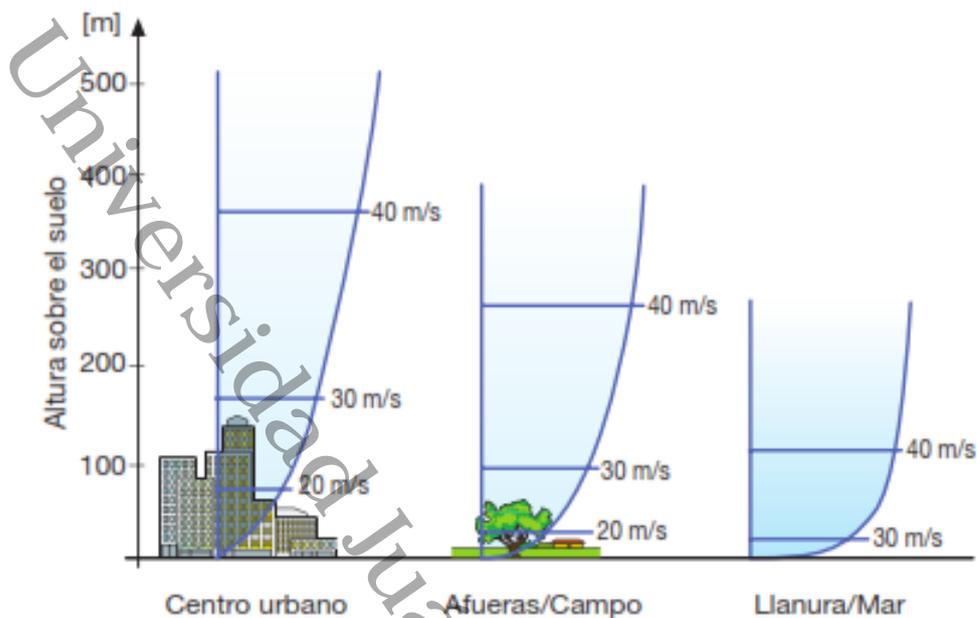


FIGURA 2.3: Efecto de la rugosidad del suelo sobre el perfil de viento local.

para llanuras o cuerpos de agua o mares la $z_0 = 2 \times 10^{-4}$ m mientras que para tierra agrícola su valor tiene un rango de $z_0 = 0.03 - 0.4$ m dependiendo de la densidad de obstáculos o la distancia de estos al *SEPEE*.

Observando la Fig. 2.3 los perfiles cambian notoriamente teniendo la menor variación el perfil de vientos sobre mares.

Esto hace por ejemplo que no sea muy necesario colocar *GTEs* de mucha altura pues la tasa de incremento de v_v respecto al incremento de altura es pequeño. Aplicando la Ec. 2.22 se puede obtener un perfil o varios de ellos para una $v_{v,ref} = 2.50 \text{ m s}^{-1}$ y una altura $z_{ref} = 10$ m de referencia.

Por ejemplo para una $z_0 = 0.80$ m se logra un perfil que se muestra en la Fig. 2.4. Aquí vemos que para 10 m este perfil nos permite extrapolar a 150 m el valor de la $v_v = 5.20 \text{ m s}^{-1}$. Este valor corresponde a la altura típica de una *TE* hoy día. Usando los valores de z_0 en la Tabla 2.1 y la Ec. 2.22 con lo obtenido con la Ec. 2.24 permite hacer comparaciones de aplicabilidad.

2.2 Rosa de vientos

La rosa de vientos es un histogramas circular que agrupa los registros de velocidad del viento por dirección de ocurrencia, típicamente este puede ser de 12 sectores (30°) o 16 sectores (22.5°). En cada uno de estos sectores se encuentran agrupados en porcentajes de frecuencia de todas las magnitudes

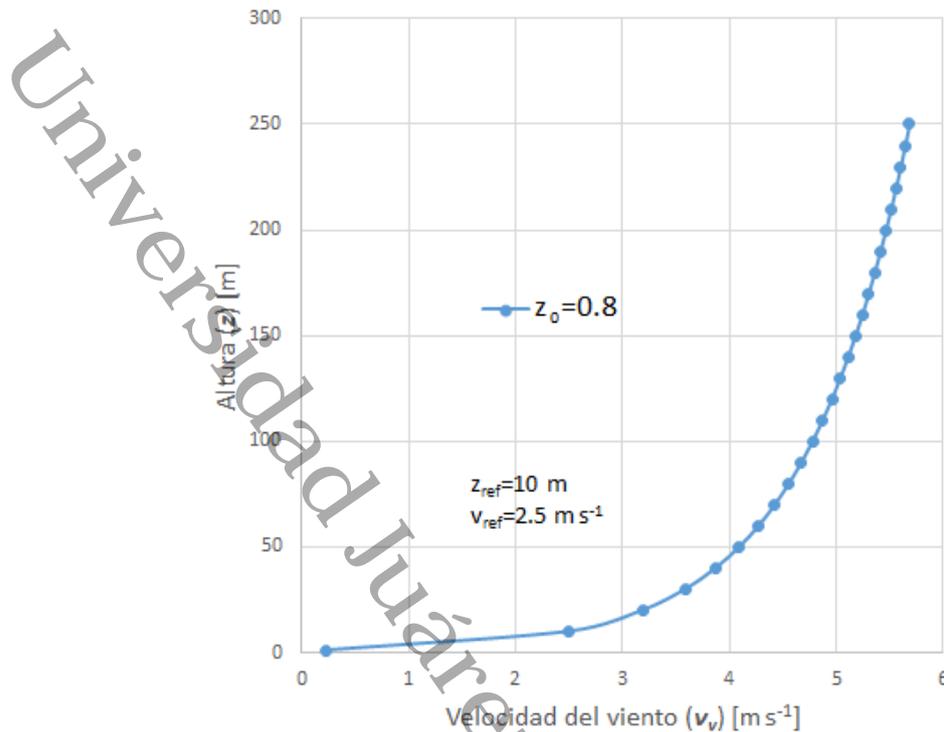


FIGURA 2.4: Perfil del viento de acuerdo a la rugosidad del suelo con viento local.

de v_v . Estas rosas de vientos pueden hacerse por día, semana, mes o año. Existen diversas herramientas para construir estas rosas de viento pero el punto fundamental empieza con la verificación del cero de la veleta. Este cero es importante porque existen al menos dos modos de hacer la construcción de este gráfico:

1. En el sentido horario poniendo el cero en la dirección "Norte" y con una ranura de (5°) entre el (0°) y (360°)
2. En el sentido anti horario, el cero se encuentra en la dirección "Este" con una ranura de (5°) entre el (0°) y (360°).

Desde la instalación de la EA y sus sensores debe anotarse y controlarse esta posición en la instalación del anemómetro. También, debe cuidarse el efecto del mastil o torre de la EA de [17].

2.2.1 Rosa de viento anual

Para elaborar una rosa de vientos es necesario tener la información de configuración y características de la veleta desde la instalación sobre el brazo instalado en la EA. La instalación puede ser ubicando este en la dirección antihoraria colocando la *ranura* que establece el mínimo y el máximo en

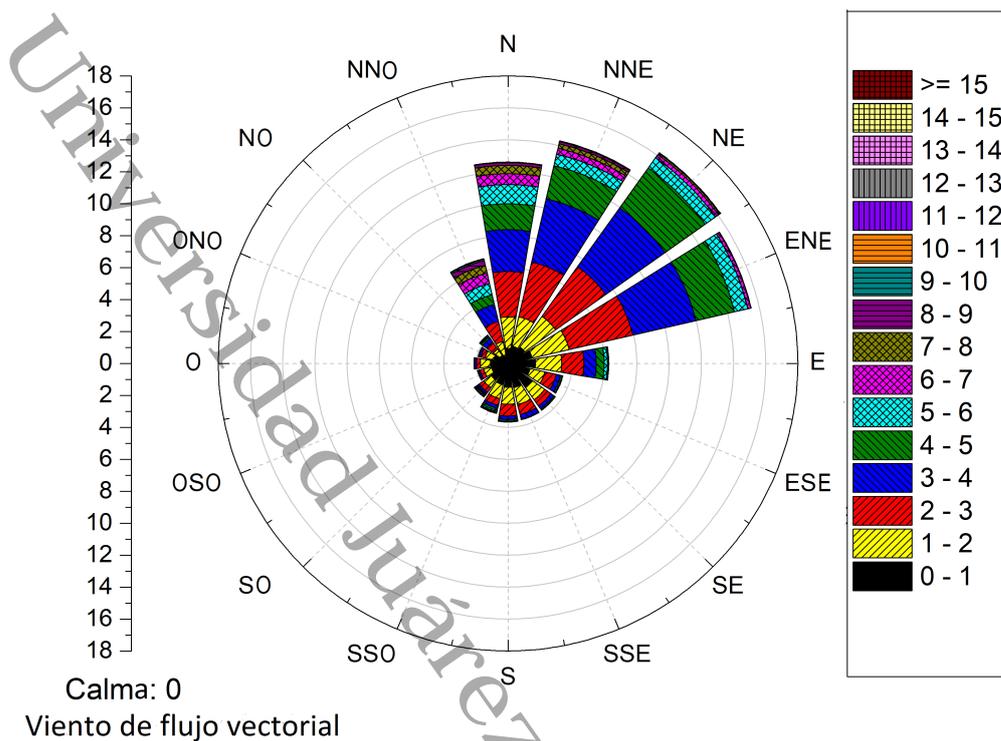


FIGURA 2.5: Rosa de vientos del año 2016 de la Estación Automática Cuauhtemotzin II.

la dirección *este*. Otra es ubicando esta ranura en la dirección *norte* y su recorrido del mínimo al máximo valor de registro en el sentido horario. Esto es importante porque es una fuente de errores en la evaluación del *RE* y el diseño del *PE*. La Fig 2.5 muestra una rosa de vientos anual. En cada barra se muestran tanto la dirección del viento como las clases de velocidad de viento en cada dirección. Para efectos de visualización este tipo de gráficos es efectivo, pero no permite hacer una evaluación del *RE* con la información contenida en el.

2.2.2 Rosa de vientos Mensual

Las rosas de viento mensual permiten establecer las diferencias que pueden haber de mes a mes en cuanto a la dirección e intensidad de la velocidad de los vientos. De esta forma es posible decidir los días o meses de mantenimientos mayores sobre los *GTE* sin la interferencia del viento. La Fig 2.6 es una rosa de vientos mensual y muestra en porcentajes el contenido de registros por clase de viento además de la direcciones del viento

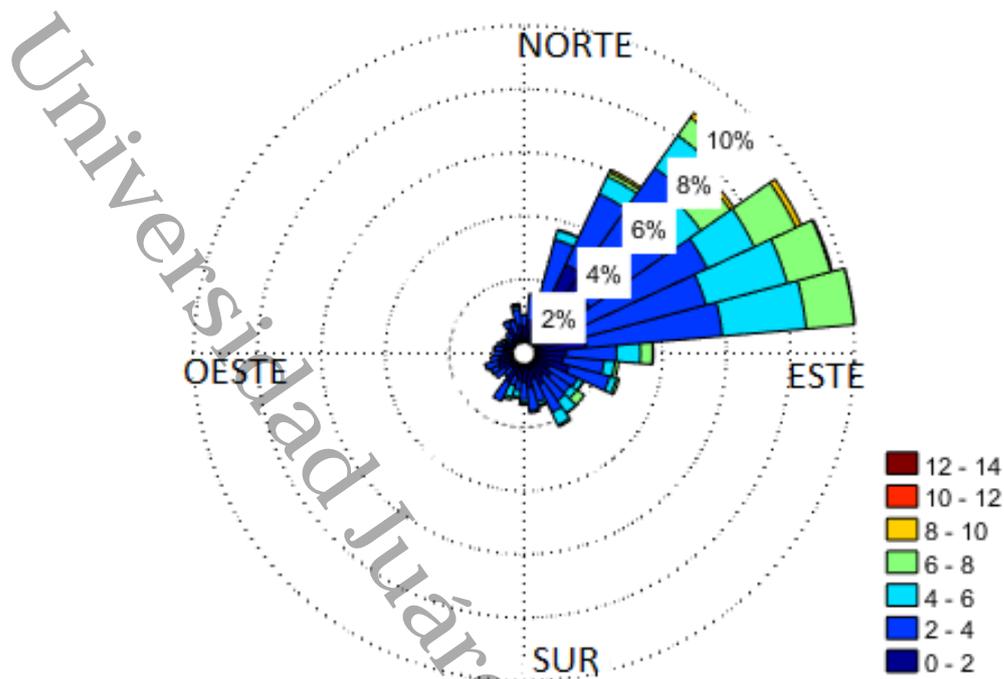


FIGURA 2.6: Rosa de vientos del mes de Agosto de 2017 de la Estación Automática Cuauhtemotzin II.

2.3 Histogramas y diagramas de dispersión de velocidad

Los histogramas de v_v son muy útiles porque muestran la distribución de las velocidades de viento desde la velocidad mínima de viento ($v_{v,min}$) a la velocidad máxima de viento ($v_{v,max}$). La $v_v(min)$ podría considerarse cero en la mayoría de los casos. Siendo específicos con el "término viento" este solo existe cuando una masa o volumen de aire está en movimiento. El viento puede definirse como "el movimiento natural perceptible del aire, especialmente en forma de una corriente de aire que sopla desde una dirección particular". Los registros de $v_v = 0$ indican calma y los registros $0 < v_v < v_{v,min}$ son los que pueden medirse con un instrumento de acuerdo a la precisión y sensibilidad del anemómetro. Los histogramas se representan por subclases de viento en series más pequeñas que la base de datos. El analista o usuario decide cuantas subclases o latas (bines). La norma IEC 61400-12-1 marca que se hagan latas cada 0.50 m s^{-1} . esta sub clasificación puede hacerse con cualquier otro número para representación grafica mientras no sea para efectos de cumplimiento de conformidad con dicha norma.

La Fig. 2.7 muestra una sub clasificación de 1 m s^{-1} . El valor de esta sub clasificación puede hacer variar el perfil del histograma. Este histograma es de

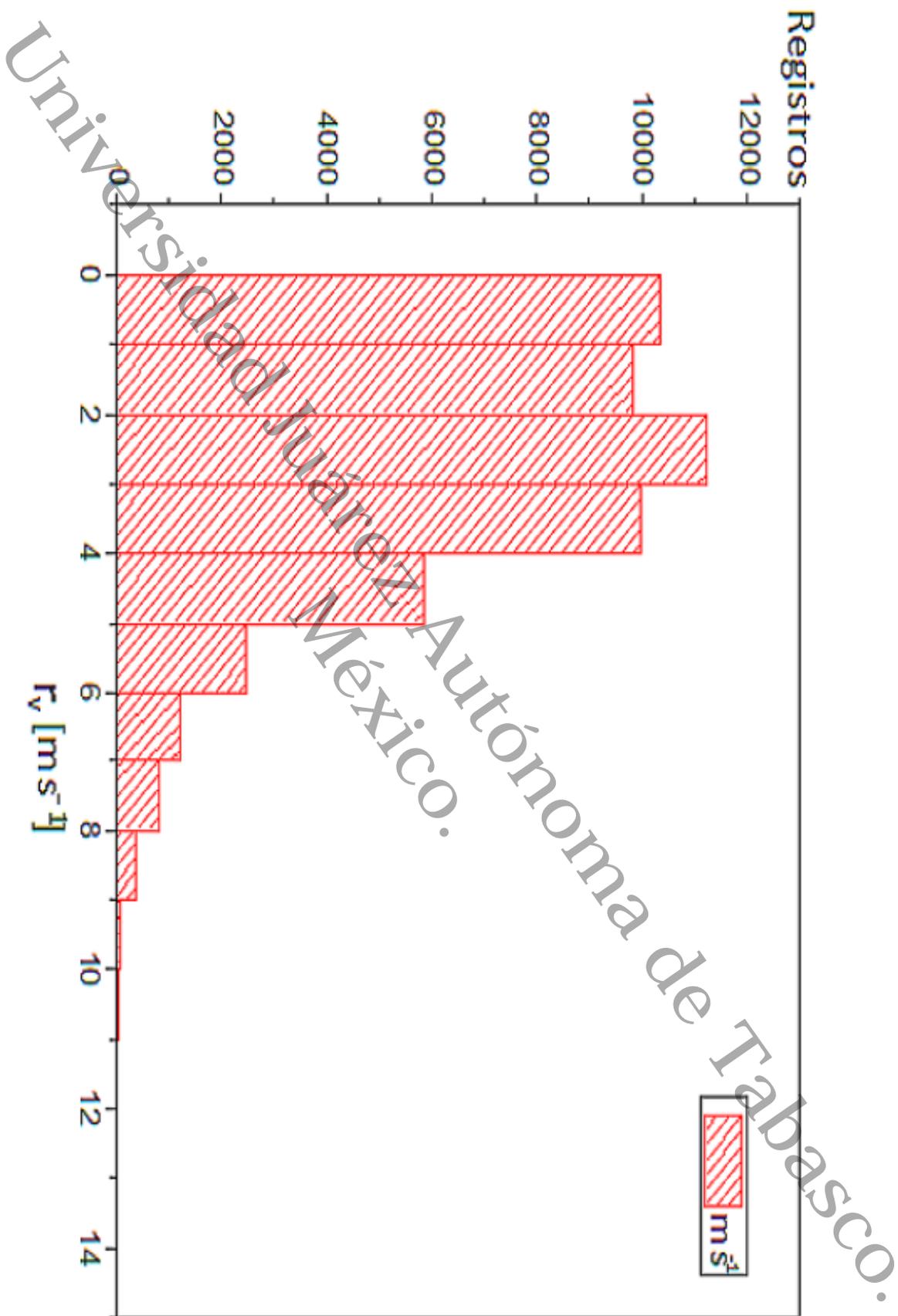


FIGURA 2.7: Histograma de la v_r anual Cuauhtemocztzin II a 26 m de altura.

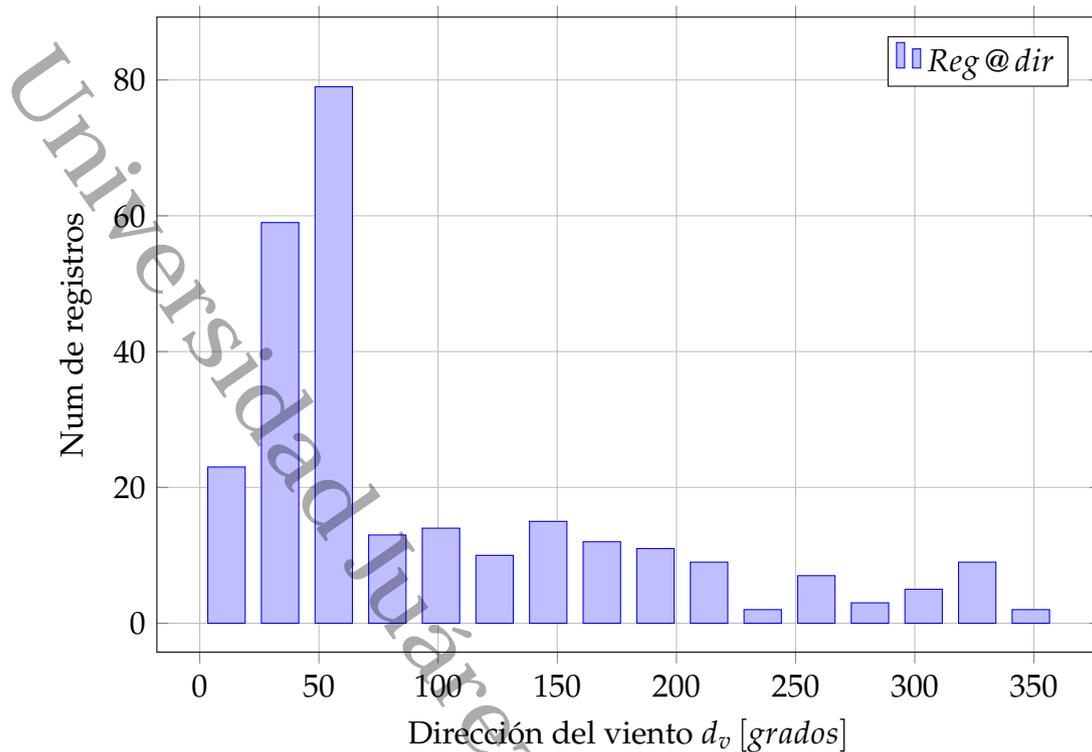


FIGURA 2.8: Histograma indicador absoluto para una muestra de registros para cada dirección.

la campaña de medición de v_v a 26 m de altura en Cuauhtemoczin II. Este tipo de histogramas se modelan con funciones continuas de probabilidad. Las Figs. 2.8 y 2.9 representa un historgrama de v_v por cada dirección. La diferencia entre ambos es que la Fig. 2.7 muestra rapidez del viento porque incluye todas las direcciones y los registros se escogen para un periodo de tiempo sin importar dirección. También puede hacerse por direcciones y solo en este caso sería un histograma de v_v . Mientras que las Figs. 2.8 y 2.9 tienen todas las velocidades por cada una de las barras o clase de d_v .

En conclusión dependiendo de las necesidades en el análisis es conveniente elegir una de las dos representaciones por separado para modelar la EE en el SE . Si es para una serie de " t " la modelación será sobre la rapidez del viento mientras que si se hace por d_v la modelación es sobre la v_v .

La rapidez del viento se puede representar en forma de un diagrama de dispersión de datos como se utiliza en los análisis de sensibilidad. Este diagrama puede elaborarse para hacer correlaciones, $t VS v_v$; $d_v VS v_v$ entre otros. Este tipo de diagramas puede ser útil dependiendo de lo que se necesite observar o correlacionar. Un diagrama previo al histograma de la Fig. 2.8 puede realizarse con una muestra de registros en un diagrama como el de la Fig. 2.10. Esta figura muestra con más detalle los valores de las velocidades de

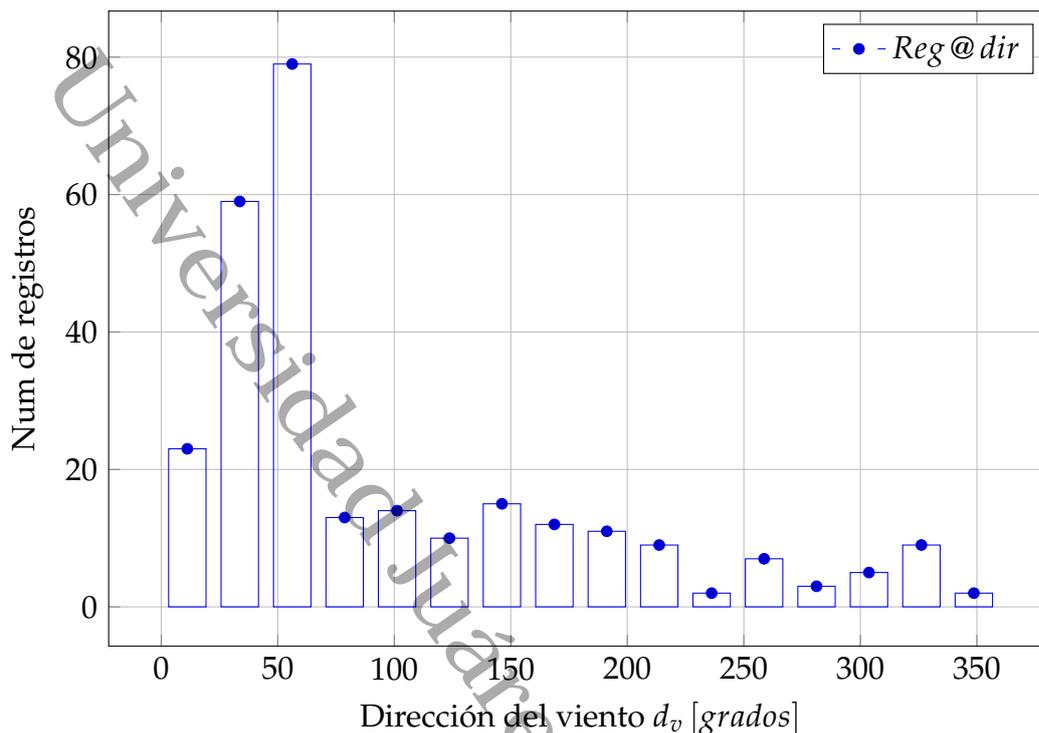


FIGURA 2.9: Histograma indicador absoluto para una muestra de registros para cada dirección.

viento y la dirección con mayor densidad de estos.

2.4 Funciones para distribuciones de probabilidad y acumulativa

La modelación de la distribución de frecuencias de la v_v para la *ERESE* debe realizarse con la mejor precisión posible. Ya sea que este en función de su densidad de probabilidades (*PDF*) o de su distribución acumulativa (*CDF*) son indicador de las probabilidades de éxito o fracaso en el diseño, construcción, operación y retorno de la inversión para un *PE*.

Para construir el modelo de Weibull que nos de la función de densidad de probabilidades es necesario primero realizar una normalización de la base de datos. Mediante una fórmula que los coloque el rango de frecuencias entre $[0 - 1]$. Esto debe hacerse después de que los registros de clases de v_v tengan un valor adecuado para su representación en probabilidades. Las clases son una parte del total de la base de datos y su valor es en frecuencia. Estas deben normalizarse para poder ser representadas en un rango unitario. Esto se comprueba al sumar sus valores debe ser exactamente igual a uno. La normalización se consigue utilizando la Ec. 2.37.

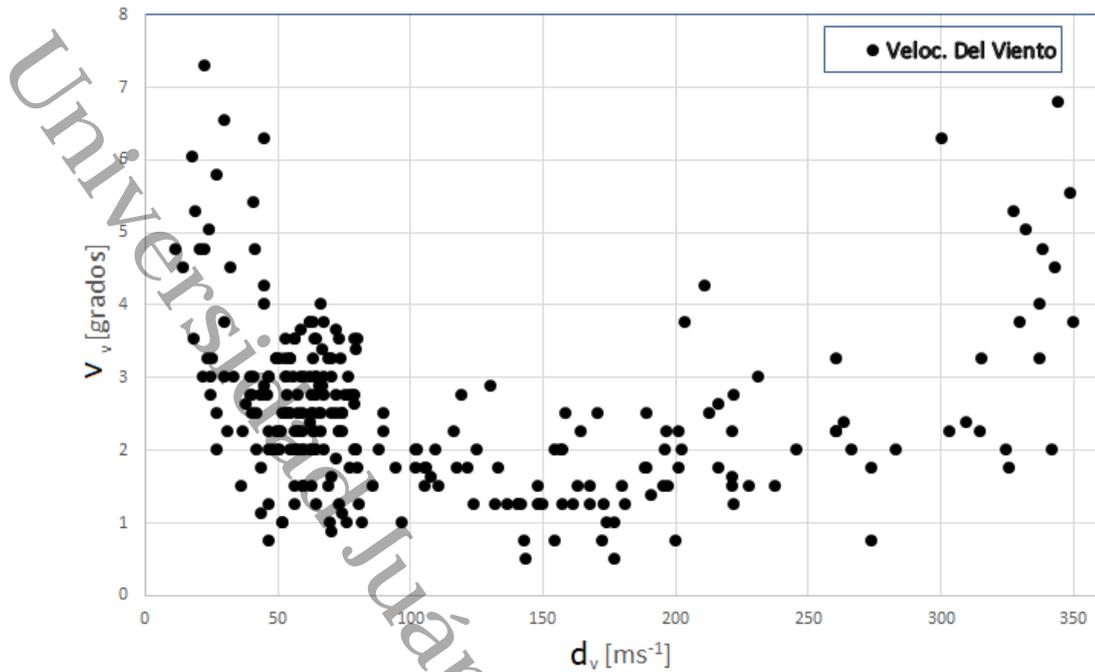


FIGURA 2.10: Diagrama de dispersión de una muestra de registros de v_v Cuauh II a 26 m de altura.

$$f_i = \frac{(x_i - Min)}{(Max - Min)} \quad \forall \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.37)$$

Donde:

f_i : valor normalizado de la frecuencia de la *clase* i ; x_i : número de registros o frecuencia de la *clase* $i \leftrightarrow v_{v(i)}$; Min : número de mínimo de registros por clase de la base de datos completa; Max : número máximo de registros por clase de la base de datos completa y n : número de clases que conforman las base de datos completa.

La función de densidad de probabilidades o PDF puede construirse en el caso de *EE* y de la *IEC 61400 – parte 12 – 1* mediante Weibull-PDF y de preferencia Rayleigh-PDF para el caso de validación de eficiencia de *TEs* funcionando en un *PE* en operación. El modelo de Weibull-PDF obtenerse con la Ec. 2.27 descrita en el Apart. 2.1.4 y mediante la aplicación de las Ecs. 2.31 a 2.34.

$$C_{prob}(v_v) = 1 - \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v_v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v_v}{c}\right)^k\right] \quad (2.38)$$

La función de distribución acumulativa de probabilidades o CDF puede obtenerse directamente con los parámetros de Weibull obtenidos para Weibull-PDF. Este se realiza una vez que se ha verificado el mejor ajuste, ver Ec. 2.38.

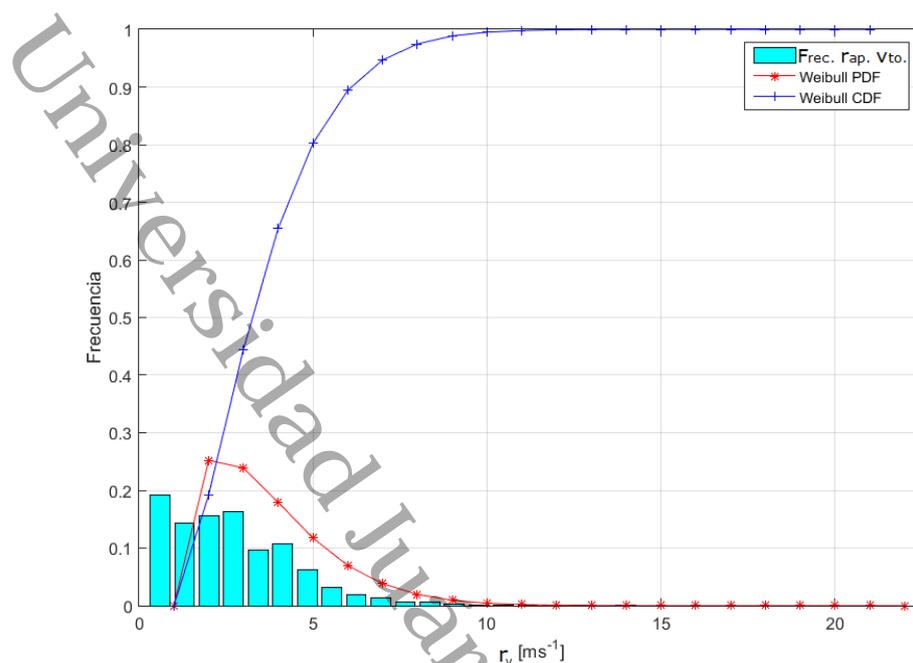


FIGURA 2.11: Funciones De densidad de probabilidades y distribución acumulativa de la v_v Cuauhtemotzin II a 26 m de altura.

La Fig. 2.11 muestra ambas funciones obtenidas para la base de datos de 1 año compuesta de mas de 52,000 registros. La métrica para verificar el mejor ajuste puede hacerse mediante la prueba similaridad o alguna otra como en la Ec. 2.39

$$S(W_m, H_{fn}) = \frac{\sum_{i=1}^M W_{m,i} H_{fn,i}}{\sqrt{\sum W_{m,i}^2 \sum H_{fn,i}^2}} \quad \forall \quad i = 1, 2, 3, \dots, M. \quad (2.39)$$

Donde:

$S(W_m, H_{fn})$: similaridad entre modelo y la distribución de frecuencias de v_v real; W_m : modelo de Weibull con función de densidad de probabilidades; H_{fn} : histograma de frecuencias normalizado;

En conclusión la modelación es aceptable cuando este cumple con una métrica establecida para el proposito que deba cumplir la modelación o del cumplimiento de conformidad con alguna norma.

2.5 Estimación de la densidad de potencia eólica

La densidad de potencia eólica o potencia específica mide la relación entre el tamaño del generador y el tamaño del rotor del GTE. Los generadores miden

su potencia o capacidad en Watts (W) desde la placa de identificación. Los rotores se miden por el área de barrido del rotor de la TE , medida en metros cuadrados [m^2]. Los GTE con baja potencia específica tienen un rotor más grande en relación a la capacidad del generador, lo que resulta en un menor número de Watts por metro cuadrado [$W m^{-2}$].

Si multiplicamos la Ec. 2.21 por ambos lados por el inverso del A del rotor de la TE que se emplea o se empleará en el PE se obtiene la P_{elect} por unidad de área. Esta es representada en la Ec. 2.40 y con unidades [$W m^{-2}$].

$$P_{elect} A^{-1} = \frac{1}{2} \rho_{air} v_{vi}^3 C_{p(a)} \eta_{mec} \eta_{elect} \quad (2.40)$$

La aplicación de esta ecuación puede hacerse de muchas formas en relación a la distribución de las frecuencias de velocidad del viento:

1. Directamente de los registros de la base de datos de una campaña de medición de la v_v para una $ERESE$.
2. Desde algún modelo ajustado para la distribución de frecuencias de la v_v como: PDF Weibull-2, PDF Weibull-3, PDF Weibull bimodal.
3. Desde la media de la v_v obtenida por el número de horas estimadas de viento activo.

Cada una de las opciones tiene un propósito o precisión y un alcance temporal. El uso de este índice ha dejado de ser importante porque se ha visto que los grandes GTE funcionan mejor en sitios con menores velocidades de viento de lo que antes se creía, y entonces se ha ido incrementando el diametro de los rotores por lo que este término solo se utiliza ya como una referencia de clasificación del sitio.

2.5.1 Producción anual de energía eólica

Un PE debe producir anualmente una cantidad específica de energía Eléctrica en [kWh] como unidad base, extraída desde la EE . En la práctica se utilizan múltiplos de esta unidad de energía para una producción de energía anualizada (PEA) total, tales como: $MWañ$, $GWañ$ o $TWañ$. Estas unidades de gran escala pueden ser convertidas en J o comparadas respecto a otras fuentes de energía convencionales, ver Tablas A.1 y A.2 Apéndice A. Para una estimación teórica puede usarse la distribución de Weibull-PDF usando las v_v obtenidas de la campaña de medición ad-hoc del $SEPEE$. Para realizar dicha estimación de forma más aproximada se debe utilizar la curva de potencia eléctrica P_{elect} certificada del GTE proporcionada por el fabricante por Norma, ver Tabla ??, Norma IEC-61400 parte 12-1.

La *PEA* de un *GTE* se calcula en función de la v_v , del modelo de potencia del *GTE* y el número de horas anualizadas. La *PEA* o (*AEP*) de acuerdo a *IEC*, usualmente puede estimarse empleando la siguiente Ecuación:

$$PEA = 8760 \int_0^{\infty} P_m(v_v) f_m(v_v) d(v_v) \quad (2.41)$$

Donde:

8760: número aproximado de horas al año; $P_m(v_v)$: Modelo de la curva de potencia del *GTE* en funcionamiento o que se instalará; $f_m(v_v)$: función de probabilidad con la distribución o densidad de frecuencia de v_v .

Para un *PE* en proyección se debe contar con las mediciones meteorológicas de la prospección eólica del *SEPEE*, algunos históricos de muchos años de algunas *EA* de la zona o históricos de bases de datos en mesoescala. Alguna o varias curvas de *PE* certificadas de modelos de *GTE* con posibilidad de instalarse el *SEPEE*. Con la información anterior se puede aplicar la Ec. 2.41, descartando los registros que sean menores a la v_v de arranque ($v_{v(inicio)}$) del *GTE* y los registros de v_v de autodesconexión ($v_{v(desc)}$) del *GTE*.

Para un *PE* en funcionamiento la *PEA* total se obtiene sumando las *PEAs* de cada *GTE* instalado. Cada *GTE* tiene sus propios $C_p(a)$, por lo que deben de multiplicarse el resultado de cada uno para corregir las posibles interferencias aerodinámicas entre *TEs*, incluyendo las pérdidas de conexión entre las diferentes *GTE* y la *SEEE*, incluso por fallas de la *LTAV*.

Otra forma de obtener la *PEA* es tomando directamente la base de datos anualizada y preparar los registros como en el histograma y normalizarlos por hora para obtener resultados similares a los de la Ec. 2.41.

Capítulo 3

Montaje experimental y metodologías de modelación

Este capítulo cubre el montaje experimental de los sensores y registradores desde su selección. También aquí se incluye el diseño del montaje de los instrumentos y su configuración. Aquí se abordan las metodologías de modelación de las distribuciones de frecuencias y probabilidades de la velocidad de viento. Se introducen aquí las herramientas y metodologías que permitirán mostrar resultados replicables en los capítulos 4 y 5. La configuración en el montaje y guardado de registros empleadas aquí son de acuerdo a la norma IEC presentadas en el capítulo 1. Las metodologías de ajuste que se abordan aquí usan el modelo de weibull de dos y tres parámetros, Rayleigh de dos parámetros y otros modelos. Estos modelos se prueban sobre las distribuciones de densidad de probabilidad de viento. El desarrollo y prueba de modelos multimodales sobre Weibull se introduce en este capítulo como alternativa para modelar y lograr mejores ajustes. Se propone aquí incrementar el número de modos en el modelo de Weibull para lograr mejores ajustes a las distribuciones de las probabilidades de la velocidad del viento. Se desarrolla e introduce un modelo alternativo multimodal Poly-Pi-N más versátil. Este es capaz de ajustar tanto a distribuciones de frecuencia como a densidades de probabilidades de la velocidad de viento. Se prueba este modelo con diferentes variables meteorológicas dando mejores ajustes en algunos casos.

3.1 Selección e instalación de estaciones meteorológicas automáticas

La selección del *SEPEE* se realizó en una primera etapa con base al análisis de mapas eólicos mesoescala y observación de los patrones de viento tanto a nivel



FIGURA 3.1: Anemómetro marca NRG de tres copas, Clase I
Adaptado desde NRG Systems
Extraído de [66].

global como regional y de las evidencias de la física del viento, incluyendo la inclinación de los árboles de la zona, ver Cap. 1. En una segunda etapa se recorrió la costa de Tabasco desde los límites con el Estado de Veracruz a los límites con el Estado de Campeche. Durante el recorrido se hicieron algunas mediciones puntuales con instrumentos móviles.

Aunque toda la zona costera de Tabasco presentó similitudes en cuanto a la dirección e intensidad del vientos en las mediciones, a priori fue elegido Cuauhtemoczin. Esto se decidió con base a la proximidad que tiene respecto a la dirección del flujo de aire del Golfo de México hacia el Istmo de Tehuantepec y su embudo natural que permite el paso del viento hacia el océano pacífico. La principal razón de certidumbre de elección del lugar es la posición geográfica en cuanto a latitud y longitud cuyos vientos dominantes deben ser desde el NE y de hecho así se comprobaron.

3.1.1 Selección de sensores y registradores

La estación anemométrica debe contener sensores de v_v , sensores de d_v , sensores de temperatura del aire, pluviómetro, sensor de radiación solar, sensor de humedad relativa, sensor P_{atm} entre otros, además de contar con un pararrayos y tierra física apropiada para descargas atmosféricas. Para seleccionar cada sensor en primer lugar cada uno de los sensores debe ser compatible con el registrador que utilice la EA. La EA se diseña a la medida, de acuerdo al número de variables que se quieran registrar y las alturas elegidas. Para obtener y validar un perfil de velocidad de viento del SE se mide en alturas definidas a priori. Los sensores podrían ser colocados en alturas aproximadas de 20 m, 40 m y 60 m. En este caso las alturas elegidas fueron 33 m y 54 m para Cuauhtemoczin I y 26 m para Cuauhtemoczin II. El sensor de velocidad es de tres copas con forma cosenoidal que cumple con el anexo J de la norma IEC-61400 parte 12-1 y de clase I con capacidad de medir hasta 96 m s^{-1} , se instaló nuevo con certificado de calibración de fabricante, ver Fig. 3.1, Calibrado por MEASNET Número 5966 y CPH MEASNET Número 5967.

El registrador tiene la capacidad de muestrear a la velocidad de 1 Hz. Se evitó el uso del paquete de sensores Veleta-anemómetros ya sea en la versión de barra común o de montura común. Esto para evitar interferencia entre sensores. Se seleccionó sensores separados para colocarlos y configurarlos individualmente.

Se eligió el modelo de registrador y sensores inteligentes que se autoconfiguran al conectarse a el registrador como se muestra en la Fig. 3.2. El registrador tiene la capacidad de enviar remotamente los registros en tiempo real a un servidor especial que da servicio a estos modelos. Se eligió sin telecomunicaciones por dos razones: obligar la visita en sitio para inspeccionar el estado de los sensores físicamente y segundo el costo de las telecomunicaciones implica un presupuesto especial de porteo de datos.

3.1.2 Diseño del montaje de instrumentos y configuración

La medición de precipitación pluvial se colocó únicamente en la estación de Cuauhtemoczin II debido a limitaciones en el número de metros de cable recomendado para cada registrador que no debe ser mayor a 100 m para el modelo utilizado. Dado que la distancia entre las dos EAs es menor a 5 km con un solo pluviómetro es suficiente.

El sensor de la temperatura debe instalarse con un abrigo termométrico debidamente aceptado por la normatividad. La medición de temperatura se colocó a dos alturas distintas en las dos EAs. Se colocó la medición de la temperatura para el caso de Cuauhtemoczin I a una altura de 26 m, mientras que para Cuauhtemoczin II fue a 6 m, lo anterior para estar más cerca de



FIGURA 3.2: Veleta marca NRG de modelo 200P, Banda muerta centrada en 0° con un máximo de 8°

Adaptado desde NRG Systems

Extraído de [67].

los sensores de medición de la v_v y d_v . No es posible colocar sensores de medición de temperatura junto al sensor de v_v debido a limitaciones del largo del cable del modelo empleado. Esto no afecta la precisión de la medición de temperatura porque la diferencia de altura entre sensores no es mayor a 30 m y al medir como mínimo a 6 m de altura se evita el efecto de proximidad del suelo.

La veleta debe instalarse sobre un brazo con el largo suficiente para mantener una distancia suficiente entre el sensor y la torre de celocía o mástil de la EA. Este brazo se calculó en base a recomendaciones de Measnet [17]. Esto es, para evitar el efecto de sombra de la torre que perturba el flujo de viento a través de los sensores de dirección y velocidad del viento. La distancia que se le asignó entre la torre-veleta y entre la torre-anemómetro es de 1500 mm, y la separación entre sensores es de 3000 mm. Esta configuración fue la misma para las dos EAs instaladas para esta investigación. De las dos formas posibles de establecer el cero del sensor al instalarlo sobre el soporte se eligió la horaria. El cero, banda muerta o ranura de la veleta fué ubicado en la dirección *norte*. Esta banda o ranura tiene un rango de ángulo de 5° a 8° , con voltaje de alimentación del instrumento en el rango de: 0 V a 5 V y este sensor a su vez tiene un potenciómetro con un rango ohmico de 10 k Ω a 1 M Ω de salida.

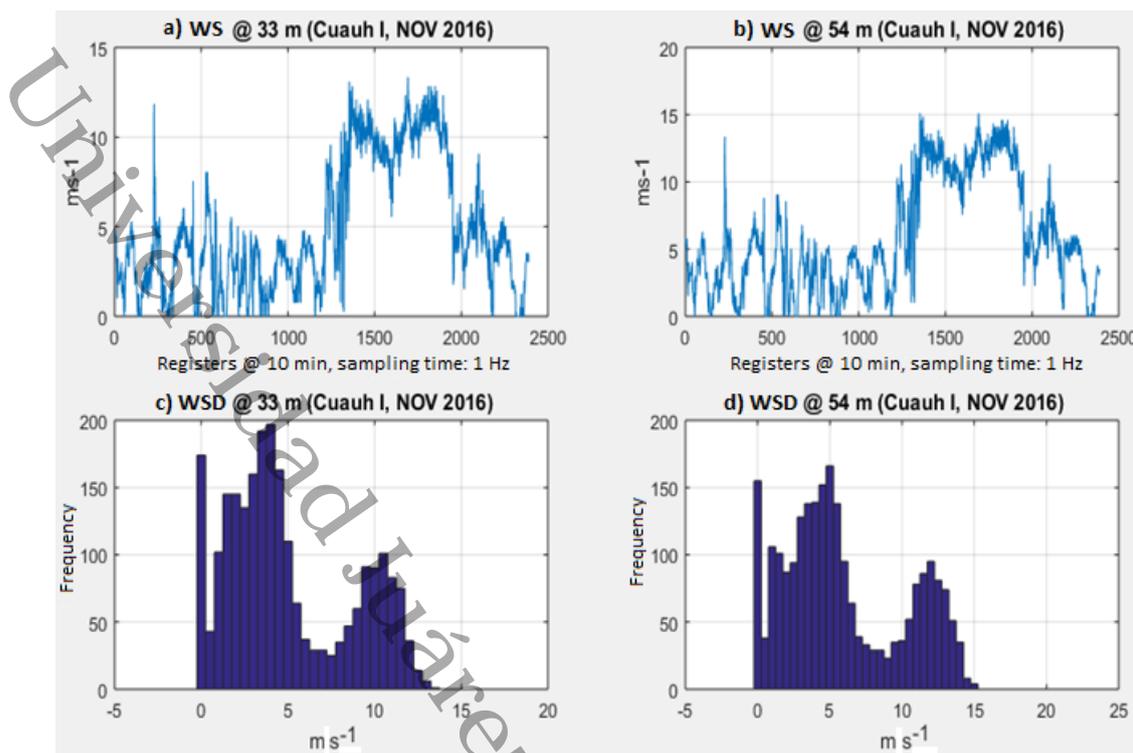


FIGURA 3.3: Histograma y gráfico de la rapidez del viento.

3.2 Histogramas y distribuciones de rapidez versus velocidad del viento

Los histogramas que representan la rapidez del viento (r_v) pueden tener formas que no ajustan con una distribución como las de Weibull-2, Weibull-3, Rayleigh, Normal u otros modelos encontrados en la literatura. La Fig. 3.3 muestra una distribución bimodal de la rapidez del viento para el mes de noviembre de 2016 en alturas de 33 m.s.n.s. y 54 m.s.n.s.

La distribución de frecuencias real de la v_v puede no tener similitud con la distribución de frecuencias de la rapidez del viento. A diferencia de los histogramas de r_v , los histogramas de v_v son la contraparte que permiten extraer para cada d_v todas las v_v .

El histograma de r_v se acostumbra a modelar con Weibull-2 o Rayleigh mediante un PDF. El histograma de velocidad del viento regularmente se representa en un histograma circular o rosa de vientos como en la Fig. 2.5 del Cap. 2. Los histogramas que son una propuesta de este trabajo no tienen referencias de modelación en su distribución en la literatura actual. La Fig. 3.4 muestra ambas distribuciones a fin de comparar la información que aportan para el mismo sitio.

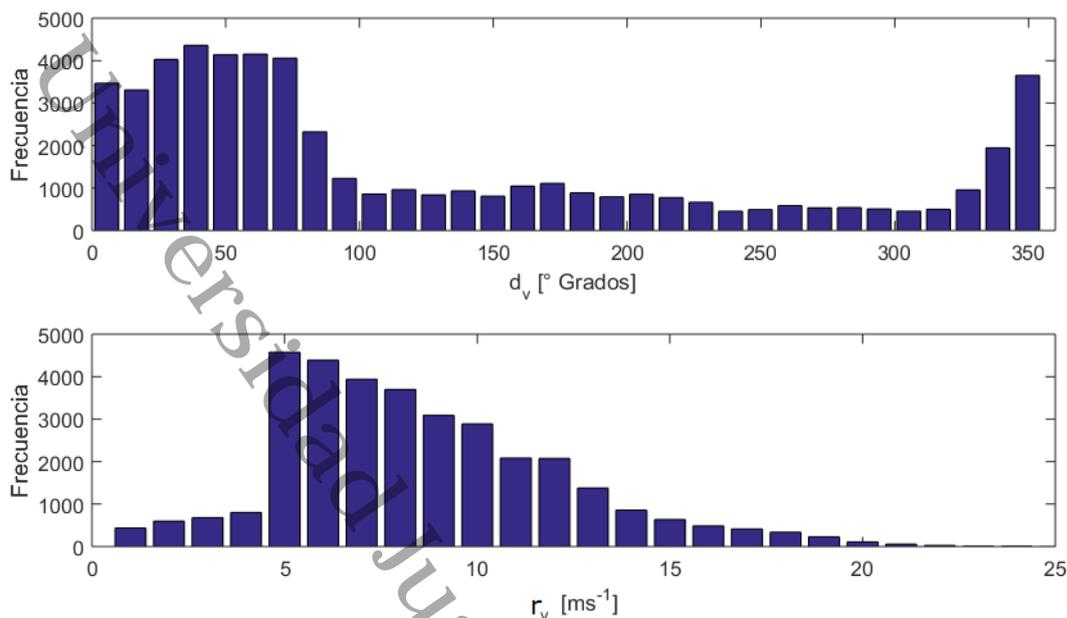


FIGURA 3.4: Histograma de la r_v y de la rapidez del viento.

3.2.1 Modelos de Weibull *versus* Rayleigh (rapidez del viento)

El modelo de Weibull originalmente se puso al servicio de la modelación de fallas, confiabilidad y vida útil en diversas partes y sistemas de fabricación industrial. Este modelo fue presentado a la comunidad científica por el matemático Sueco Waloddi Weibull quien en 1937 inventó la distribución denominada "Distribución de Weibull". Él presentó un artículo sobre el tema en 1951 que no fue recibido con mucha aceptación. El modelo de Rayleigh es un caso especial del modelo de Weibull. En muchos casos la norma IEC 61400 recomienda que se aplique Rayleigh como modelo estandar de referencia. Este modelo debe ajustarse a la función de densidad de probabilidades (*PDF*) de ocurrencia de los valores empíricos de r_v del *SE*. La *PDF* de Weibull puede aproximarse con dos o tres parámetros.

El modelo de Weibull-2 se expresa en la Ec. 3.1. Aunque hay varias versiones o casos especiales de Weibull, solo se presenta aquí para referencia: Weibull-2, modelo de Weibull-3, modelo exponencial y modelo de Rayleigh, ver Ecs. 3.1 a 3.4. El modelo de distribución Normal es una referencia estandar obligada en problemas de estadística y probabilidades.

$$f(v_v, k, c) = \begin{cases} \frac{k}{c} \left(\frac{v_v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v_v}{c}\right)^k} & v_v \geq 0 \quad \forall v_v \in [0, \infty) \\ 0 & v_v < 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

Donde:

v_v : velocidad del viento del *SE*; c : parámetro Weibull de escala; k : parámetro

Weibull de forma.

El modelo de Weibull es paramétrico y se considera un modelo general. Esto es porque a partir de este modelo generalizado se pueden obtener otros modelos conocidos que se consideran casos especiales de Weibull, ver Tabla 4.4. El modelo de Weibull de tres parámetros (Weibull-3) permite realizar un mejor ajuste a los datos experimentales de la campaña de medición en el SE.

La Ec. 3.2 incluye el tercer parámetro que en este caso se le resta a la v_v . Podría haber alguna otra forma de Weibull-3 con tres parámetros que permita un mejor ajuste que el que permite Weibull-2 o que los que alcanzan los casos especiales de Weibull, ver Tabla 3.1.

$$f(v_v, k, c, \delta) = \begin{cases} \frac{k}{c} \left(\frac{v_v - \delta}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v_v - \delta}{c} \right)^k} & v_v \geq 0 \quad \forall v_v \in [0, \infty) \\ 0 & v_v < 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

Donde:

δ : parámetro Weibull de localización y adecuación de la distribución.

Comparando los ajustes de estos modelos que son casos especiales de Weibull se puede elegir al mejor, aun así es posible que ninguno de los indicados en la Tabla 3.1 tenga el mejor ajuste en la ERESE. El modelo exponencial es el más sencillo de la familia de modelos empleados para modelar el viento entre otros. Éste es expresado en la Ec. 3.3.

$$f(v_v, c) = \begin{cases} \frac{1}{c} e^{-\left(\frac{v_v}{c} \right)} & v_v \geq 0 \quad \forall v_v \in [0, \infty) \\ 0 & v_v < 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

donde:

v_v : Velocidad del viento, c : parámetro de escala como en Weibull. El modelo exponencial es un caso especial del modelo de Weibull, donde $k = 1$ la transforma desde el modelo de Weibull en modelo exponencial representado en la Ec. 3.3, ver Tabla 3.1.

El modelo de Rayleigh es también un caso especial de Weibull en el que el parámetro de forma $k = 2$ y el parámetro de escala $c = \sqrt{2\sigma}$ y su estructura queda como se muestra en la Ec. 3.4, ver Tabla 3.1.

$$f(v_v, \sigma) = \begin{cases} \left(\frac{v_v}{\sigma^2} \right) e^{-\left(\frac{v_v^2}{2\sigma^2} \right)} & v_v \geq 0 \quad \forall v_v \in [0, \infty) \\ 0 & v_v < 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

TABLA 3.1: Modelos *Weibull*₍₂₋₃₎ y casos especiales para las funciones densidad de Probabilidades (PDF) de la r_v .

Modelo	Parámetro de forma (k)	Parámetro de escala (c)	Parámetro de localización (δ)
Exponencial	1	c	1
Rayleigh	2	$\frac{c^2}{2}$	2
Weibull-2	δ	c	δ
Weibull-3	k	c	δ
Gamma	1	c	δ
Chi	1	$\delta \frac{c^2}{2}$	δ

Donde:

σ : desviación estandar de la v_v .

La Tabla 3.1 muestra los valores usuales de cada modelo utilizado según sea requerido para la ERESE. Observar que las Ecs. 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4, incluso las ecuaciones de los modelos no indicados aquí como los modelos Gamma y Chi pueden utilizar la r_v como variable aleatoria de modelación (para el caso de modelación de la EE).

La modelación de las distribuciones de frecuencia con modelos de funciones de densidad de probabilidades permite su modelación con series de tiempo como el de la r_v . Es usual analizar series de tiempo anuales de la r_v para evaluar las probabilidades de éxito de una exploración eólica y de la estimación del potencial eólico.

Las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7 muestran la modelación de la densidad de probabilidades de las distribuciones de las frecuencias de mediciones realizadas en Cuauhtemotzin I y Cuauhtemotzin II. Estas modelaciones mostraron que los modelos ajustan mejor en las distribuciones de medición a mayor altura. A priori se cree que a mayor altura la dinámica del viento se ve menos afectada por la rugosidad del suelo y de los obstáculos circundantes al SE. Además conforme se incrementa la altura, la rapidez del viento es mayor como se constata en las tres figuras mencionadas. El modelo observado que mejor ajusta para distribuciones de rapidez del viento es el modelo de Rayleigh.

3.2.2 Modelos de Weibull *versus* Weibull bimodal

La distribución de frecuencias de la r_v usualmente puede resultar bimodal de forma natural como en las zonas costeras o por identificación de los modos de viento [68, 69], ver Fig. 3.3. En este trabajo se han revisado

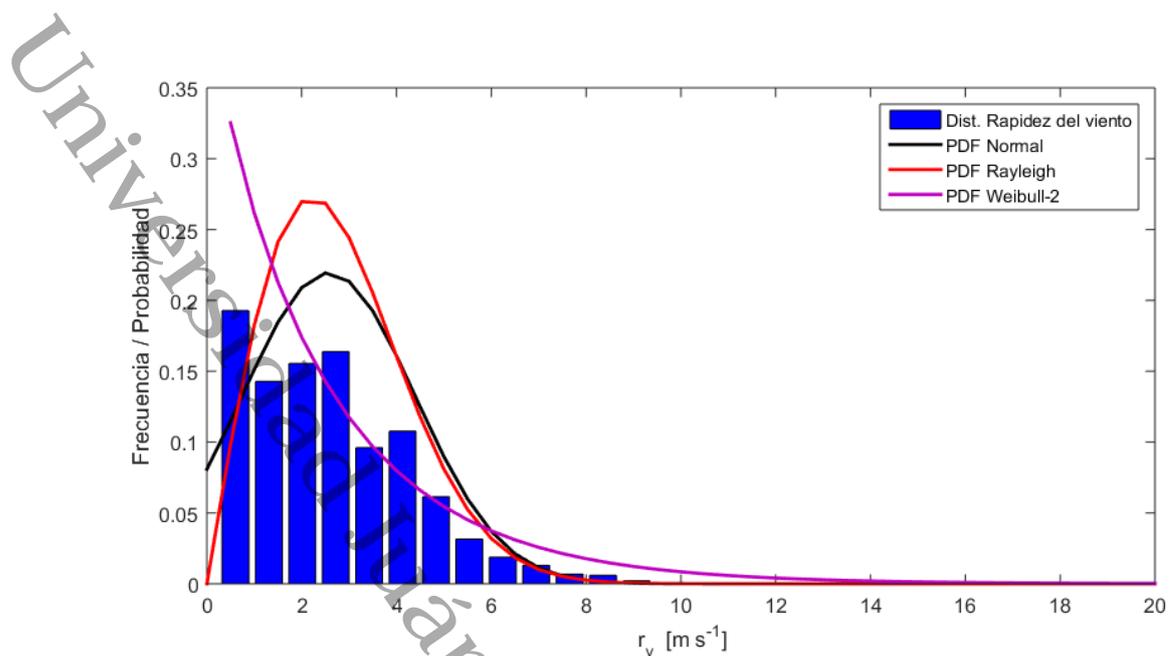


FIGURA 3.5: Comparativo de modelos Weibull y Rayleigh respecto a la distribución Normal de la rapidez del viento a 26 m.s.n.s.

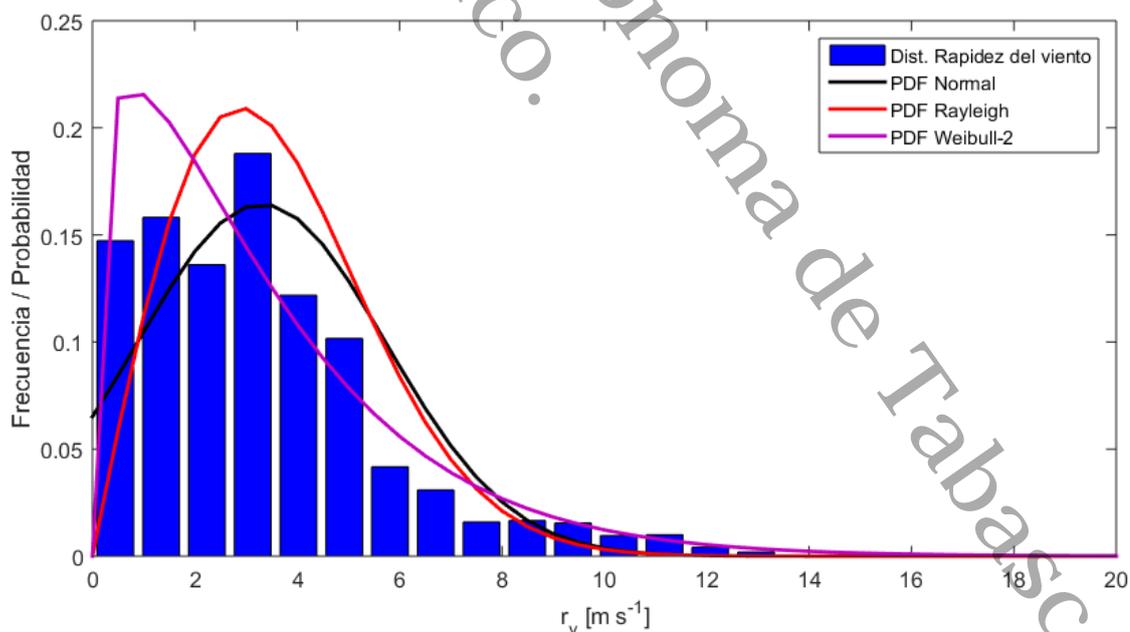


FIGURA 3.6: Comparativo de modelos Weibull y Rayleigh respecto a la distribución Normal de la rapidez del viento a 33 m.s.n.s.

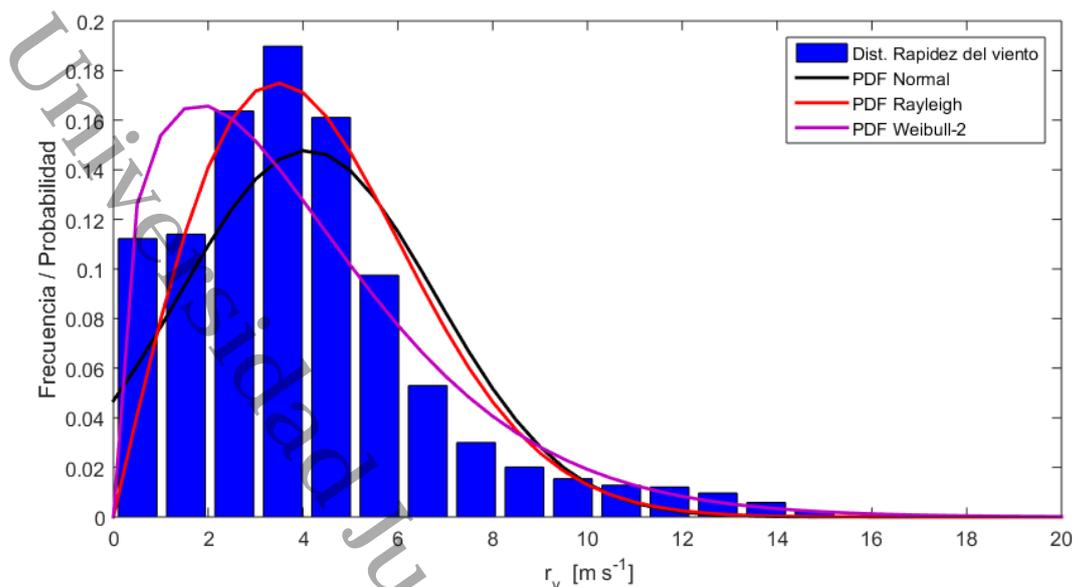


FIGURA 3.7: Comparativo de modelos Weibull y Rayleigh respecto a la distribución Normal de la rapidez del viento a 54 m.s.n.s.

distribuciones de otras partes de la zona costera de Tabasco y el Istmo de Tehuantepec encontrándose que incluso son multimodales en su distribución o función de densidad de probabilidades. La Fig. 3.8 muestra por separada dos d_v dominantes para mostrar lo dos modos de distribución de la r_v en Cuauhtemotzin II [68, 69] con medición a 26 m.s.n.s. La Fig. 3.9 muestra de forma integrada los modos mostrados antes en la Fig. 3.8.

Esta distribución bimodal es lograda por la identificación de los modos de operación del flujo de viento en el SE utilizando el histograma de la r_v que se muestra en la parte de abajo de la Fig. 3.4, parte de abajo. Este histograma indica que el sector perteneciente al primer cuadrante de la rosa de vientos fluye de 0° a 90° , identificada aquí como d_v NE. Esta dirección contiene la mayor frecuencia de vientos que solo por deducción de probabilidades se espera que tenga las r_v mas altas del SE. Los tres cuadrantes restantes de la rosa de vientos entre 90° a 360° son identificados por otras d_v en las Figs. 3.8 a y 3.8 b respectivamente.

3.3 Modelo alternativo de Lopman-Multimodal

La v_v debe incluir la dirección del viento porque se requiere de su condición vectorial para incluirla en la Ley de Betz. Un modelo de la PDF de la v_v se puede realizar si y solo si este modela la r_v con registros de una sola d_v . El viento ejerce una fuerza de empuje sobre las palas del rotor de una GTE. En

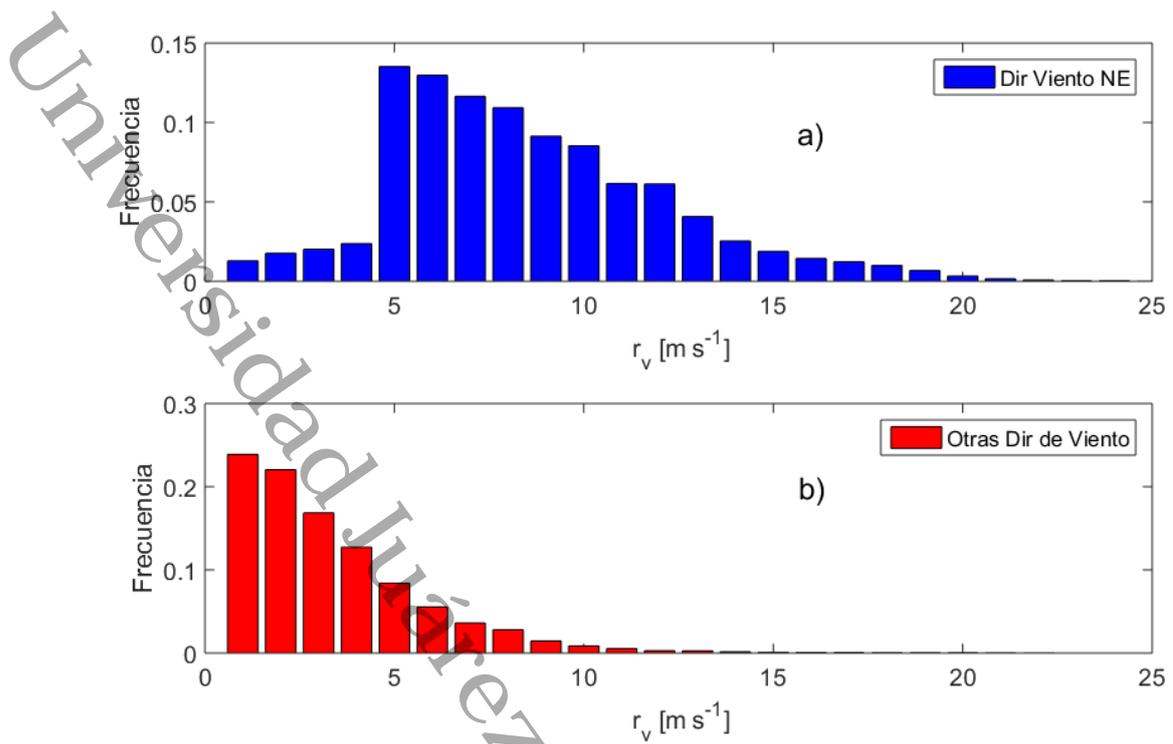


FIGURA 3.8: Distribución Bimodal de la rapidez del viento a 26 m.s.n.s. separados por: a) la d_v NE (0° a 90°) y b) otras d_v . (90° a 360°).

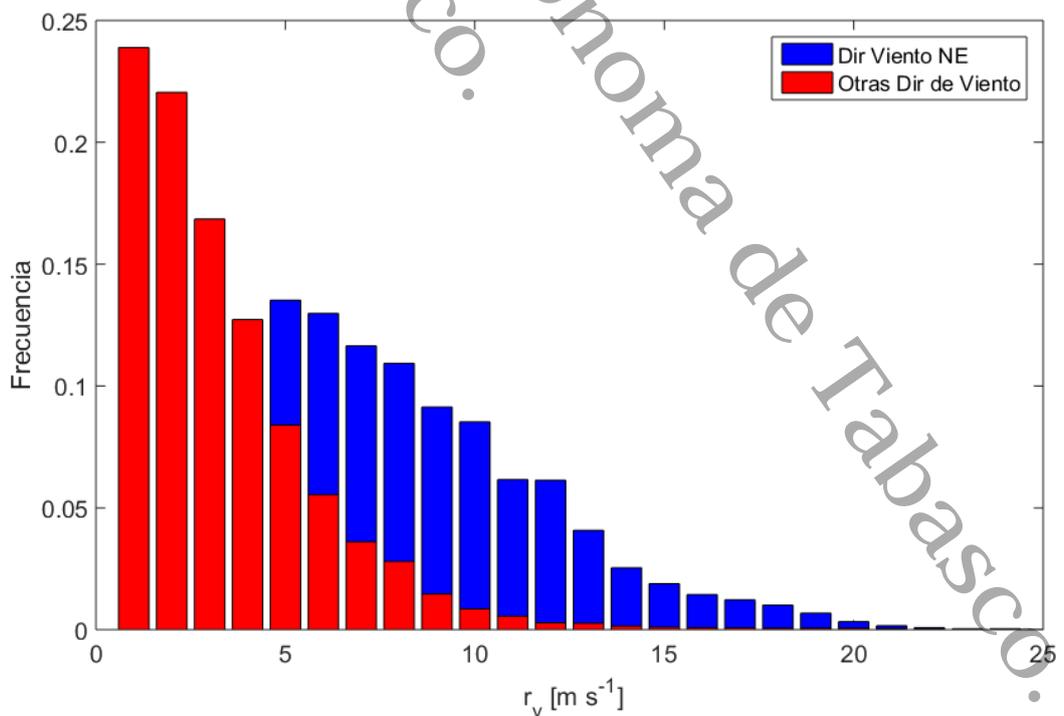


FIGURA 3.9: Distribución Bimodal de la rapidez del viento a 26 m.s.n.s. ensamblados por la d_v NE y las otras d_v .

este trabajo se propone que los modelos de la v_v se elaboren de conformidad a la condición vectorial del viento y no solo de su magnitud. Estos modelos deben elegirse para el periodo que se desee analizar. Esto implica que la temporalidad no es problema, se pueden hacer para un mes, una estación o un año.

Al representar el viento mediante un histograma $d_v - Frec(v_v)$ convierten a los registros de r_v automáticamente en un gráfico de la v_v que cumple con su condición vectorial. Cada una de las barras de este histograma contiene todas las v_v de una dirección que se elija. Se puede ser tan específico como la precisión de la veleta lo permita. La Fig. 3.10 muestra tres modos aparentes de distribución de la v_v que deben de modelarse. Esta figura representa realmente dos modos: Dirección Dominante y Dirección Alterna. El grupo de las direcciones alternas de 275° - 360° se puede unir al grupo de 0° - 90° en un solo grupo. Esto puede hacerse porque el 0° coincide con el 360° . De esta forma se puede visualizar solo dos modos para esta distribución de v_v . En la modelación de la distribución mostrada en la Fig. 3.10 puede modelarse para la distribución de frecuencias de d_v , distribución de \bar{v}_v , o la distribución de las v_{vmax} . La modelación de este tipo de distribuciones no puede ser modelada con distribuciones "Normal", "Weibull-2", "Rayleigh" o "Weibull-3", por lo que otros modelos deben ser utilizados debido a su multimodalidad.

3.3.1 Desarrollo del modelo de Lopman-Multimodal

La primer ventaja que tiene modelar la v_v es que se puede identificar la d_v con mayor frecuencia. En la d_v con mayor frecuencia hay la posibilidad de encontrar una velocidad media del viento (\bar{v}_v) de mayor magnitud. La segunda ventaja, se puede indentificar aquellas direcciones con \bar{v}_v por debajo del valor de la v_{vi} de arranque de las *GTEs* que se consideren candidatas para un *PE* en el *SE*. La Fig. 3.10 contiene en cada una de sus barras todas las v_v de un año. Estas barras se pueden hacer con el número que se desee de precisión de la d_v . Cada una de ellas contiene una \bar{v}_v , una σ y una PDF entre otros parámetros del viento. La Fig. 3.11 muestra la dispersión de las v_v por cada d_v . Esta representación va de acuerdo a la definición vectorial del la v_v .

El modelo de regresión multi-modal Lopman paramétrico se concibió en esta tesis inspirada en la existencia de los valores característicos (eigenvalores) y vectores característicos. Este modelo se probó, y comparó ampliamente con otros modelos de regresión ya estandarizados. Se estableció su forma y parámetros de ajuste con los registros empíricos derivados de las mediciones. Se probó y verificó su compatibilidad con algoritmos de regresión y ajuste como el de máxima verosimilitud. Este modelo partió de considerar que las ecuaciones diferenciales se pueden representar en variables de estado. El

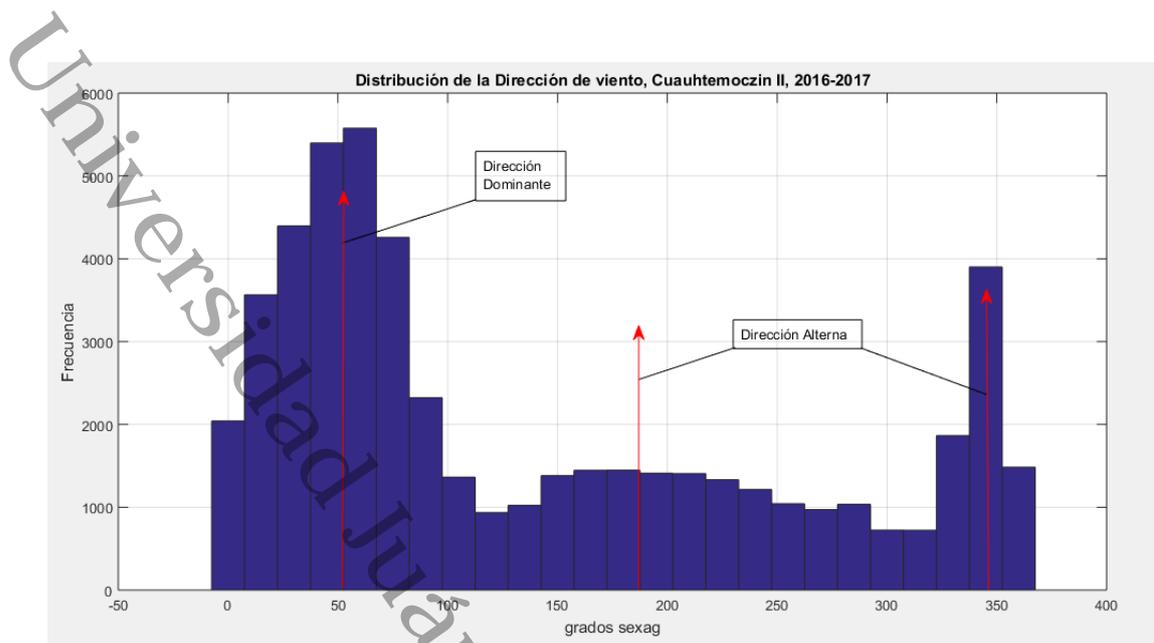


FIGURA 3.10: Histograma de la v_v para los años 2016-2017 Cuauhtemoczin II @ 26 m.s.n.s.

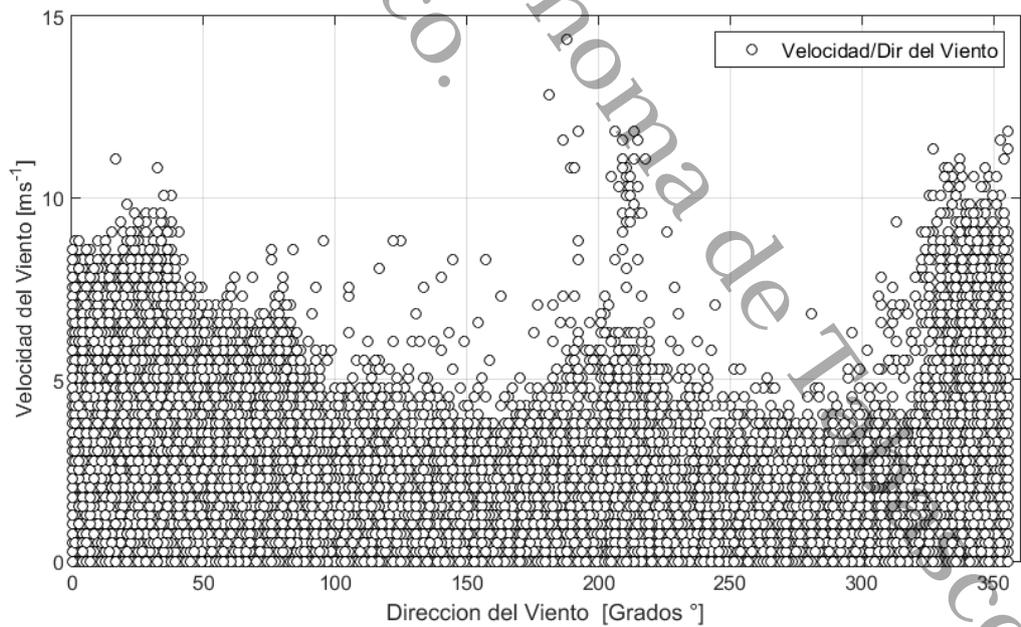


FIGURA 3.11: Gráfico de dispersión de la v_v para Cuauhtemoczin II @ 26 m.s.n.s.

sistema puede ser modificado de acuerdo a la complejidad de la dinámica implícita en los registros a los que el modelo multi modal Lopman debe ajustar. Este modelo es identificado más adelante en los gráficos como "PolyPI-N" como un modo de sintetización de su representación con el símbolo π como el término central para agrupar los valores característicos del modelo. El modelo es evolucionado desde el modelo de un sistema general de espacio estado que previamente se puede establecer o imaginar como se muestra en la Ec. 3.5.

$$Y = AX + Bu \quad (3.5)$$

Donde:

Y : vector de variables de estado dependientes, X Vector de variables de estado independientes, B : Vector o matriz de entradas, A : matriz de estados y u : variables de entradas.

Los valores característicos de la matriz A contiene los parámetros desconocidos de nuestro modelo manteniendo la forma original de representación en espacio estado. La forma clásica de obtener estos valores estadísticos se representa en la Ec. 3.7. esta matriz se puede visualizar como una matriz de transformación para hacer diversas operaciones tales como escalación, traslación, rotación, etc. como en la Ec. 3.6. En este sentido se puede implementar aquí dentro de un modelo de regresión paramétrico y ajustarse con cualquier método o algoritmo de máxima verosimilitud.

$$A \vec{v} = \lambda \vec{v} \quad (3.6)$$

Donde:

\vec{v} : vector propio λ : valor propio cuya naturaleza es escalar.

$$P_\lambda(A) = |(A - \lambda I| \quad (3.7)$$

Donde:

$P_\lambda(A)$: polinomio característico del sistema; λ : los valores propios que solucionan al sistema desde su polinomio característico cuando éste se iguala a cero, entonces la Ec. 3.7 se puede expresar como en la Ec. 3.8.

$$P_\lambda(A) = \prod_{i=1}^n (a_{i,\dots,n,j,\dots,n} - \lambda_{i,\dots,n,j,\dots,n} I) = 0 \quad (3.8)$$

Los parámetros de modelo se asocian a los valores característicos de la Matriz A , mismos que son desconocidos para regresiones. Hay que considerar que

los valores de la variable que se modela o autoregresa tiene un "bias" que es la tendencia natural o entrada del sistema y que forma parte del modelo y es independiente de la v_v , ver Ec. 3.9. Estos valores están implícitos en el polinomio característico del sistema y su forma se inserta en el modelo propuesto como se muestra en la Ec. 3.10.

$$Y - Bu = |(A - \lambda I)| X \quad (3.9)$$

$$Y = |(P_\lambda(A))| X + Bu \quad (3.10)$$

Finalmente, a partir de las ecuaciones anteriores y haciendo sustituciones y simplificaciones, el "modelo multimodal Lopman o PolyPI-N" queda establecido como se muestra en las Ecs. 3.11 y 3.12.

$$Y = \lambda \prod_{i=1}^n (X \pm p_i)^m \pm Bu \quad (3.11)$$

$$PolyPI - N(v_v) = \lambda \prod_{i=1}^N (v_v \pm p_i)^m \pm Bu \quad (3.12)$$

Donde:

Y : el vector de registros que se está ajustando o autoregresando y es el modelo $PolyPI - N(v_v) = Y$; X : vector de la variable independiente de entrada del proceso real y entrada al modelo que para este caso es la v_v ; λ : es un autovalor que puede ser escalar desconocido a determinarse en la regresión en un rango de $(-\infty, +\infty)$; p_i : parametros modales del modelo $PolyPI - N$, B : vector de coeficientes o escalar de la salida normal inicial $(-\infty, +\infty)$ y u : valor del bias, tendencia o media de la muestra o población de los registros a modelar. Es posible considerar la multiplicidad de un modal, donde m : grado de multiplicidad modal $\forall m \in (1, 2, \dots, m)$. Se recomienda usar el signo negativo [-] dentro del factor modal para que los valores de los parámetros obtenidos de la regresión sean positivos.

Dado que los autovalores aquí son parte del modelo también es uno de los parámetros a determinar. El principal objetivo es encontrar los parámetros del modelo $PolyPI - N(v_v)$ en la regresión. Además, los parametros asociados a los coeficientes de la matriz A son representados por p_i para ajustar el modelo. En general este modelo es muy intuitivo su solución porque es posible encontrar los valores de los parámetros. Esto se puede hacer hasta por prueba

y error, aunque es mejor con herramientas computacionales. Los valores de P_i : se pueden aproximar por inspección de los máximos y mínimos visibles en el gráfico de los vectores de registros $X - Y$ como vector de inicio. El valor B por simplicidad se puede considerar unitario y el valor de u se puede sustituir por la media aproximada de una muestra o la población de los registros $x_i - y_i$. El valor de λ es un escalador del modelo que al mismo tiempo se observa que es amplificador o resonador. el valor de n : se elige de acuerdo al número de máximos y mínimos identificados más uno. El modelo se propone aquí para prueba en esta investigación y alguna otra que tengan que manejar registros experimentales.

3.3.2 Ensayos y pruebas de ajuste

Para la modelación mostrada en la Fig. 3.11 se utilizaron los valores registros del histograma de frecuencias propuesto en este trabajo y mostrado en la Fig. 3.10. Los valores de frecuencia se normalizaron para representación probabilística y representaron sus valores en forma dispersa para su modelación con PolyPI-N, donde N es el número de parámetros empleados. Esta modelación demuestra la funcionalidad y precisión del modelo PolyPI-8 comparado a la modelación polinomial-4 mostrado en la Figs. 3.12 y 3.13 respectivamente.

El ajuste del Modelo Polinomial-4 sobre la densidad de probabilidades $p(v) - d_v$ para Cuauhtemotzin II a 26 m.s.n.s. mostrado en la Fig. 3.13 indica que este no logra un buen ajuste a los registros en estos casos como PolyPI-6, ver Fig. 3.12.

El modelo PolyPI-N desarrollado aquí y en prueba en este trabajo es multifuncional a diferencia de otros que solo funcionan en un rango limitado de valores. La Fig. 3.14 muestra el desempeño de PolyPI comparado a tres configuraciones del modelo polinomial y el modelo exponencial. Esta modelación es para obtener la velocidad media del viento (\bar{v}_v) y representarla en un diagrama $\bar{v}_v - d_v$, dado que esta cambia respecto a la d_v . Esta prueba muestra que el modelo Poly PI es de amplia aplicación, adaptable fácilmente y con buena precisión.

3.4 Metodología para evaluación del recurso eólico

Para estimar la producción energética por metro cuadrado que un aerogenerador o un parque eólico podrá "cosechar", comúnmente la velocidad del viento es sustituida por sus parámetros estadísticos desde algún modelo. Estos parámetros varían de acuerdo al modelo elegido como se mostró en

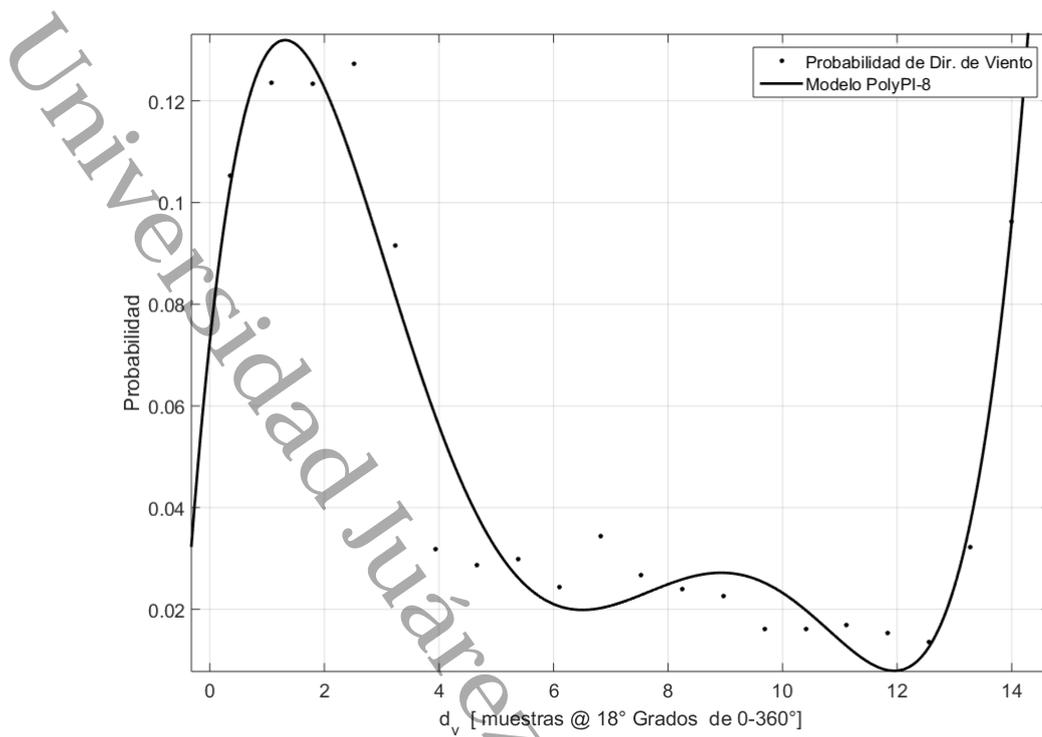


FIGURA 3.12: Gráfico de distribución de la v_v modelado con PolyPI-6 en una función de densidad de probabilidades $p(v) - d_v$ para Cuauhtemoczin II @ 26 m.s.n.s.

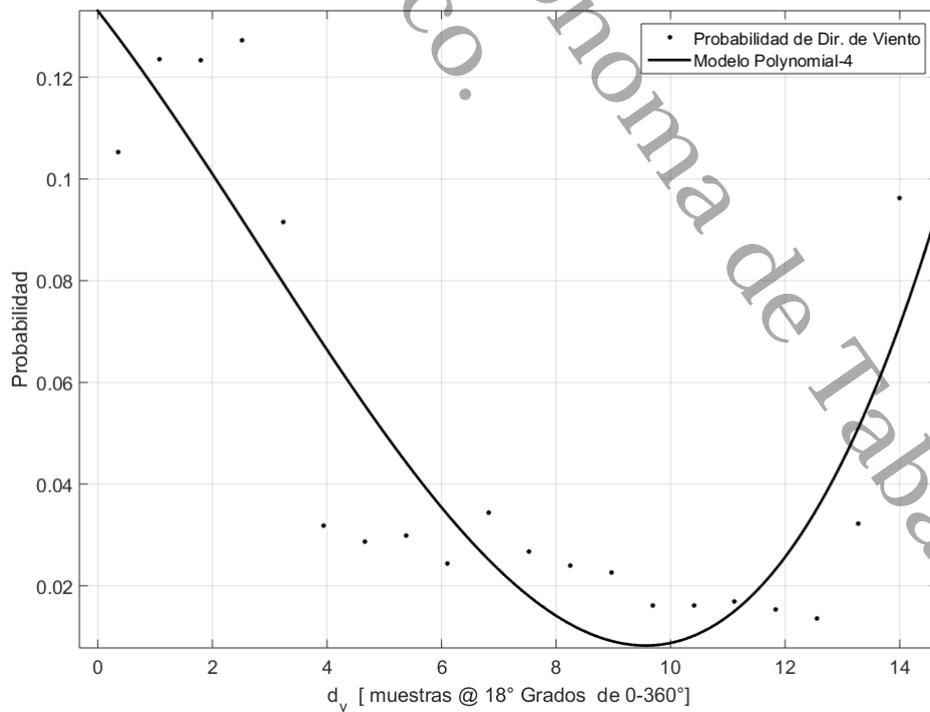


FIGURA 3.13: Gráfico de dispersión de la v_v en probabilidades para Cuauhtemoczin II @ 26 m.s.n.s.

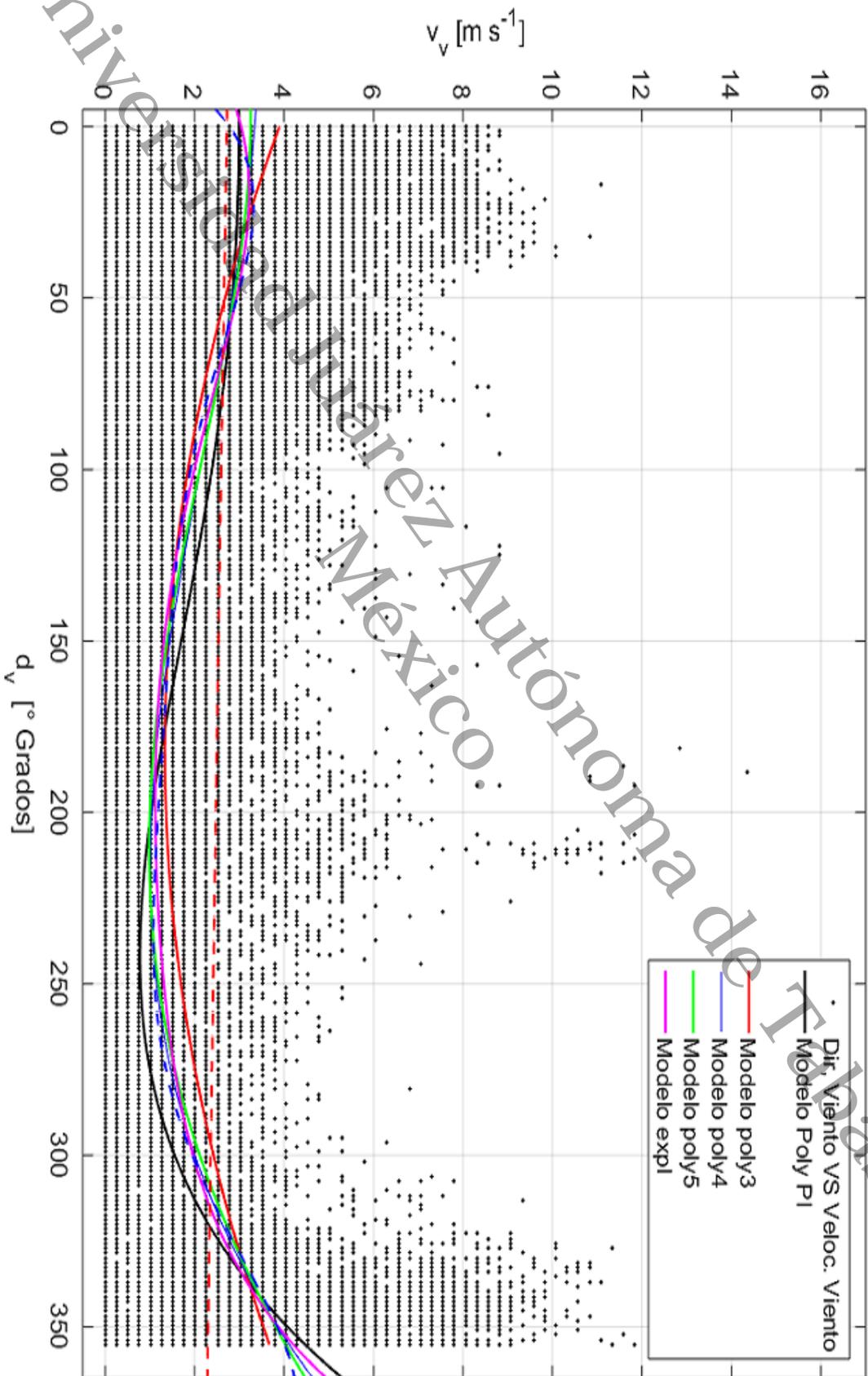


FIGURA 3.14: Gráfico de dispersión de la v_v en probabilidades para Cuauhtemoczin II @ 26 m.s.n.s.

los Apdos. 3.2.1 y 3.2.2. Como se muestra en la modelación de la v_v no es suficiente con conocer la $\overline{v_v}$ en un SE, ver Figs. 3.11, 3.12 y 3.13. Es necesario obtener un modelo lo más confiable respecto de sus principales variables v_v y ρ_{air} .

Para calcular la densidad de potencia es necesario retomar y modificar la Ec. 2.21 del Apdo. 2.1.2.6. Es importante hacer notar la diferencia entre la potencia específica P_{disp} o la energía disponible en el viento representada por: $E_{disp} = P_{disp} t$ y la potencia o energía generada por una TE o PE, ver Apdo. 2.1.1 y Ec. 2.3. La densidad de potencia que un modelo específico de TE puede entregar en un SE queda definida por la Ec. 3.13, ver Apdo. 2.5 y Ec. 2.40. La densidad de potencia del PE solo se multiplica la Ec. 3.13 por el número de TE que sea posible instalar en el PE.

$$\frac{P_{elect}}{A} = \frac{1}{2} \rho_{air} v_{vi}^3 C_{p(a)} \eta_{mec} \eta_{elect} \quad (3.13)$$

Donde A : área del rotor de la TE, v_{vi} : velocidad del viento ingresando a la TE que se considere en el proyecto.

Para hacer la estimación del RE o la PEA es necesario incluir el modelo de probabilidades como Weibull-2, Weibull-3, Weibull bimodal, Rayleigh, Gamma, PolyPI-N u otro en lugar de la variable v_{vi} o v_v en la Ec. 3.13 para obtener la estimación del RE, posteriormente multiplicar por el área A del rotor de la TE que se especifique. Este procedimiento nos da las horas efectivas de viento con los valores correspondientes de la v_v .

Retomando las Ecs. 2.3, 2.27, 2.28 y 2.41 de los Apdos. 2.1.1, 2.1.4 y 2.5.1 del Cap. 2 y asumiendo que se tiene seleccionado el GTE que se utilizará y se tiene el modelo es Weibull-2 del SE como se muestra en los Apdos. 3.2.1 y 3.2.2, es posible definir las siguientes Ecs.:

$$P(v_v) = \frac{1}{2} \rho_{air} A_{rot} v_v^3 \quad (3.14)$$

$$P(v_v | GTE) = \int_0^{\infty} \mathcal{P}_{TE}(v_v | GTE) \mathcal{F}_W(v_v) dv \quad (3.15)$$

Donde:

$P_p(v_v | GTE)$: potencia probable de la v_v dada una GTE; $\mathcal{P}_{TE}(v_v | GTE)$: Modelo de la curva de potencia de una TE dada; $\mathcal{F}_W(v_v)$: Modelo de Weibull-2 dada la v_v la cual se expresa como se muestra en la Ec. 3.16.

$$\mathcal{F}_W(v_v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v_v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v_v}{c}\right)^k\right] = 1 \quad (3.16)$$

Donde:

c : parámetro de escala de Weibull [m s^{-1}]; k : parámetro de forma de Weibull [-]. La densidad de potencia se puede calcular con la Ec. 3.17.

$$PA_{rot}^{-1} = \frac{1}{2} \rho [c^3 \Gamma\left(\frac{k+3}{k}\right)] \quad (3.17)$$

Donde:

Γ : función Gamma.

Alternativamente se procede la modelación como se explicó en el Apdo. 2.5.1 aplicando la Ec. 2.41. Para este caso hay que escoger el modelo y valor de sus parámetros y también de los de la curva de potencia del GTE. Suponiendo que la curva típica está dada por la Ec. 4.8.

$$\mathcal{P}_{TE}(v_v | GTE) = a_2 + \frac{a_2 - a_1}{1 + \exp\left(v_v - \frac{a_3}{a_4}\right)} \quad (3.18)$$

Donde:

Los valores de los parámetros del GTE son: $a_1 = -0.035$, [-]; $a_2 = -1.00$, [-]; $a_3 = -9.00$, [ms^{-1}]; $a_4 = 1.50$, [ms^{-1}]; $v_{vi} = 4.00$, [ms^{-1}]; $v_{vr} = 15.00$, [ms^{-1}] y $v_{v0} = 25.00$, [ms^{-1}]. La salida de potencia de una TE es proporcional o función de la v_v cuando esta se encuentra entre v_{vi} y v_{v0} .

$$\mathcal{P}_{TE}(v_v | GTE) = \begin{cases} 0 & v_v \leq v_{vi} \\ P_N \mathcal{F}_W(v_v) & v_{vi} \leq v_v < v_{v0} \\ 0 & v_{v0} \leq v_v \end{cases}$$

Donde:

P_N : potencia nominal del GTE; v_{vi} : velocidad del viento de arranque de la TE; v_{vr} : velocidad del viento nominal del GTE y v_{v0} : velocidad del viento de desconexión de la GTE. La energía que una TE puede generar se especifica por la Ec. 3.19.

La Tabla 3.2 muestra una recopilación y clasificación de fórmulas para cálculos estadísticos, parámetros de Weibull, potencia y Energía del viento. Esta tabla es una buena herramienta para realizar muchos de los cálculos necesarios en

TABLA 3.2: Resumen de ecuaciones para obtener parámetros para Weibull-2 en energía eólica, para extrapolaciones ver [64].

Parámetro	Ecuación	Rango	Unidades	Aplicación
c_{vi}	$= \sqrt{\frac{\Gamma(1+\frac{2}{k})}{\Gamma^2(1+\frac{1}{k})}} - 1$	[0 – 0.5)	[-]	Varianza
	$= \frac{\sigma_{v_v}}{\bar{v}_v}$	[0 – 0.5)	[-]	
k	$= \frac{1}{c_{vi}^{1.086}}$	[0 – ∞)	[-]	Par. Forma
		[0 – ∞)	[-]	
c	$= \frac{\bar{v}_v}{\Gamma(1+\frac{1}{k})}$	[0 – ∞)	m s^{-1}	Par. Escala
	$= \frac{1}{k} \sum_{i=1}^n v_{v(i)}^k$	[0 – ∞)	m s^{-1}	
$v_v E_{Max}$	$= c(\frac{k+2}{k})^{\frac{1}{k}}$	[0 – ∞)	m s^{-1}	$E(v_v)$ Max.
		[0 – ∞)	m s^{-1}	
$E(v_v^m)$	$= c^m \Gamma(1 + \frac{m}{k})$	[0 – ∞)	m s^{-1}	$(v_v)^m$
	$= c \Gamma(1 + \frac{1}{k})$	[0 – ∞)	m s^{-1}	
$v_v MP$	$= c(\frac{k-1}{k})^{\frac{1}{k}}$	[0 – ∞)	m s^{-1}	$P(v_v)$ Max.
		[0 – ∞)	m s^{-1}	
$F_{W(v_v)}$	$= 1 - e(-(\frac{v_v}{c})^k), v_v > 0$	[0 – 1]	%	$p(v_v)$ Acum.
	$= \frac{k}{c} (\frac{v_v}{c})^{k-1} e(-(\frac{v_v}{c})^k)$	[0 – 1]	%	

la modelación, prospección y evaluación de la energía del viento. Así por ejemplo, usando la curva de potencia de una *GTE* se puede calcular la energía eléctrica que puede entregar una *GTE* a la red eléctrica.

$$E_{TC} = T_A \int_0^{\infty} P_T(v_v) \mathcal{F}(v_v) dv_v \quad (3.19)$$

Donde:

E_{TC} : energía de la *TE* calculada por el modelo de la curva de potencia; $\mathcal{F}(v_v)$: modelo de Weibull generado desde los registros empíricos medidos; $P_T(v_v)$: modelo de potencia de la *TE* como función de la v_v , ver Ec. 3.19.

$$E_{PC} = T_A P_N \quad (3.20)$$

Donde:

P_N : valor nominal de la potencia de la *TE*; T_A : periodo de tiempo anual en [$h \text{ año}^{-1}$] y E_{PC} : energía generada a plena capacidad.

$$FC = \frac{E_{TC}}{E_N} \quad (3.21)$$

Donde:

FC : Factor de capacidad del *SE* dado el modelo de la *TE*; E_{TC} : energía de la *TE* calculada por el modelo de la curva de potencia y E_N : energía generada a capacidad plena o nominal en el número de horas considerados en el periodo de un año, ver Ecs. 3.22 y 3.23.

$$E_N = T P_N \quad (3.22)$$

$$PEA = FC (8766) P_{elect} F_d \quad (3.23)$$

Donde:

PEA : producción de energía anual; F_d : factor de disponibilidad P_{elect} : potencia eléctrica entregada por la *TE* que incluye el C_p , η_{mec} y η_{elect} , ver Ec. 3.13.

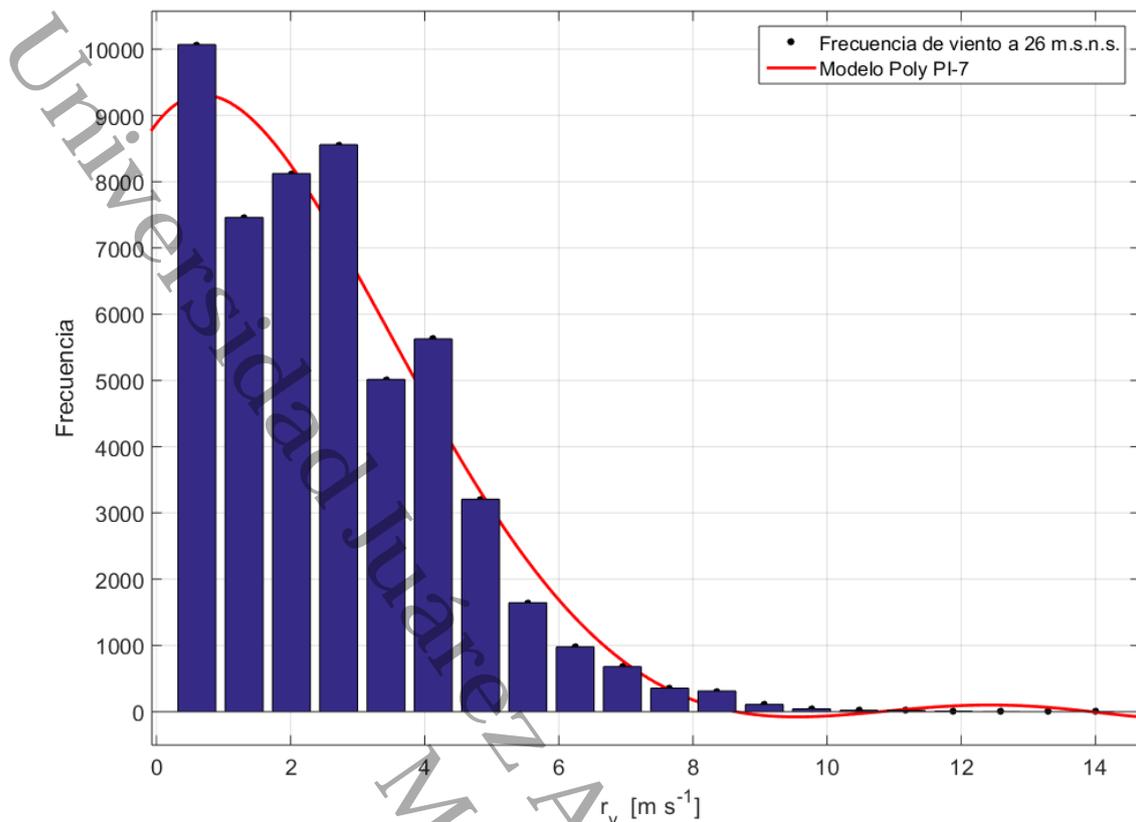


FIGURA 3.15: Modelo de la distribución de Frecuencias de r_v para Cuauhtemoczin II @ 26 m.s.n.s.

3.4.1 Modelo eólico de un sitio específico: Caso Cuauhtemoczin

La modelación del viento comúnmente se realiza en términos de su función de densidad de probabilidades (PDF). Esta modelación es indirecta para aprovechar la comodidad de utilizar un modelo conocido como el de Weibull o Rayleigh como lo recomienda IEC-61400 parte 12-1. Sin embargo, una vía más directa y confiable sería modelar directamente de las frecuencias de ocurrencia de la v_v como se muestra en la Fig. 3.16. Esta modelación permitiría encontrar resultados más directos y precisos dado que Poly PI-N no tiene prácticamente restricciones para su modelación, por lo que se puede hacer más directamente la ERESE.

3.4.2 Modelo Lopman-Multimodal de un sitio específico

La modelación de la función de la densidad de probabilidades o PDF de la r_v es posible modelarla desde otros modelos de regresión de mejor forma que con Weibull o Rayleigh. Esto no se realiza en la literatura actual debido a las implicaciones probabilísticas de las variables aleatorias en juego. En la práctica

TABLA 3.3: Modelación con PolyPI-7 para la Frecuencia(r_v) = $0.210005(r_v - a)(r_v - b)(r_v - c)(r_v - d)(r_v - e) + f$ para Coeficientes (con límites de confianza en 95 %): para la función de distribución de frecuencias la r_v , ver Fig. 3.16

Parámetro	Valor del parámetro [-]	Rango de búsqueda y confianza [-]
a	8.346	$(-1.258e + 07, 1.258e + 07)$
b*	-2.028	$(-4.102e + 05, 4.102e + 05)$
c	11.54	$(-4.602e + 07, 4.602e + 07)$
d	13.28	$(-4.232e + 07, 4.232e + 07)$
e	16.17	$(-8.467e + 06, 8.467e + 06)$
f*	65.53	$(-3.379e + 09, 3.379e + 09)$
SSE:	7.838e+06	RMSE: 784.2
R ² :	0.9661	R ² _{ajustada} : 0.954
*Complementario	-	$(-3.379e + 09, 3.379e + 09)$

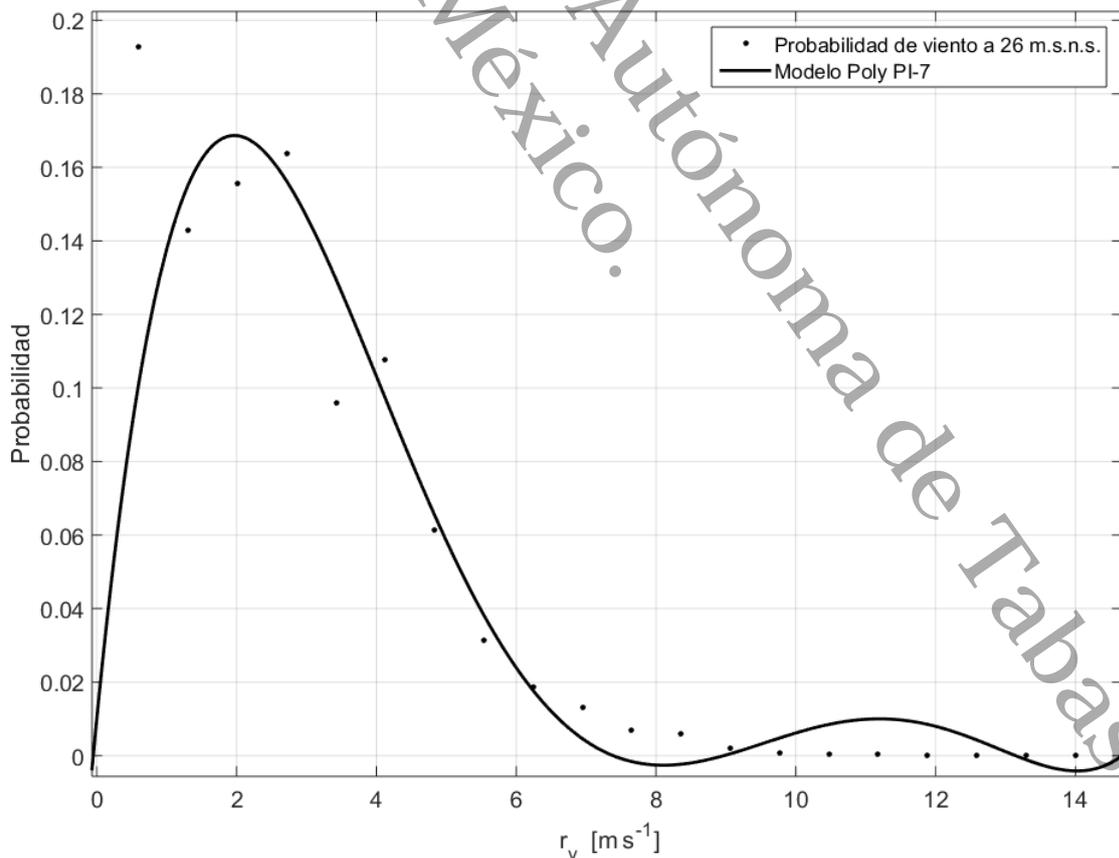


FIGURA 3.16: Modelo de la densidad de probabilidades de r_v para Cuauhtemoczin II @ 26 m.s.n.s.

TABLA 3.4: Modelación con PolyPI-7 para la $Probabilidad(r_v) = 1.552611e - 5 (r_v - a)(r_v - b)(r_v - c)(r_v - d)^2 + 0.01$ para Coeficientes (con límites de confianza en 95%): para la función de distribución de frecuencias la r_v , ver Fig. 3.16

Parámetro	Valor del parámetro [-]	Rango de búsqueda y confianza [-]
a	$9.996e - 12$	fijado al límite
b	6.608	(5.451, 7.764)
c	15.12	(12.21, 18.02)
d	11.19	(9.825, 12.56)
SSE:	0.01051	RMSE: 0.02486
R^2 :	0.876	$R^2_{ajustada}$: 0.8614

basta utilizar la función de distribución de frecuencias de la r_v o de la v_v en forma normalizada para igualar cualquier función de modelación o regresión a 1. Esta normalización permite cambiarse de distribuciones de frecuencia a funciones de densidad de la probabilidad con un rango entre $[0 - 1]$.

3.4.3 Cálculo y ajuste de parámetros

Los parámetros de los modelos considerados en este trabajo se pueden obtener utilizando diferentes métodos. Su valor se establece cuando el modelo considerado ajusta lo mas cercano a un $R^2 \leq 1$. Los valores de R están en el rango $[0 - 1]$. Cuando la variable en modelación se trata de una serie de valores representativos de clases, por ejemplo el contenido de las latas (barras o bunes) de una clasificación previa para un histograma es más factible que $R \simeq 1$. Cuando el modelo se quiere ajustar desde la totalidad de registros de alguna variable y estos se tienen en forma dispersa, obtener el valor de la media es muy preciso pero el valor de R tiende a ser muy pequeño. Cuando se obtiene una R_{max} o esta ya no se puede mejorar con ajustes en el modelo entonces se ha obtenido el valor más probable de sus parámetros.

En esta investigación se aplicó el método de máxima verosimilitud. Esto fue tanto para la regresión en todos los modelos presentados como para PolyPI-N. También fue aplicado tanto para la determinación de la media más probable de la v_v en las tres alturas consideradas como para sus valores de frecuencia. Esto fue realizado mediante el análisis de las tres series de registros obtenidas en la campaña de medición. La Fig. 3.17 muestra los valores de máxima probabilidad calculados para la v_v desde sus series de registros medidos previamente en las alturas de: 26 m, 33 m y 54 m.

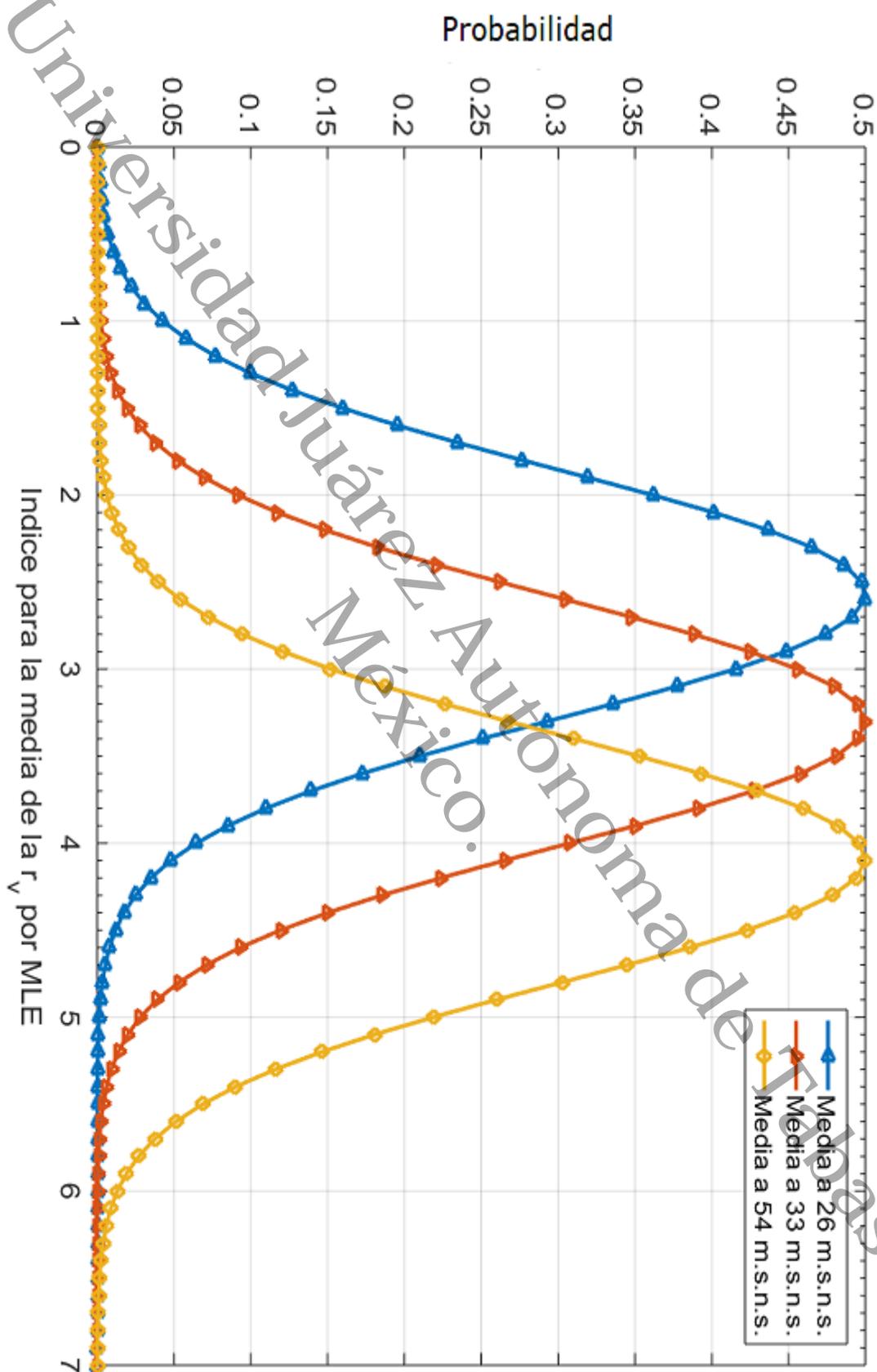


FIGURA 3.17: Obtención de la \bar{r}_v por máxima verosimilitud para Cuautemoczin I y II @ 26 m.s.n.s., 33 m.s.n.s. y 54 m.s.n.s.

TABLA 3.5: Modelación con PolyPI-7 para la $\overline{T_{air}}(d_v) = f(r_v) = 1.511e - 13 (r_v - a)(r_v - b)(r_v - c)(r_v - d)(r_v - e) + f$ para coeficientes (con límites de confianza en 95 %): para la función de dispersión $r_v - T_{air}$, ver Fig. 3.18

Parámetro	Valor del parámetro [-]	Rango de búsqueda y confianza [-]
a*	-144	(-167.5, -120.6)
b	85.62	(81.38, 89.85)
c*	-11.95	(-16.75, -7.158)
d	354.4	(352.9, 356)
e	247.9	(245.1, 250.6)
f	25.88	(25.8, 25.96)
SSE:	$4.371e + 05$	RMSE: 2.893
R ² :	0.04665	R ² _{ajustada} : 0.04656
*Complementario		

Se revisó el comportamiento de la temperatura T_{air} respecto de las d_v en los registros de todo el año para visualizar la variación de la ρ_{air} . Esta variable es proporcional a la EE aprovechable y su valor depende inversamente de la temperatura y directamente de la P_{atm} , ver Ec. 3.24. El procedimiento realizado consiste en hacer primero un análisis de sensibilidad. Este nos indica si existe alguna correlación entre la T_{air} y alguna de las demás variables registradas en la campaña de medición. Se encontró que la temperatura es mas dispersa o de mayor varibilidad a bajas velocidades de viento. La T_{air} varía entre 20° y 32° en las d_v de mayor frecuencia y v_v en el rango $[340^\circ-90^\circ]$. La T_{air} tiene una variación más alta en las d_v donde la v_v son más bajas y de menos frecuencia en el rango de $[90^\circ-340^\circ]$.

$$\rho_{air} = \frac{P_{atm}}{R T_{air}} \quad (3.24)$$

Donde:

ρ_{air} : densidad del aire [kg m^{-3}]; P_{atm} : presión atmosférica [Pa]; T_{air} : temperatura expresada en [K]; R : Constante del aire con valor de $287.05 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}$

La modelación de la d_v VS T_{air} fue realizada con diversos modelos que dieron en resumen valores de R^2 muy similares. La Tabla 3.5 muestra los parámetros del modelo de la $\overline{T_{air}}$ VS d_v realizado con PolyPI-7. La Fig 3.18 muestra el comportamiento de la $\overline{T_{air}}$ de acuerdo al modelo PolyPi-7 propuesto y desarrollado en este trabajo. En este caso no debe considerarse constante a la

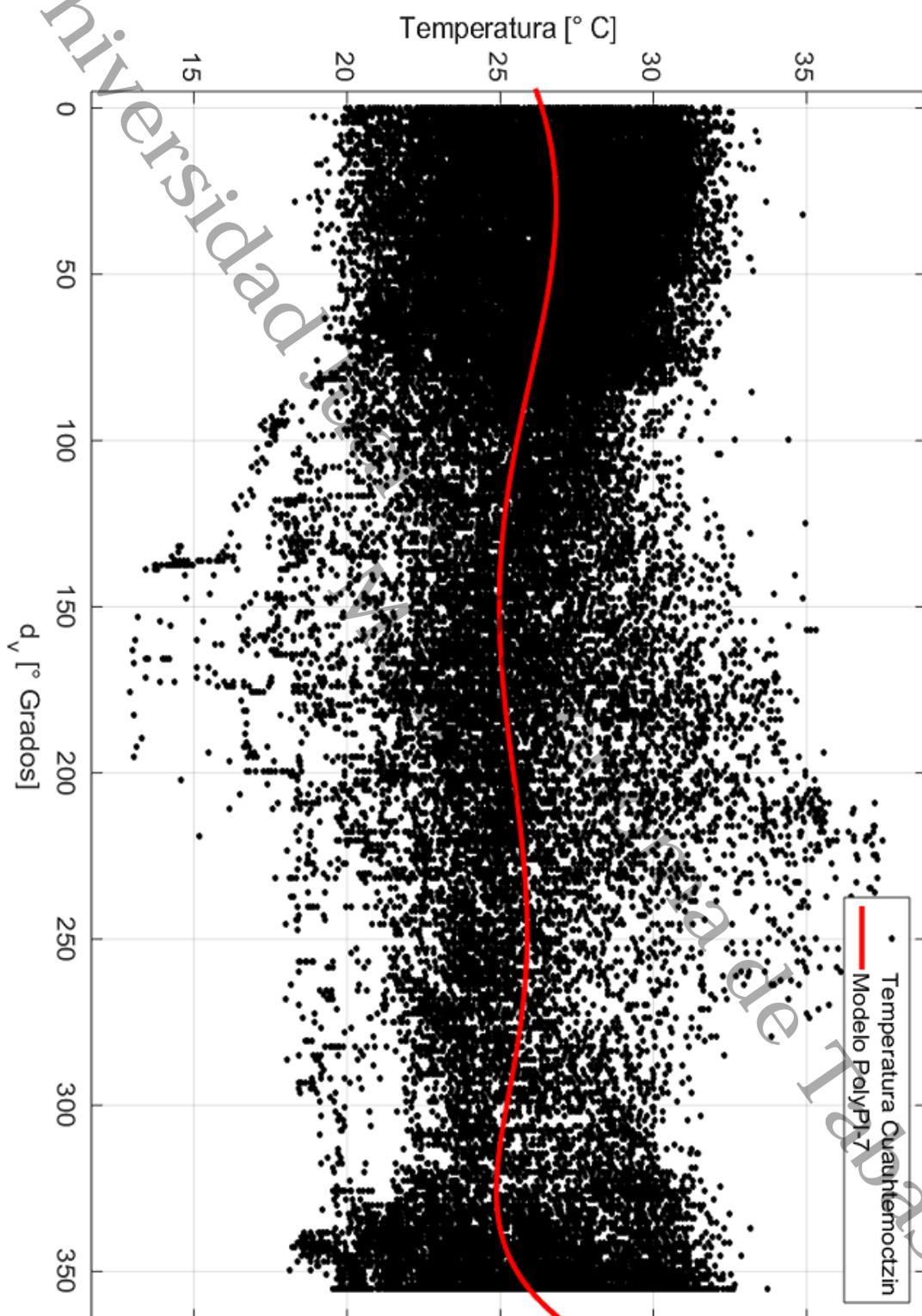


FIGURA 3.18: Modelo de la de $\overline{T_{air}} - d_v$ para Cuauhtemoczin II @ 26 m.s.n.s.

ρ_{air} . Esto es porque tanto T_{air} , P_{atm} y d_v varían a lo largo del día y el año. La T_{air} tiene correlación con la d_v como se observa en la Fig. 3.18 para este SE y es muy probable que para otros similares y cercanos mantenga esta relación.

En conclusión el montaje experimental y la definición de las metodologías de modelación permiten obtener resultados replicables. Después de la selección de sensores, registradores y el propio SE, la configuración en el montaje y guardado de registros es de norma. Después de comprobar que no ajustan el modelo de weibull de dos y tres parámetros o Rayleigh de dos parámetros a las distribuciones de densidad de probabilidad de viento. El desarrollo y prueba de modelos multimodales sobre Weibull se presenta en este capítulo como alternativa para modelar y lograr mejores ajustes. Se demostró que al incrementar el número de modos se puede lograr mejor ajuste a la distribución de las probabilidades de la velocidad del viento. El modelo alternativo multimodal Poly-Pi-N mostró ser versátil que es capaz de ajustar tanto a distribuciones de frecuencia como a densidades de probabilidades de la velocidad de viento. Aunque este modelo también se probó con diferentes variables meteorológicas dando mejores ajustes en algunos casos. La presentación y prueba de los modelos multimodales se realizó en este capítulo como preámbulo de su uso en los capítulos 4 y 5 para los dos sitios en experimentación.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Capítulo 4

Detalles de la energía eólica experimental en Cuauhtemoczin I

En este capítulo se desarrollan las experimentaciones y se ensayan las metodologías introducidas en el capítulo 3. Esto para Cuauhtemoczin I desde la modelación de la rapidez del viento mediante el modelo de Weibull y otros contrastado al modelo Weibull Bimodal. Se evalúa el recurso eólico mediante Weibull-2 Bimodal y se prueban los modelos multimodal para r_v y v_v como Weibull tetramodal y Poly-PI-N. Se realiza la evaluación energética, densidad de potencia y la producción de energía anual. Aquí se contrastan los modelos tradicionales, se ensayan y se valida el uso de los modelos multimodales desarrollados en este trabajo. Esto para demostrar que el uso de estos modelos alternativos dan mejor certidumbre de la evaluación del recurso eólico en cada SE.

4.1 Modelación de la rapidez del viento

La modelación del recurso eólico por décadas se ha realizado sobre la r_v , ver Cap. 2. A estos modelos en habla hispana se les ha denominado siempre modelos de la "velocidad del viento". Estrictamente la variable velocidad del viento debe tener: magnitud, dirección y sentido. Estas tres características se deben considerar o completar para representar un vector antes de modelarla para EE. Cuando se obtiene el modelo anual, semestral, estacional, trimestral o mensual de la r_v derivado de una campaña de medición, éste se toma de los registros cada 10 min. Éstos se adquieren desde un anemómetro y posteriormente se obtienen modelos que ajusten mejor a sus distribuciones. Los modelos mas empleados son: Weibull-2, Rayleigh, Normal, entre otros.

La norma IEC 61400-12-1 para verificación de eficiencia de *GTEs* recomienda hacer las evaluaciones con el modelo de Rayleigh. El modelo de Rayleigh es un caso especial de Weibull-2 donde su parámetro de forma $c_h = 2$, donde el subíndice h de aquí en adelante indica la altura de la medición que representa la base de datos para identificación simbólica.

Estos modelos deben ser identificados si son de un mes, un bimestre, una estación del año, un semestre, o de un año. Nótese que la base de datos de la r_v proveniente de un anemómetro incluye todas las direcciones de flujo de viento de un *SE* en una campaña de medición para la *ERESE*. Comúnmente esta variable es representada por un gráfico $r_v - kt \quad \forall k \in [0, 1, 2, \dots, N]$, ver Figs. 4.1 (a) y 4.2 (a). En la modelación la variable independiente r_v es discreta porque sus valores se guardan solo en tiempo discreto, en registros cada 10 min. En estas condiciones se considera de aquí en adelante como el "modelo de la rapidez del viento" cuando se modela su distribución de frecuencias o su densidad de probabilidad. En las Figs. 4.1 (a) y 4.2 (a) se muestran gráficos de los registros de la r_v cada 10 min con tasa de muestreo de 1 Hz, este gráfico completo representa ≈ 1 año (52 560 registros). Las Figs. 4.1 (b) y 4.2 (b) muestran el modelo de Weibull-2 mediante tres gráficos: la función de densidad de probabilidades, función de distribución acumulativa y el histograma de frecuencias de la r_v . Las mediciones y registros en Cuauhtemoczin I corresponden a las alturas 33 m.s.n.s. y 54 m.s.n.s.

En la *ERESE* para Cuauhtemoczin I los valores de los parámetros de escala y de forma en el modelo de Weibull-2 resultaron en $k_{33} = 1.37$, $c_{33} = 3.63 \text{ m s}^{-1}$, $k_{54} = 1.53$ y $c_{54} = 4.54 \text{ m s}^{-1}$, ver Tabla 4.1. En las Figs. 4.1 (b) y 4.2 (b) muestra que el ajuste del modelo es mejor a partir de 5 m s^{-1} mientras que en el rango entre 3 m s^{-1} y 5 m s^{-1} el ajuste es menor, pero dentro de un margen de seguridad o cautela.

Las Figs. 4.1 (c) y 4.2 (c) muestran la prueba de ajuste en las probabilidades de que se presenten valores de r_v en escala logarítmica o Q-Q. Para el "modelo de Weibull-2" en este caso resulta aceptable entre el segundo y tercer cuartil.

En las Figs. 4.1 (d) y 4.2 (d) se ensaya el mismo procedimiento de ajuste que en 4.1 (b) y 4.2 (b) pero con un modelo de "distribución de probabilidades Normal". Puede observarse que este modelo se desvía a partir de 5 m s^{-1} , contrariamente a Weibull-2. Por esta razón la "distribución Normal" de probabilidades no siempre es adecuada para modelar la rapidez del viento. Esto es porque por lo regular hay periodos de calma en la mayoría de los *SE* y el viento en zonas costeras presenta cambios de dirección locales.

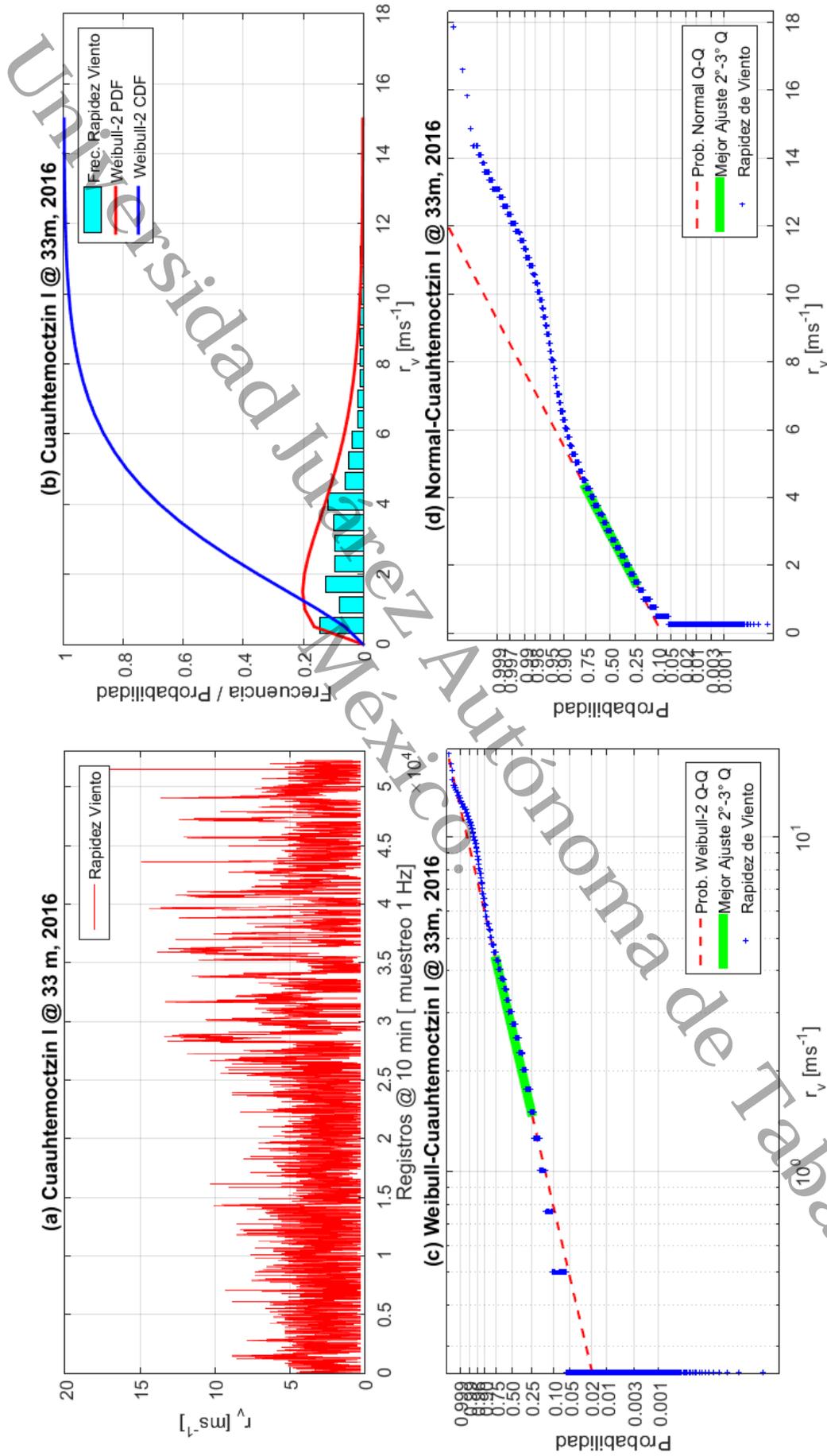


FIGURA 4.1: (a) Vista general de base de datos anual de la r_v , (b) modelo de Weibull-2 y distribución de frecuencias anual de la r_v en 16 bins, (c) Modelo Weibull-2 Q-Q y (d) Modelo Normal Q-Q anual para la r_v en Cuauhtemoczin I a 33 m.s.n.s.

Para propósitos de una ERESE el ajuste de los parámetros en el modelo de Weibull-2 es aceptable en algunos casos si solo se desean evitar los efectos de optimistas respecto a la disponibilidad de RE y para ser cautelosos respecto a los resultados, incluso para garantizar la tasa de retorno de la inversión (TRI). El modelo de Rayleigh se puede considerar entre Weibull y otros modelos que se puedan ajustar de mejor forma a la distribución de frecuencias del SE.

Tomando en cuenta que en muchos de los casos existen periodos de tiempo que fallan los anemómetros o veletas se hizo una prueba de sensibilidad para probar que tanto se afectan los parámetros de los modelos de las funciones de densidad de la probabilidad a 33 m.s.n.s. y 54 m.s.n.s. Este caso ocurre también cuando por alguna razón se presentan interrupciones en el registro de los datos por un periodo de tiempo como se ha reportado en [19]. Para esta prueba se eliminaron el $\simeq 9\%$ de los registros y se sustituyeron por números aleatorios con una media aproximada a los reales, ver Figs. 4.3 (a) y 4.4 (a). En esta prueba de modelación con Weibull-2 para Cuauhtemoczin I, los valores resultantes de los parámetros de escala $k_{33} = 1.46$, $k_{54} = 1.61$ y en los parámetros de forma respectivamente resultó en $c_{33} = 3.57 \text{ m s}^{-1}$, $c_{54} = 4.41 \text{ m s}^{-1}$ como puede observarse en las Figs. 4.3 (b) y 4.4 (b). Esta prueba mostró que la variación del parámetro k_{33} es del 6.02 % y en la k_{54} es de 4.63 %, la variación de c_{33} es del 1.60 % y la de c_{54} es del 2.80 % respecto a lo obtenido con los registros sin perturbación, ver 4.1 y 4.2 y comparaciones en Tabla 4.1.

Las Figs. 4.3 (b) y 4.4 (b) además de la función de densidad de probabilidades o PDF, también muestran la función de distribución acumulativa ó CDF tanto para 33 y 54 m.s.n.s. respectivamente. Estas figuras permiten comparar e identificar el rango de porcentajes en que la r_v es útil para aprovechar la EE en el SE. En estas figuras se incluyó el valor de los parámetros también con la finalidad de diferenciarlos de los gráficos resultantes de las bases de datos originales sin perturbaciones o modificaciones. Un comparativo detallado de los gráficos permite identificar que completar registros con errores de forma manual no afecta de gran forma los resultados de la modelación.

Uno de los indicadores valiosos de estos gráficos es que independientemente de la existencia de errores en algunos registros estos modelos no permiten ver las características del viento en el SE. Por ejemplo es posible identificar que más del 60 % del tiempo del año el viento tiene valores mayores a la moda de la \bar{r}_v en 33 m.s.n.s. y en la medición realizada en 54 m.s.n.s. estos valores son mayores a la \bar{r}_v .

La prueba de modelación de la distribución de frecuencias de r_v con el modelo de distribución Normal no es muy adecuada dado que no sigue la recta log-log

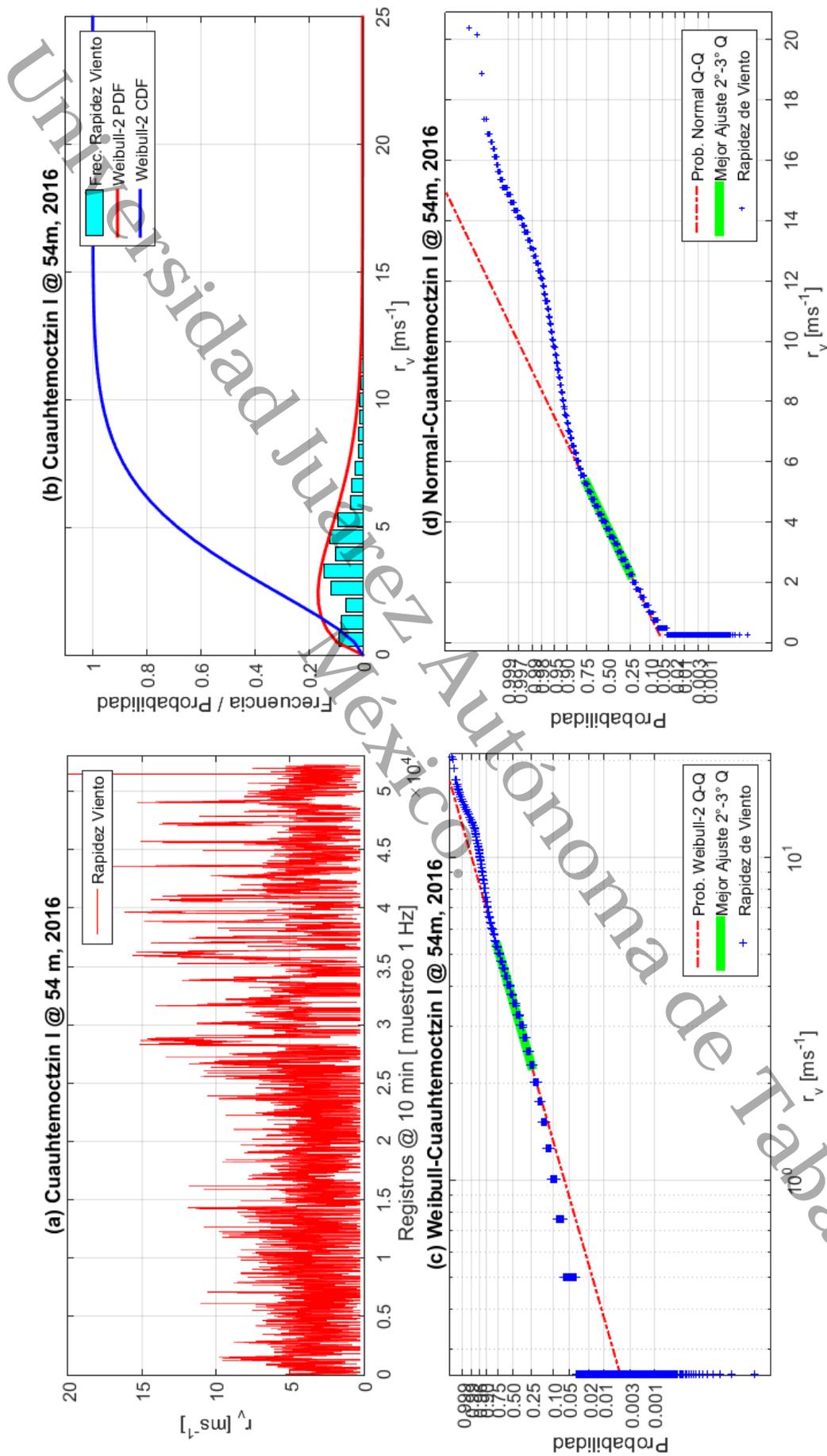


FIGURA 4.2: (a) Vista general de base de datos anual de la r_v , (b) modelo de Weibull-2 y distribución de frecuencias anual de la r_v en 16 bins, (c) Modelo Weibull-2 Q-Q y (d) Modelo Normal Q-Q anual para la r_v en Cuauhtemoc, México a 54 m.s.n.s.

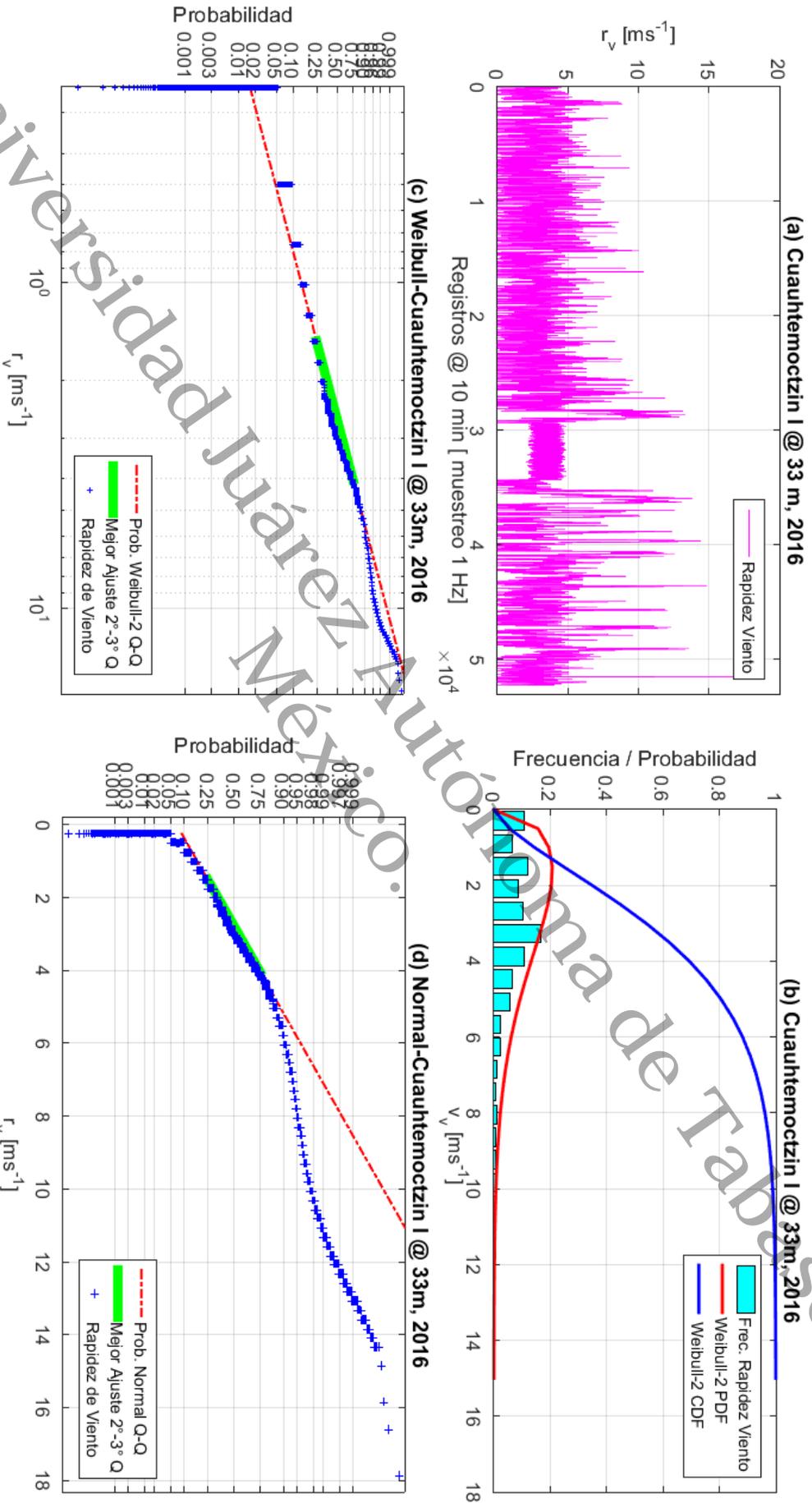


FIGURA 4.3: (a) Vista general de base de datos anual de la r_v con registros sustitutos en 9%, (b) modelo de Weibull-2, distribución acumulativa y distribución de frecuencias anual de la r_v en 16 bins, (c) Modelo Weibull-2 Q-Q y (d) Modelo Normal Q-Q anual para la r_v en Cuauhtemoczin I a 33 m.s.n.s.

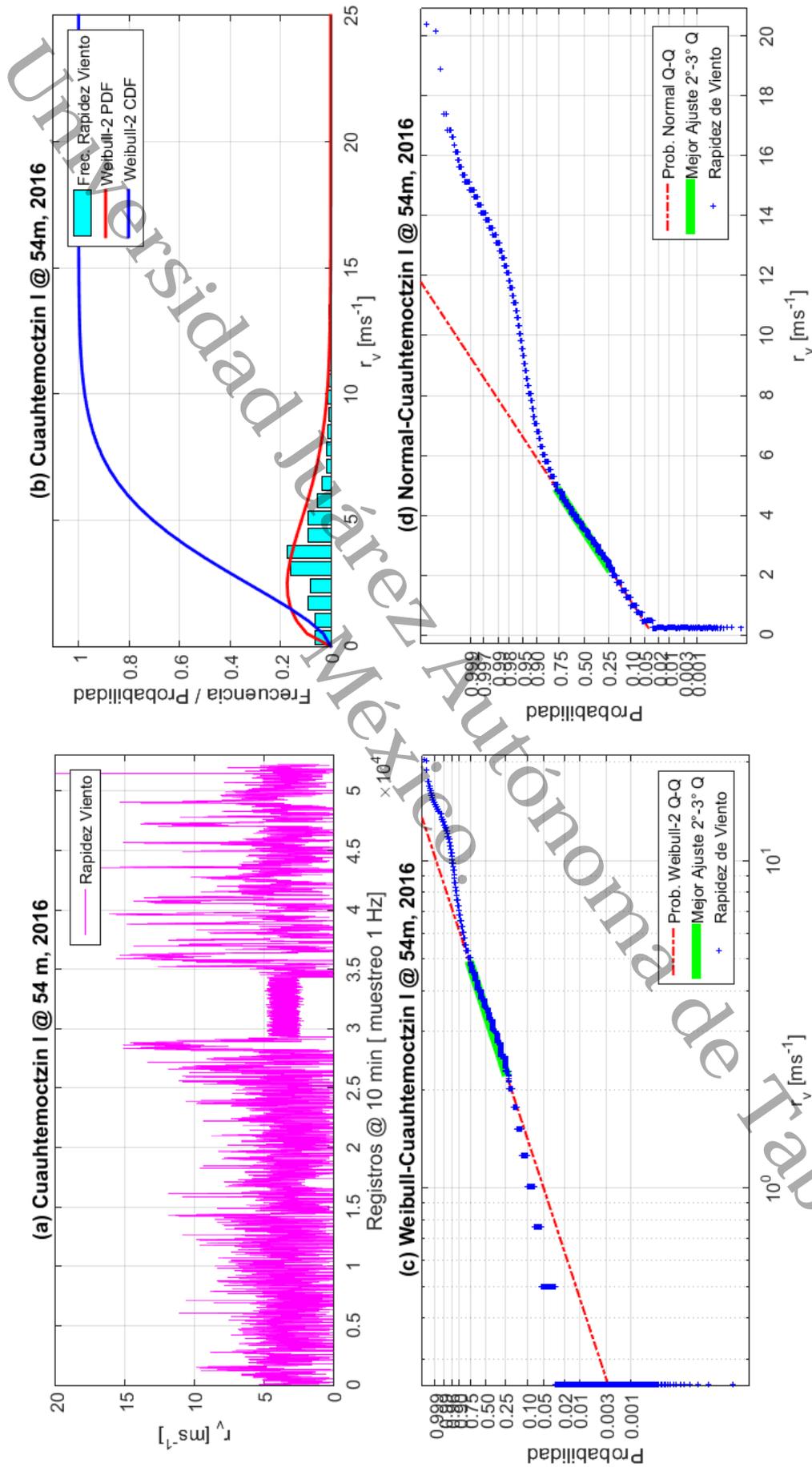


FIGURA 4.4: (a) Vista general de base de datos anual de la r_v con registros sustitutos en 9%, (b) modelo de Weibull-2, distribución acumulativa y distribución de frecuencias anual de la r_v en 16 bins, (c) Modelo Weibull-2 Q-Q y (d) Modelo Normal Q-Q anual para la r_v en Cuauhtemoczin I a 33 m.s.n.s.

TABLA 4.1: Resultados de ensayos de modelaciones Weibull-2 a diferentes alturas sin y con perturbación de registros en Cuauhtemoczin I, ver Figs. 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4.

Altura	Parámetros	Valor sin pert.	Valor con pert.	Unidades
33 m.s.n.s.	k_{33}	1.3730	1.4609	[-]
	c_{33}	3.6256	3.5676	m s^{-1}
54 m.s.n.s.	k_{54}	1.5328	1.6072	[-]
	c_{54}	4.5412	4.41	m s^{-1}

o Q-Q como se observa en la Figs. 4.3 (c) y 4.4 (c) debido a la asimetría de la distribución de frecuencias de la r_v .

Como conclusión para esta prueba y de acuerdo a la norma IEC 61400-12-1 es posible descartar parte de aquellos registros "dudosos" de r_v y hasta de sustituirlos por otros producidos de algún anemómetro de la misma estación anemométrica tomando solo en cuenta las medias de inicio y final sin que el resultado se afecte mucho. El valor de los parámetros de los modelos Weibull, Normal o Rayleigh se impacta muy poco con este procedimiento. Para realizar esta prueba se generaron y utilizaron valores aleatorios sintéticos para hacer más notoria la influencia de la modificación de los registros de la r_v y su impacto sobre los parámetros de los modelos obtenidos.

4.1.1 Modelo de Weibull y otros *versus* Weibull bimodal

En la práctica los modelos de Weibull o Rayleigh y otros como: Exponencial y Lognormal en su mayoría "no" ajustan a distribuciones de frecuencia de los registros r_v "velocidad" del viento. Lo hacen parcialmente sobre las funciones de densidad de probabilidades, ver Figs. 4.5 y 4.6. Para este caso el número de bins afecta la distribución de frecuencia y modifica el ajuste del modelo que se haya seleccionado. El modelo Kernel que se muestra en estas figuras es no-paramétrico y no se utiliza para la modelación de las distribuciones de frecuencia o densidad de la probabilidad de ocurrencia de la r_v o v_v .

Se realizó un comparativo del ajuste de los modelos obtenidos en este trabajo para las alturas de 33 m.s.n.s. y 54 m.s.n.s. mostrados en las Figs. 4.5 y 4.6 incluyendo los parámetros obtenidos en los tres modelos empleados se concluye lo siguiente:

1. El modelo Normal es más compatible con la media.
2. El modelo Rayleigh es más compatible con la moda.
3. El modelo Weibull-2 presenta una moda menor a la real.

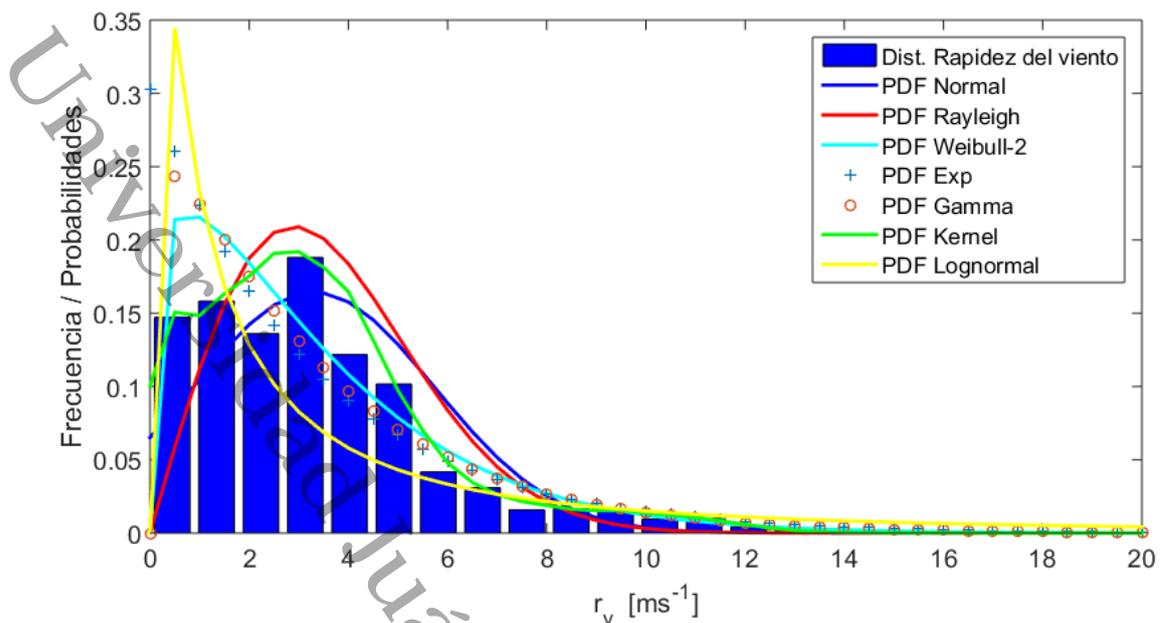


FIGURA 4.5: Comparativo de modelos Normal, Rayleigh, Weibull-2 y otros de funciones de densidad de la probabilidad en r_v para Cuauhtemoczin I en 33 m.s.n.s., ensayado en 16 bins, Kernel es un modelo No-Paramétrico.

4. El modelo Kernel logra el mejor ajuste no paramétrico.

Los parámetros que se determinaron para ajuste a las distribuciones de frecuencias de la r_v de 16 bins en alturas a 33 m.s.n.s. y 54 m.s.n.s. se muestran en la Tabla 4.2. Estos parámetros son específicamente para la sub-clasificación en 16 bins. Comparativamente los modelos Rayleigh y Kernel muestran mejor ajuste que los modelos Weibull y Normal probados previamente. La elección del número de bins cambia la forma de las distribuciones y por lo tanto afecta el ajuste del modelo que se elija. Esto puede verificarse al comparar los parámetros obtenidos en todos los modelos Weibull-2 presentados hasta aquí y en los ensayos siguientes, ver Tablas 4.1 y 4.2.

La modelación no paramétrica fue probada en los ensayos con funciones de densidad Kernel o (KDF), específicamente con Epanechnikov = $0.75(1 - \mu)I(|\mu \leq 1|$ [70]. Donde la μ : es la media de la población de los registros empíricos de la r_v o v_v .

El uso del modelo Weibull-2 bimodal es para conseguir un mejor ajuste de la modelación sobre la distribución de frecuencias de la r_v . La bimodalidad en Weibull-2 está relacionada en la distribución Binomial, Bernoulli, Poisson y la distribución de Weibull-2. Esto hace que aparezca un tercer parámetro en el modelo de Weibull-2 por cada término. Este parámetro tiene el valor de la probabilidad por cada uno de los términos modales de Weibull-2. Así para el

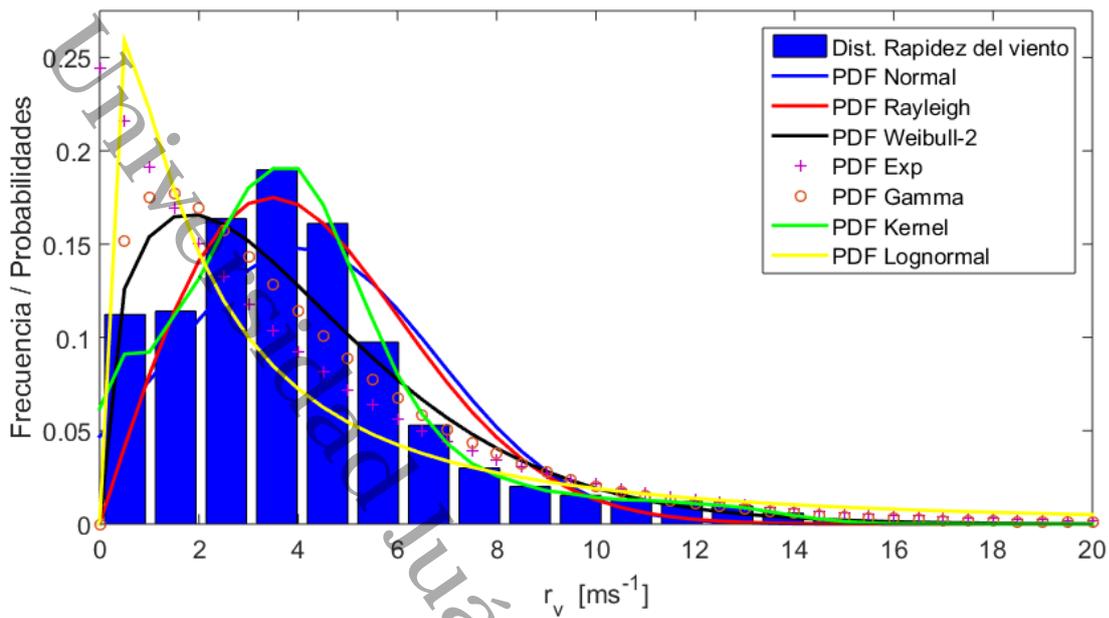


FIGURA 4.6: Comparativo de modelos Normal, Rayleigh, Weibull-2 y otros de funciones de densidad de la probabilidad en r_v para Cuauhtemoczin I en 54 m.s.n.s., ensayado en 16 bins, Kernel es un modelo No-Paramétrico.

TABLA 4.2: Modelos Weibull-2, Rayleigh, Normal y otros para las funciones de densidad de Probabilidades (PDF) de la r_v , ver Figs. 4.5 y 4.6.

Altura de medición (h) [m]	Modelo (PDF)	Número de (bins)	Parámetro de forma (k), [-]	Parámetro de escala (c), [ms ⁻¹]
33 m.s.n.s.	Normal	(16)	*3.30348	**2.42811
	Rayleigh	(16)	2.89902	2.0000
	Weibull-2	(16)	1.19484	3.46983
	Exponencial	(16)	3.30348	-
	Gamma	(16)	1.13587	2.90806
	Kernel	(16)	***	0.270017
	Lognormal	(16)	0.694123	1.55503
	Poison	(16)	3.30348	-
54 m.s.n.s.	Normal	(16)	*4.09096	**2.69963
	Rayleigh	(16)	3.46582	2.0000
	Weibull-2	(16)	1.40085	4.4276
	Exponencial	(16)	4.09096	-
	Gamma	(16)	1.46812	2.78653
	Kernel	(16)	***	0.270017
	Lognormal	(16)	1.03106	1.32923
	Poison	(16)	4.09096	-
* μ :	media	** σ :	desviación	estandar
***Kernel:	NP	Epanechnikov		

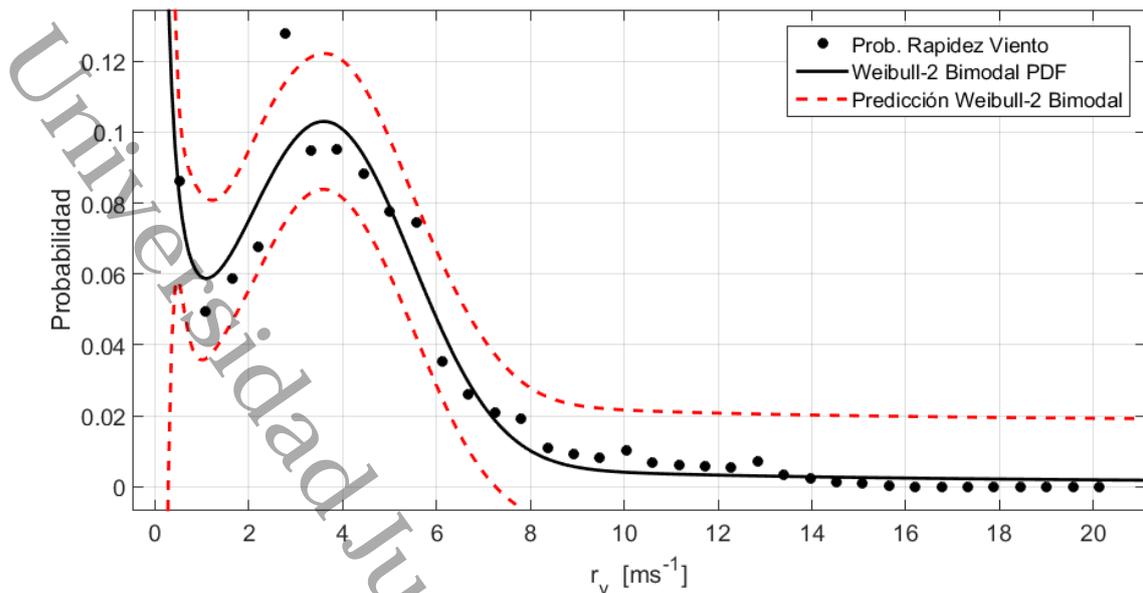


FIGURA 4.7: Modelo de Weibull-2 bimodal para la r_v en Cuauhtemotzin I a 54 m.s.n.s., ensayado con 36 bins (sub-clases).

primer término modal se le da un valor de probabilidad $p_{r_v}(1)$, para el segundo término modal del mismo modelo Weibull-2 bimodal es $p_{r_v}(2) = 1 - P_{r_v}(1)$. Estos términos son el tercer parámetro de cada término modal del modelo Weibull-2 bimodal, ver mas adelante Ec. 4.1.

Comparativamente al incrementarse el número de bins le exige más términos al modelo que se elija para ajustarse a la distribución de frecuencias de la r_v en términos de la densidad de la probabilidad para r_v , ver Figs. 4.7 y 4.8. La Fig. 4.7 se modeló con Weibull-2 bimodal sobre una distribución de 36 bins (se eliminaron las barras para hacer más visible el ajuste). La Fig. 4.8 es para la misma base de registros que el anterior (a 54 m.s.n.s.) y se modeló para su comparación con solo 20 bins. Aquí más puntos son coincidentes con la modelación en 36 bins, ver Tabla 4.3. El valor de R^2 se incrementa con la reducción de bins como se mencionó antes, ver Tabla 4.3.

En conclusión a este tema, al comparar modelos debe hacerse sobre distribuciones que contengan el mismo número de bins. Incrementar el número de bins reduce el índice de la correlación entre el modelo y la distribución experimental.

4.2 Evaluación del recurso eólico

La ERESE requiere de contar con los registros de medición de por lo menos un año aproximadamente del SE. Las variables deben permitir determinar

TABLA 4.3: Modelación Weibull-2 Bimodal de la r_v a 54 m.s.n.s en 36 bins (sub-clases) y 20 bins con la forma $\mathcal{F}_{2W}(r_v) = e^{\left(\frac{k_1}{c_1}\right)\left(\frac{r_v}{c_1}\right)^{(k_1-1)} \exp\left(-\left(\frac{r_v}{c_1}\right)^{k_1}\right)} + f\left(\frac{k_2}{c_2}\right)\left(\frac{r_v}{c_2}\right)^{(k_2-1)} \exp\left(-\left(\frac{r_v}{c_2}\right)^{k_2}\right)$: función de densidad de probabilidades para coeficientes con límites de confianza y predicción en 95 % de la r_v , ver Figs. 4.7 y 4.8, ver Apdo. 4.2.1.1.

Ensayo Número de bins	Parámetro	Valor del parámetro [-]	Rango de búsqueda y confianza [-]
36 bins	k_1	0.05156	(-9.007, 9.11)
	c_1	8.74	(-4091, 4108)
	k_2	2.642	(2.068, 3.216)
	c_2	4.435	(4.191, 4.679)
	e	2.098	(-365.7, 369.8)
	f	0.3869	(0.2734, 0.5004)
Índices de ajuste	SSE:	0.002084	RMSE: 0.008334
	R^2 :	0.9558	$R^2_{ajustada}$: 0.9484
20 bins	k_1	1	(fijado al límite)
	c_1	4.784	(2.123, 7.445)
	k_2	2.62	(1.842, 3.397)
	c_2	4.422	(3.992, 4.851)
	e	0.4817	(0.1651, 0.7983)
	f	0.5639	(0.3321, 0.7958)
Índices de ajuste	SSE:	0.003236	RMSE: 0.01469
	R^2 :	0.9605	$R^2_{ajustada}$: 0.95
e:	Prob. modo 1	f:	Prob. modo 2

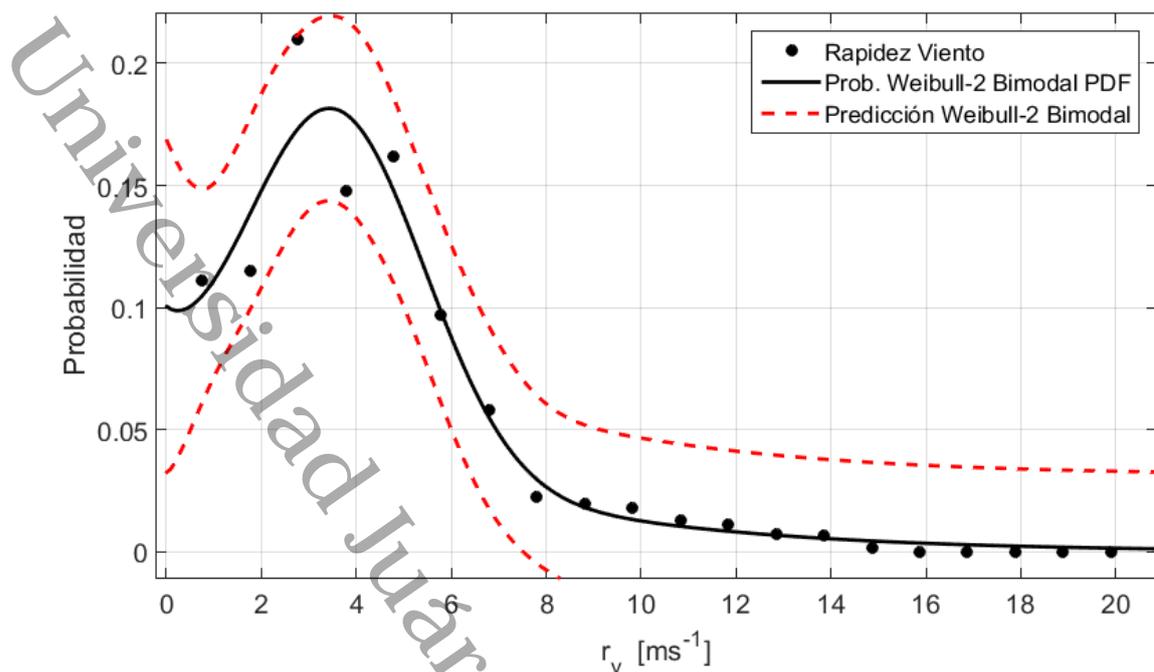


FIGURA 4.8: Modelo de Weibull-2 bimodal para la r_v en Cuauhtemotzin I a 54m.s.n.s., ensayado con 20 bins (sub-clases).

con precisión las dinámicas del flujo de viento. Las variables que se deben haber medido son: d_v ; r_v ; T_{air} ; HR ; p_{atm} entre otras. Las dos primeras variables deben ser adquiridas a la altura donde se colocará el buje del *GTE*. El resto de variables convenientemente se miden a una altura relativa y próxima a las dos primeras. Cada registro debe tener asociado una fecha y hora de registro.

Para esta investigación la medición de cada variable fue realizada con una frecuencia de muestreo de 1 Hz, ver Cap. 3. Se obtuvieron las medias de cada variable desde 600 muestras cada 10 min. Una vez aclarado esto se procede a determinar las medias de la variable \bar{v}_v (comúnmente se realiza sobre la \bar{r}_v) por lo que seguiremos el procedimiento acostumbrado con esta variable. Las medias de cada variable son tomadas de las medias de cada 10 min de seis registros consecutivos que completan los 60 min que completa 1 h. Esto reduce el número total de registros. Un procedimiento alternativo es tomar los registros tal como se tienen y al final dividir por seis obteniendo con esto el mismo resultado. La idea final es poder obtener el valor estimado mejor ajustado de la energía en [kWh] ya que es la unidad estándar para cuantificar la energía eléctrica.

El Apdo. 3.4 es la referencia para la aplicación de las fórmulas que pueden simplificar o soportar algún otro procedimiento complementario para la *ERESE*. La utilización de un valor único en la \bar{r}_v o \bar{v}_v en la *ERESE* debe

considerarse incorrecto. Esto se demostró en los Apdos. 3.3 y 3.4 ya que dichas medias no son adecuadas para caracterizar un año completo de registros. El resultado de la ERESE no es representativo usando alguna de las medias fijas obtenidas con cálculos estadísticos desde los registros. Esto es porque dependiendo de la d_v y de la época del año la \bar{r}_v cambia como se demostró en el Cap. 3. También es porque el valor de la $P(r_v)$ es una función cúbica de la r_v o de la v_v y utilizando una media anual única dará resultados que se clasifican por debajo de su valor real.

Cuando se cuenta con registros confiables se puede realizar la ERESE directamente desde los registros como se muestra al final del capítulo y que es la práctica más segura cuando la estimación energética eólica es a posteriori. Cuando se tiene un modelo debidamente ajustado los resultados que se obtienen por ambas metodologías deben ser muy parecidos y directamente correlacionados con el valor de R^2 que se haya verificado para el modelo.

Este trabajo aborda el desarrollo de una metodología que garantice con mayor certidumbre, precisión y factibilidad de su aplicación práctica, con accesibilidad técnica. Se investigó la variación de la ρ_{air} dado que esta influye directamente en la magnitud de la P_{disp} y EE del SE de acuerdo con la Ec. 4.4 que se utiliza en el Apdo. 4.3.2 para la Evaluación Energética.

Las Figs. de la 4.9 a la 4.12 confirman que la ρ_{air} tiene una variación importante respecto a la r_v . Las modelaciones en estas figuras demuestran que también hay versatilidad de PolyPI-N para ajustarse a las medias móviles de variables físicas. En este caso se analizó sobre la $\bar{\rho}_{air}$ como referencia porque su variación impacta en la P_{v_v} . El desempeño de PolyPI-N se comparó al mejor modelo paramétrico (Fourier-N) que se probaron previamente en los ensayos realizados en esta investigación. Es importante notar que los valores que R^2 están en el orden de 0.06 a 0.08 porque el ajuste se realiza sobre gráficos de dispersión de datos. Esto es porque se optó por hacer un análisis de sensibilidad de las variables involucradas que es más apropiado hoy día. En este caso para obtener un modelo de las $\bar{\rho}_{air}$ versus r_v . Es importante recordar que la \bar{r}_v depende de la d_v como se demostró en el Cap. 3.

Las Figs. 4.9 y 4.10 muestran las modelaciones de la media móvil de la ρ_{air} mientras que las modelaciones de las distribuciones de frecuencias de $\bar{\rho}_{air}$ y de sus funciones de densidad de la probabilidad o PDF de la $\bar{\rho}_{air}$ son mostradas en las Figs. 4.11 y 4.12.

La Tabla 4.4 muestra los valores de los parámetros de ajuste de los modelos representados en las Figs. 4.9 y 4.10. La Tabla 4.5 muestra los parámetros de ajuste de los modelos presentados en las Figs. 4.11 y 4.12. Se ensayaron varias configuraciones del modelo PolyPI-N usando grado de multiplicidad modal

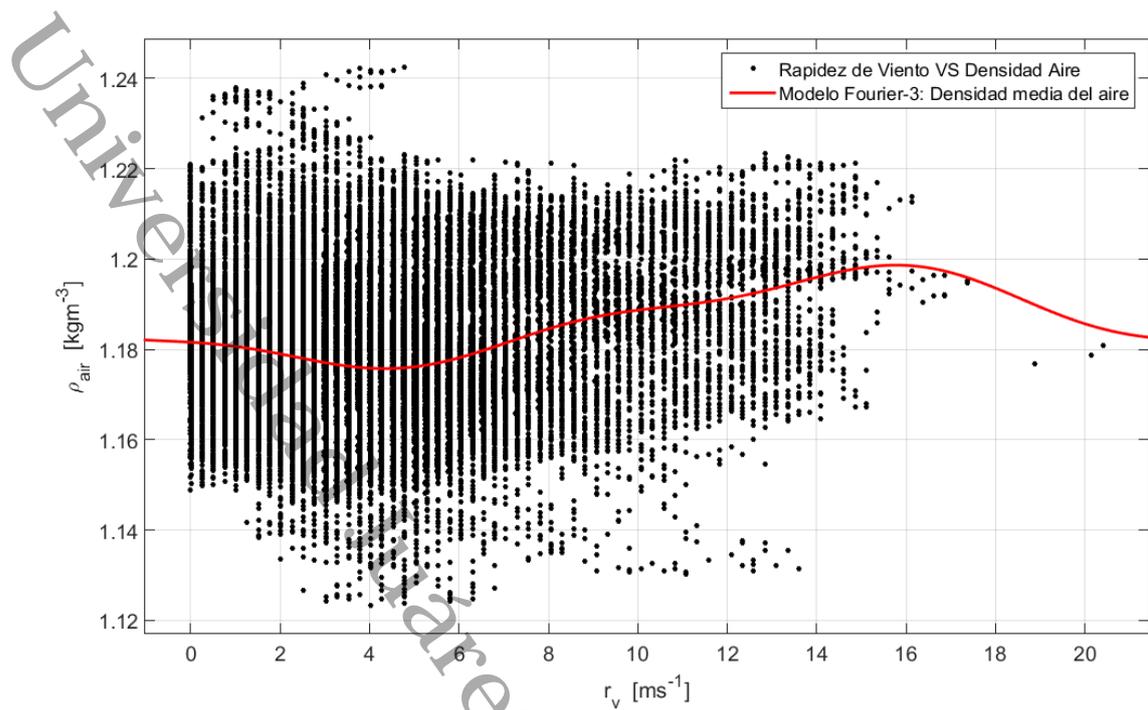


FIGURA 4.9: Modelación de la $\overline{\rho_{air}}$ móvil para Cuauhtemotzin I mediante un modelo de Fourier-3 de ocho parámetros.

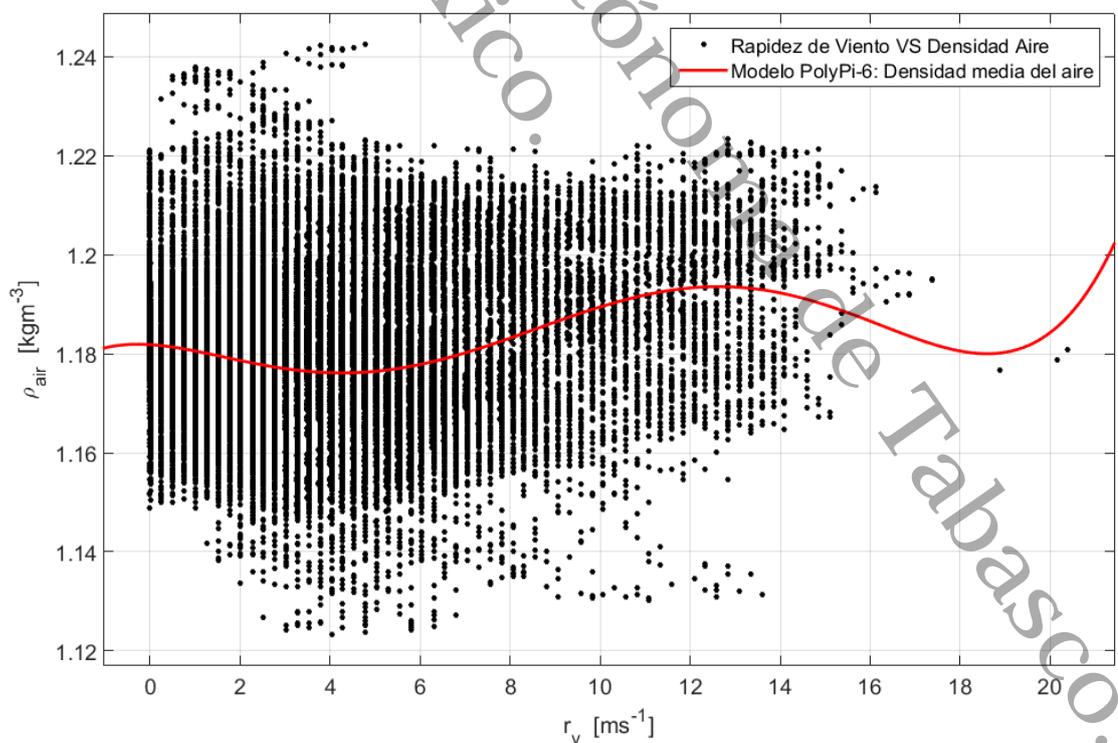


FIGURA 4.10: Modelación de la $\overline{\rho_{air}}$ móvil para Cuauhtemotzin I mediante un modelo PolyPi-6 de siete parámetros.

TABLA 4.4: Resultados comparativos en el desempeño de Modelación de la $\overline{\rho_{air}}$ utilizando PolyPI-6 en la forma $f(x) = \lambda a(x-b)(x-c)(x-d)(x-e)^2 + f$ con grado 2 de multiplicidad modal *versus* el modelo de Fourier-3 con la forma: $f(x) = a_0 + a_1 \cos(xw) + b_1 \sin(xw) + a_2 \cos(2xw) + b_2 \sin(2xw) + a_3 \cos(3xw) + b_3 \sin(3xw)$, donde $x = \rho_{air}$ y $f(x)$: función de la $\overline{\rho_{air}}$ móvil, ver Figs. 4.9 y 4.10.

Ensayo Modelo/ Altura	Parámetro	Valor del parámetro [-]	Rango de búsqueda y confianza [-]
Fourier-3 / 54 m.s.n.s.	a_0	1.186	(1.185, 1.188)
	a_1	-0.006065	(-0.009578, -0.002551)
	b_1	-0.007772	(-0.01081, -0.004739)
	a_2	-0.0003068	(-0.001958, 0.001345)
	b_2	0.0007995	(-0.001252, 0.002851)
	a_3	0.001549	(-0.0004532, 0.003551)
	b_3	0.001317	(0.0002023, 0.002433)
	w	0.2707	(0.2292, 0.3123)
Índices de ajuste	SSE:	10.81	RMSE: 0.01438
	R^2 :	0.06667	$R^2_{ajustada}$: 0.06655
PolyPI-6 / 54 m.s.n.s.	λ	2	(fijado al límite)
	a	2.095e-07	(1.726e-07, 2.465e-07)
	b	-1.408	(-1.918, -0.8977)
	c	1.298	(1.174, 1.421)
	d	6.934	(6.836, 7.032)
	e	18.6	(18.11, 19.1)
	f	1.18	(1.205, 1.228)
Índices de ajuste	SSE:	10.83	RMSE: 0.0144
	R^2 :	0.06441	$R^2_{ajustada}$: 0.06434

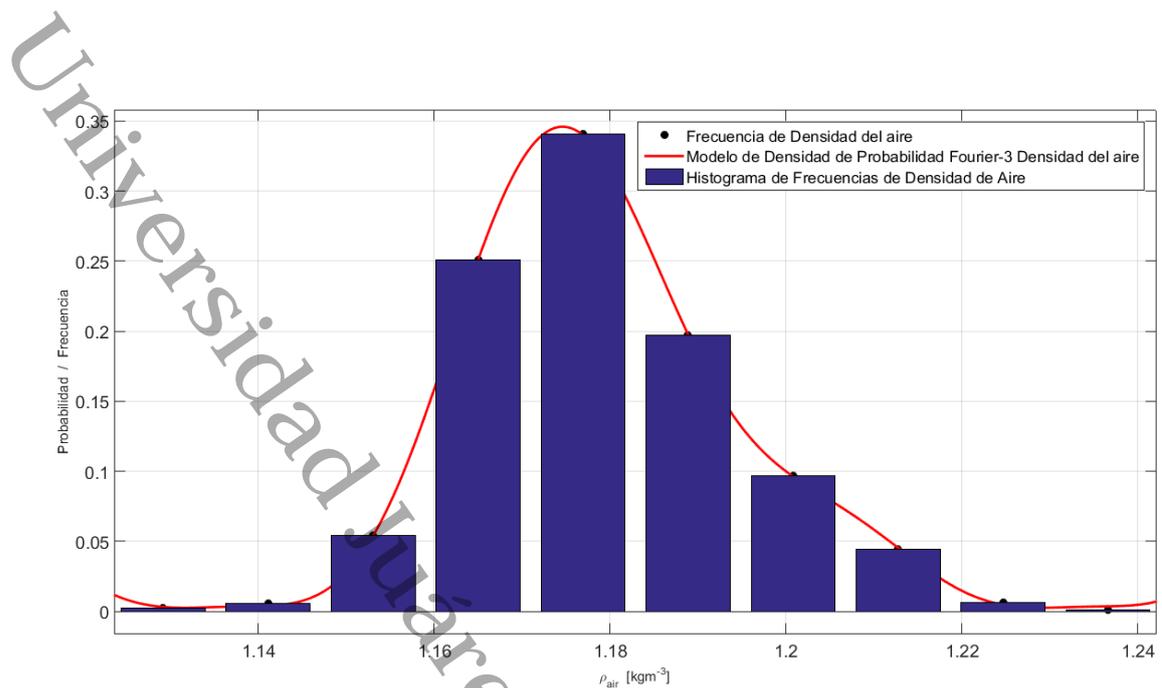


FIGURA 4.11: Modelación de la función de Densidad de la probabilidad de la ρ_{air} para Cuauhtemoczin I mediante un modelo Fourier-3 de ocho parámetros.

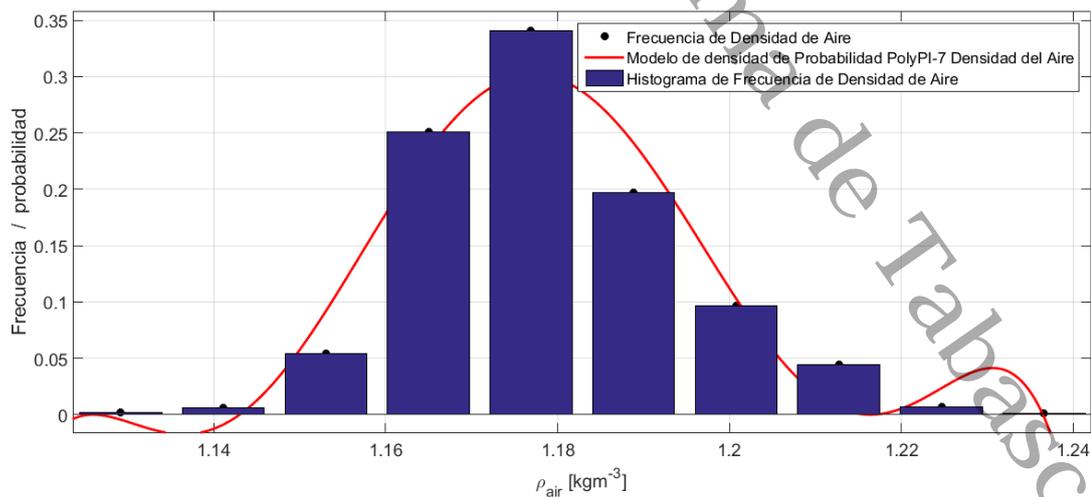


FIGURA 4.12: Modelación de la ρ_{air} para Cuauhtemoczin I mediante un modelo PolyPi-7 de ocho parámetros.

TABLA 4.5: comparación en el desempeño de la Modelación de la función de densidad de probabilidades que ajusta a la distribución de frecuencias de la ρ_{air} utilizando PolyPI-N en la forma $f(x) = \lambda (x - a) (x - b) (x - c) (x - d) (x - e) (x - f)^2 + g$ con multiplicidad de modos y utilizando modelo de Fourier3 $f(x) = a_0 + a_1 \cos(xw) + b_1 \sin(xw) + a_2 \cos(2xw) + b_2 \sin(2xw) + a_3 \cos(3xw) + b_3 \sin(3xw)$, donde $x = \rho_{air}$ y $f(x)$: función de densidad de probabilidades, ver Figs. 4.11 y 4.12.

Ensayo Modelo/ Altura	Parámetro	Valor del parámetro [-]	Rango de búsqueda y confianza [-]
Fourier-3 / 54 m.s.n.s.	a_0	0.1218	(0.1037, 0.1398)
	a_1	0.1282	(-0.8615, 1.118)
	b_1	0.08565	(-1.404, 1.575)
	a_2	0.04409	(-0.7184, 0.8066)
	b_2	0.03284	(-0.9762, 1.042)
	a_3	0.01342	(-0.4996, 0.5265)
	b_3	0.01448	(-0.4483, 0.4772)
	w	64.52	(54.64, 74.39)
Índices de ajuste	SSE:	1.505e-05	RMSE: 0.002743
	R^2 :	0.9999	$R^2_{ajustada}$: 0.9995
PolyPI-7 / 54 m.s.n.s.	λ	1.234567e+7	(fijado al límite)
	a	1.144	(1.129, 1.159)
	b	1.13	(1.112, 1.148)
	c	1.115	(1.013, 1.217)
	d	3.953	(-1.519, 9.424)
	e	1.236	(1.229, 1.244)
	f	1.216	(1.205, 1.228)
	g	1e+05	(1e + 04, 1e + 07)
Índices de ajuste	SSE:	0.007008	RMSE: 0.04186
	R^2 :	0.9469	$R^2_{ajustada}$: 0.8805

en los ensayos anteriores. Este grado de multiplicidad esta sustentada en la existencia de valores característicos múltiples o repetidos desde un polinomio característico de un proceso físico dado. Se concluye hasta aquí para el caso de la ρ_{air} que el modelo de Fourier-3 de 8 parámetros ajusta mejor que PolyPI-6 de 7 parámetros y PolyPI-7 de 8 parámetros para estos dos casos de modelación. Esto da oportunidad de trabajos futuros que encuentren la forma de mejorar en escoger el polimorfismo del modelo más adecuado para lograr mejores ajuste a registros empíricos diversos.

El diagrama de Flujo de la metodología general empleada en esta investigación refleja todas las actividades propuestas y desarrolladas, ver Fig. 4.13. La modelación por Multi Gene genetic programming *MGGP* que ahí aparece fue ya publicada en uno de los artículos. En esta tesis solo se versa sobre resultados

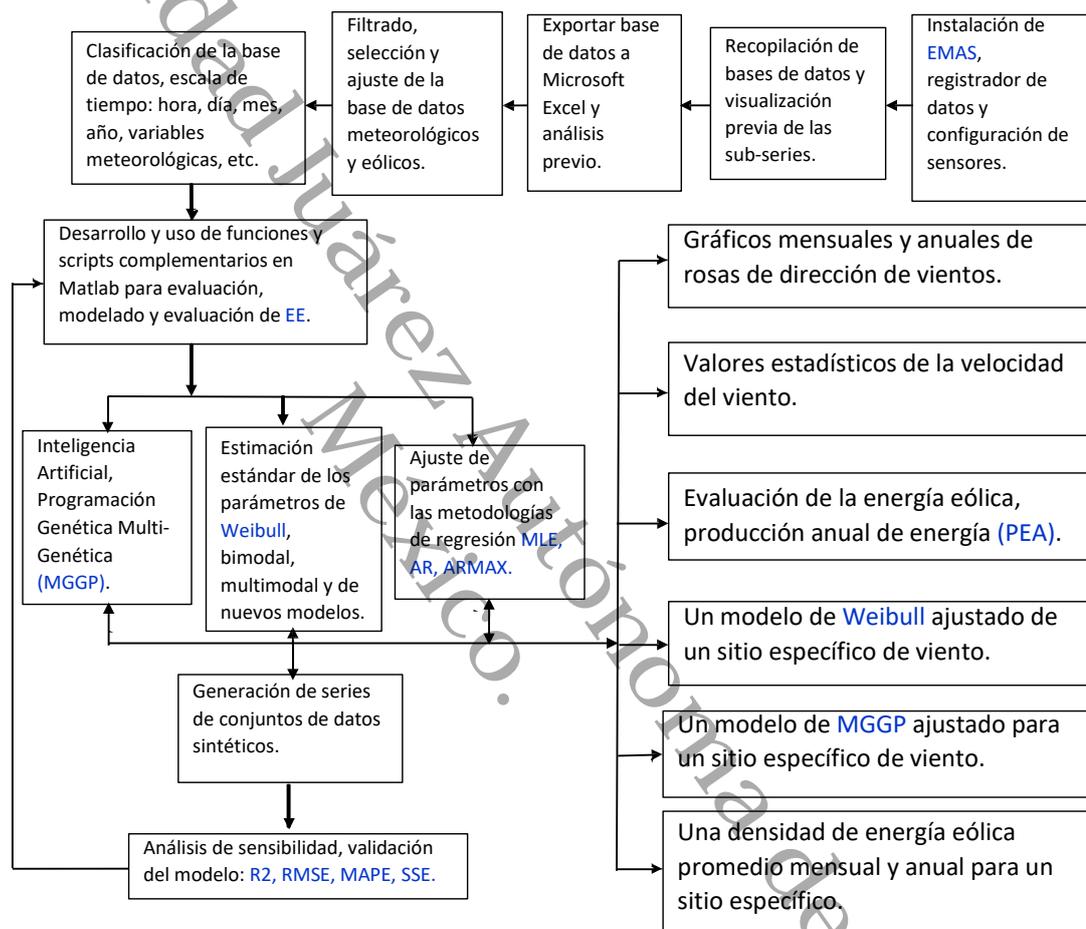


FIGURA 4.13: Diagrama de Flujo de la metodología para estimar el RE y parámetros del modelo.

inéditos no publicados aún.

4.2.1 Modelo eólico de un sitio específico: Caso Cuauhtemocztzin I

El modelo eólico ya sea representado en Weibull-2, Rayleigh u otro para Cuauhtemocztzin I de forma estandar son aceptados en la comunidad de ERESE. Estos pueden realizarse con funciones de densidad de probabilidades o PDF Weibull-2 o PDF Rayleigh de acuerdo a IEC como ya se presentó antes, ver Fig. 4.5 y 4.6 en los Apdos. 4.1 y 4.1.1. En estos apartados de forma previa se muestran resultados estándar de la modelación eólica de Cuauhtemocztzin I.

El comparativo ilustrado previamente en las Figs. 4.5, 4.6 y Tabla 4.2 se sintetiza en cuatro observaciones como sigue:

1. Ninguno de los modelos paramétricos empleados ajusta completamente a la distribución de frecuencias de la r_v .
2. El mejor ajuste de los modelos paramétricos está en el modelo de Rayleigh.
3. La modelación se realiza por convención sobre la r_v y no sobre v_v .
4. El modelo Kernel no paramétrico tiene el mejor ajuste de todos.

4.2.1.1 Modelo Weibull-2 bimodal

El modelo Weibull-2 bimodal ha sido utilizado en el pasado para representar y modelar al menos dos d_v dominantes de la r_v en zonas costeras como "La Venta" en Oaxaca entre otros sitios del mundo, ver Ec. 4.1, [68, 69]. Después de la revisión de artículos relacionados al tema se verificó que aun utilizando el modelo bimodal no se logran ajustes tan precisos en la función de densidad de la probabilidad de las variables de viento y no ajustan a la distribución de frecuencias dado el rango y dominio de estos. Para verificar el ajuste Bimodal a los registros de Cuauhtemocztzin I en 33 m.s.n.s. y 54 m.s.n.s. se ensayó previamente el modelo PDF-Weibull-2 Bimodal sobre la base de datos sin seleccionar manualmente los modos de flujo dominantes de viento como en Jaramillo y Borja [69]. La Ec. 4.1, la Tabla 4.3, las Figs. 4.7 y 4.8 verifican lo anterior. Es posible encontrar otras versiones o formas del modelo bimodal de Weibull-2, sin embargo, se aclara que la Ec. 4.1 se eligió para estos ensayos.

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_{2W}(r_v) = & p_{r_v}(1) \left(\frac{k_1}{c_1}\right) \left(\frac{r_v}{c_1}\right)^{(k_1-1)} \exp\left[-\left(\frac{r_v}{c_1}\right)^{k_1}\right] \\ & + p_{r_v}(2) \left(\frac{k_2}{c_2}\right) \left(\frac{r_v}{c_2}\right)^{(k_2-1)} \exp\left[-\left(\frac{r_v}{c_2}\right)^{k_2}\right] \end{aligned} \quad (4.1)$$

Donde:

$\mathcal{F}_{2W}(r_v)$: modelo Weibull-2 bimodal de la r_v ; $p_{r_v}(1)$: probabilidad del flujo de viento dominante o de modo 1 de ocurrencia de la r_v ; $p_{r_v}(2) = 1 - p_{r_v}(1)$: probabilidad de flujos complementarios de viento o del modo 2 de ocurrencia de la r_v .

Las modelaciones por Weibull-2 bimodal con 20 bins tienen mejor ajuste que con 36 bins debido a la mayor densidad de registros por cada subclase y son mejores que con 10-16 bins como es práctica común en las *ERESE*, ver Figs. de la 4.1 a la 4.4. El ajuste de Weibull-2 bimodal tiene mejor ajuste a mayor altura en Cuauhtemoczin. Esto se puede explicar parcialmente por el efecto de que la turbulencia es menor y el flujo de viento es mas definido, por la menor influencia del terreno. La Tabla 4.8 muestra los ajustes de los parámetros de Weibull-2 bimodal que se indican en las Figs. 4.14 y 4.15.

4.3 Modelos Lopman-Multimodal para r_v y v_v

En este trabajo se desarrollaron otros modelos para lograr ajustes más adecuados de las distribuciones de frecuencia de la r_v o la v_v y otras variables de la *ERESE*. Con mayor número de bins y otros periodos de tiempo se logra esto, como se mostró previamente. Los modelos de viento antes ensayados ajustan parcialmente a las funciones de densidad de probabilidades de la r_v y no son capaces modelar la función de distribución de frecuencia de estos. En esta tesis la Ec. 4.2 fue desarrollada, ensayada y verificada tanto en las distribuciones de frecuencia de la r_v de las dos estaciones de Cuauhtemoczin como en las funciones de densidad de probabilidades. Este modelo lo hemos bautizado Modelo Tetra-modal de Weibull-2 dada la estructura que se muestra en la Fig. 4.2. En el caso particular de este Apdo. se presenta como evidencias en las Figs. 4.16 y 4.17 para alturas de 33 m.s.n.s. y 54 m.s.n.s. en Cuauhtemoczin I.

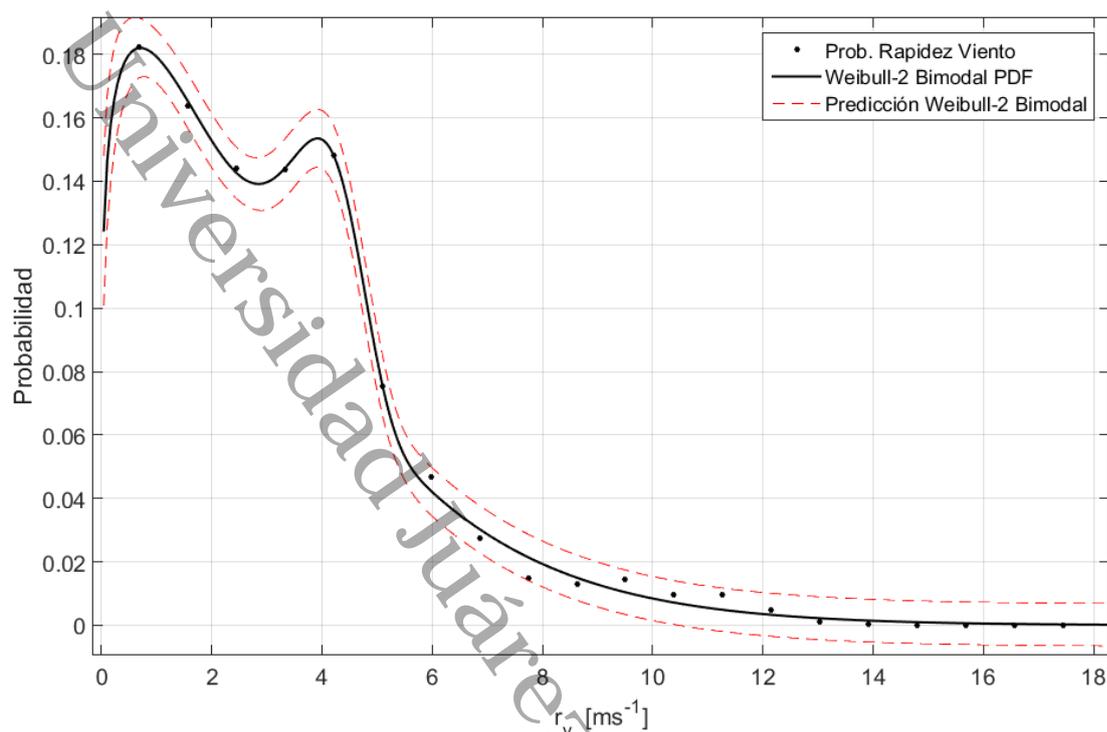


FIGURA 4.14: Modelo PDF-Weibull-2 bimodal para la r_v en Cuauhtemoczin I en 33 m.s.n.s., ensayado en 20 bins (sub-clases).

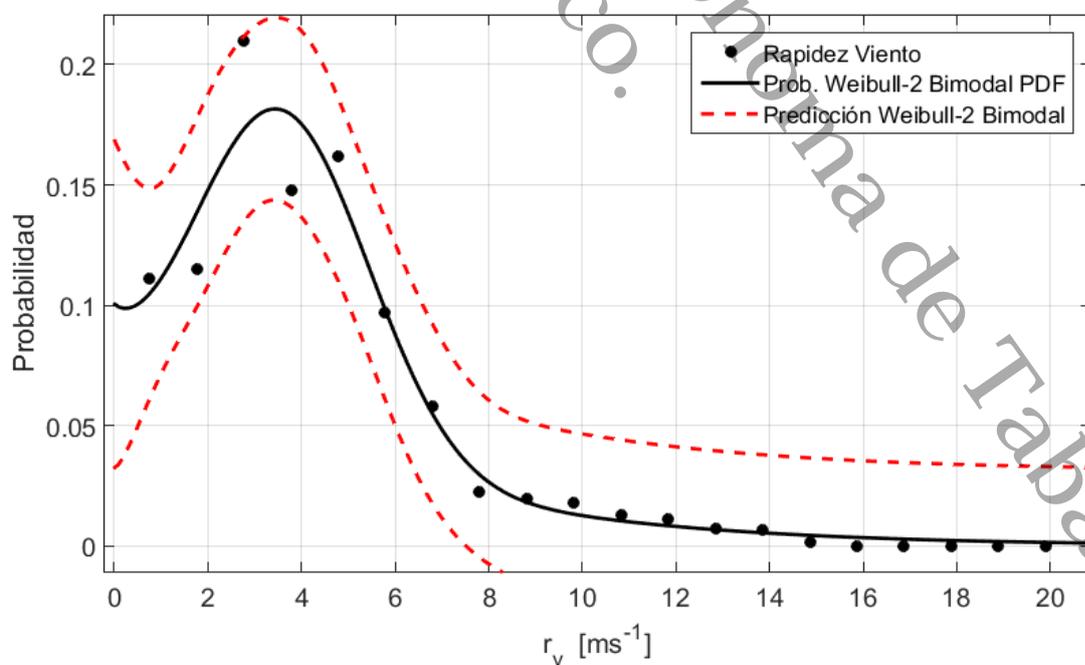


FIGURA 4.15: Modelo PDF-Weibull-2 bimodal para la r_v en Cuauhtemoczin I en 54 m.s.n.s., ensayado en 20 bins (sub-clases).

TABLA 4.6: Comparativo de la modelación con PDF-Weibull-2 Bimodal a 33 m.s.n.s. y 54 m.s.n.s. subclasificado en 20 bins para la función PDF $\mathcal{F}_{2W}(r_v) = e(\frac{k_1}{c_1})(\frac{r_v}{c_1})^{(k_1-1)} \exp(-(\frac{r_v}{c_1})^{k_1}) + f(\frac{k_2}{c_2})(\frac{r_v}{c_2})^{(k_2-1)} \exp(-(\frac{r_v}{c_2})^{k_2})$ para coeficientes con límites de confianza y predicción en 95 %, $\mathcal{F}_{2W}(r_v)$: función de densidad de probabilidades de la r_v , ver Ec. 4.1, Figs. 4.14 y 4.15

Ensayo de medición en altura de	Parámetro Weibull [s/p]	Valor del parámetro [-]	Rango de búsqueda para reg. y confianza [-]
33 m.s.n.s.	k_1	1	(fijado al límite)
	c_1	4.784	(2.123, 7.445)
	k_2	2.62	(1.842, 3.397)
	c_2	4.422	(3.992, 4.851)
	e	0.4817	(0.1651, 0.7983)
	f	0.5639	(0.3321, 0.7958)
Índices de Ajuste	SSE:	0.003236	RMSE: 0.01469
	R^2 :	0.9605	$R^2_{ajustada}$: 0.95
54 m.s.n.s.	k_1	1.19	(1.138, 1.242)
	c_1	3.306	(3.162, 3.449)
	k_2	6.619	(5.734, 7.505)
	c_2	4.234	(4.144, 4.324)
	e	0.7949	(0.7627, 0.8271)
	f	0.1199	(0.0984, 0.1415)
Índices de Ajuste	SSE:	0.0001368	RMSE: 0.003126
	R^2 :	0.9983	$R^2_{ajustada}$: 0.9978
e:	Prob. modo 1	f:	Prob. modo 2

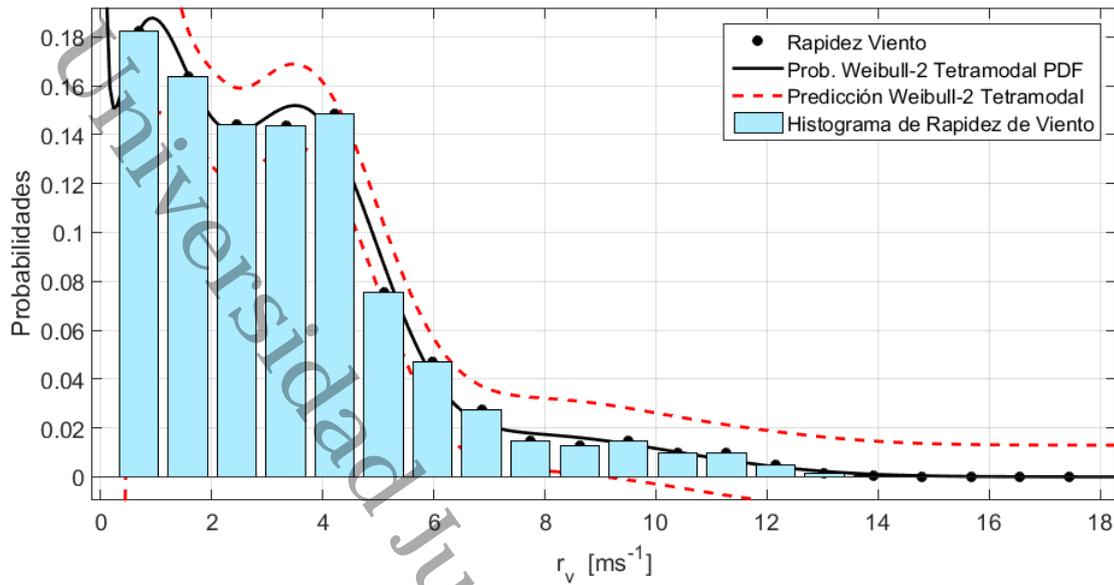


FIGURA 4.16: Modelo de Weibull-2 Tetramodal-Lopman para la r_v en Cuauhtemoczin I en 33 m.s.n.s., ensayado en 20 bins (sub-clases).

$$\begin{aligned}
 \mathcal{F}_{4W}(r_v) = & p_{r_v}(1) \left(\frac{k_1}{c_1}\right) \left(\frac{r_v}{c_1}\right)^{(k_1-1)} \exp\left[-\left(\frac{r_v}{c_1}\right)^{k_1}\right] \\
 & + p_{r_v}(2) \left(\frac{k_2}{c_2}\right) \left(\frac{r_v}{c_2}\right)^{(k_2-1)} \exp\left[-\left(\frac{r_v}{c_2}\right)^{k_2}\right] \\
 & + p_{r_v}(3) \left(\frac{k_3}{c_3}\right) \left(\frac{r_v}{c_3}\right)^{(k_3-1)} \exp\left[-\left(\frac{r_v}{c_3}\right)^{k_3}\right] \\
 & + p_{r_v}(4) \left(\frac{k_4}{c_4}\right) \left(\frac{r_v}{c_4}\right)^{(k_4-1)} \exp\left[-\left(\frac{r_v}{c_4}\right)^{k_4}\right]
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Para el caso particular de la modelación de la v_v se ensayó también en este trabajo el modelo Multimodal Lopman denominado "PolyPI-N", Ver Cap. 3, Apdo. 3.3.1. Este modelo fue probado y comparado previamente en dicho capítulo y en Apdos. previos en este capítulo. El modelo PolyPI-N permite modelar también la r_v , T_{air} , d_v , ρ_{air} y muchas otras variables de esta investigación y de otras disciplinas. Para el caso particular de la r_v o la v_v la Ec. 4.3 es la que establece el modelo base, que a diferencia de Weibull, Rayleigh y otros permite ajustarlo a las distribuciones de frecuencia. Esta es una ventaja adicional entre otras que PolyPI-N exhibe, ya que puede ajustarse también a las medias o máximas de gráficos de dispersión. Además, de ajustarse a las distribuciones de frecuencia, este se puede ajustar a estos gráficos de dispersión

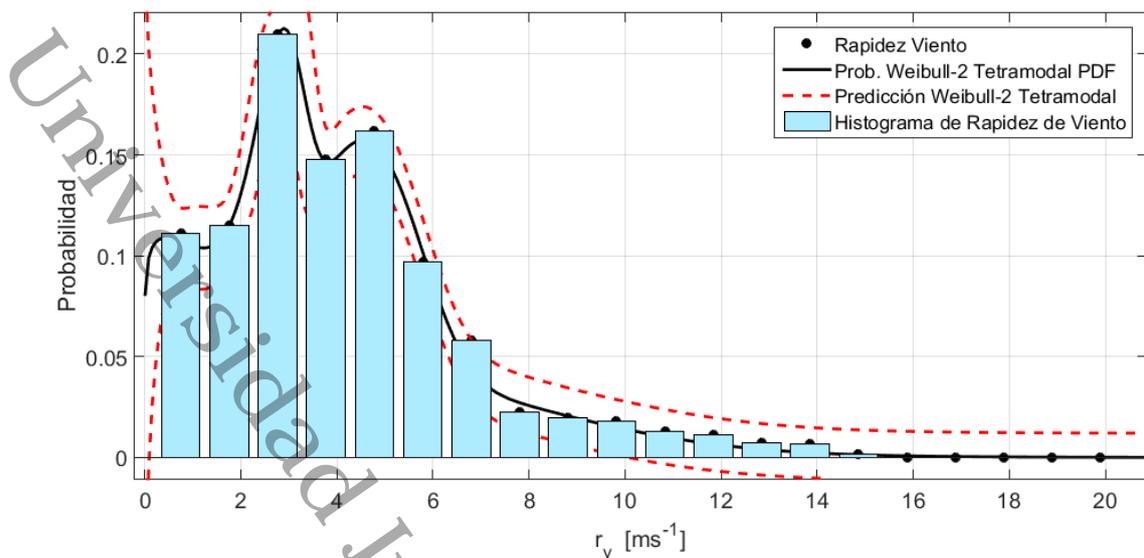


FIGURA 4.17: Modelo de Weibull-2 Tetramodal-Lopman para la r_v en Cuauhtemoczin I en 54 m.s.n.s., ensayado en 20 bins (sub-clases).

empleando el algoritmo o set de herramientas de cómputo adecuado para lograr el mejor ajuste. En este Trabajo se utilizó Máxima Verosimilitud o *MLE* como ya se describió en el Cap. 3.

Las Figs. 4.16 y 4.17 muestran los ajustes a la r_v en Cuauhtemoczin I en 33 m.s.n.s. y en 54 ms.n.s. Los valores de los parámetros de estas modelaciones con Weibull-2 Tetra-modal se pueden revisar en el Apdo. 4.3.1 siguiente, dedicado al cálculo y ajuste de parámetros del modelo.

El modelo polyPI-N tiene la forma que se muestra en la Ec. 4.3 que exhibe N parámetros y m modales de formas de operación o dinámica. Este modelo desarrollado y ensayado en este trabajo tiene la ventaja de ser polimorfo en relación al número de parámetros, multiplicidad de modales, elección de signos según convenga de acuerdo a la correlación que exhiban las variables que se modelan. Esto para hacer que los autovalores y parámetros desconocidos a priori se logren encontrar computacionalmente y el ajuste del modelo mejore con cada forma que se elija.

$$PolyPI - N(Xvar) = \lambda \prod_{i=1}^N (Xvar \pm p_i)^m \pm Bu \quad (4.3)$$

Donde:

$PolyPI - N(Xvar) = Yvar$: vector de la variable dependiente a modelar; $Xvar$: vector de la variable independiente de entrada al proceso real o sistema de

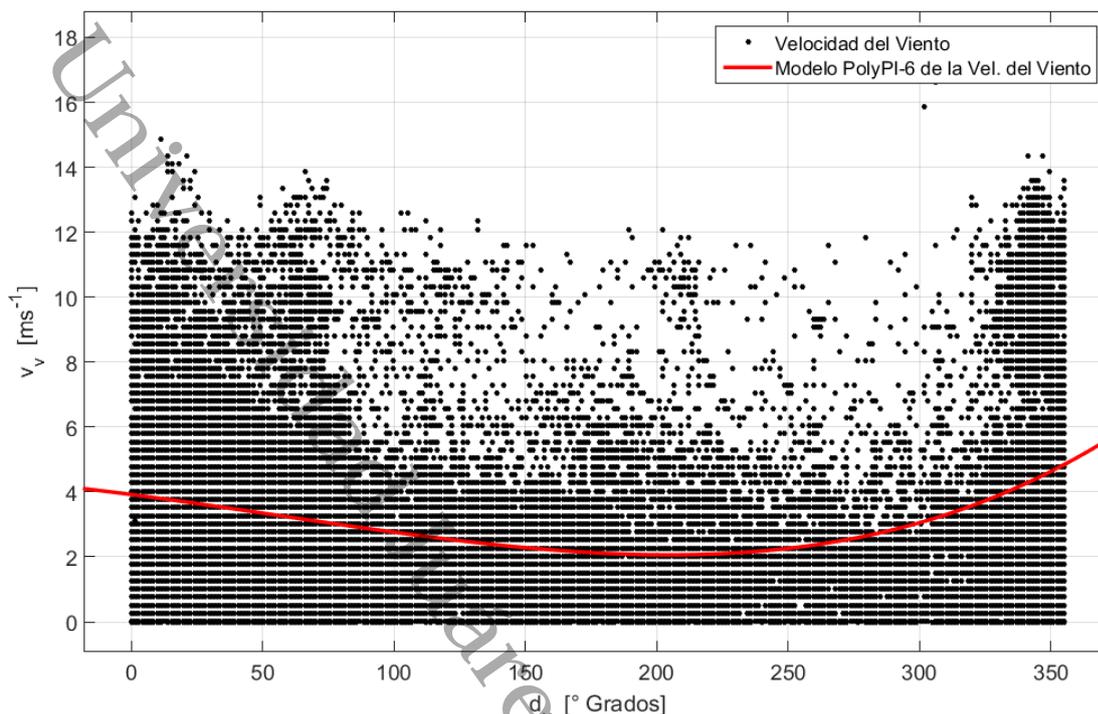


FIGURA 4.18: Modelo PolyPI-N-Lopman para la \bar{v}_v en Cuauhtemocztzin I en 33 m.s.n.s., ensayado con 6 modos.

estudio y/o entrada al modelo. Para el caso eólico es la r_v , v_v , d_v , T_{amb} , ρ_{air} , p_{atm} o cualquier otra; λ : es un autovalor o escalar desconocido que puede ser propuesto en el modelo o para determinarse en la regresión en un rango de $(-\infty, +\infty)$; p_i : parámetros modales del modelo *PolyPI-N*; m : multiplicidad del modal, B : vector de coeficientes o escalar de la salida normal inicial en el rango de $(-\infty, +\infty)$ y u : valor que puede ser el bias, tendencia, media de la muestra, media de la población de los registros a modelar o valor inicial previo a cualquier entrada que excite una salida en el sistema o proceso.

Las Figs. de la 4.18 a la 4.22 muestran los ajustes a la v_v y r_v respectivamente en Cuauhtemocztzin I en 33 m.s.n.s. y en 54 ms.n.s. Estas modelaciones fueron realizadas con PolyPI-[6,7,8] para mostrar su versatilidad. Los valores de los parámetros de estas modelaciones se pueden revisar en el Apdo. 4.3.1.

4.3.1 Cálculo y ajuste de parámetros del modelo

El ajuste de los parámetros de los modelos probados se realizó de acuerdo a la metodología mostrada en el diagrama indicado en la Fig. 4.13 y fórmulas descritas en el Cap. 2 y Cap. 3. Mediante un ciclo de verificación de los índices de ajuste se logró el ajuste de parámetros, estos se indican en cada una de las tablas de resultados: SSE, RMSE, R^2 y $R^2_{ajustada}$. Si el valor de estos índices

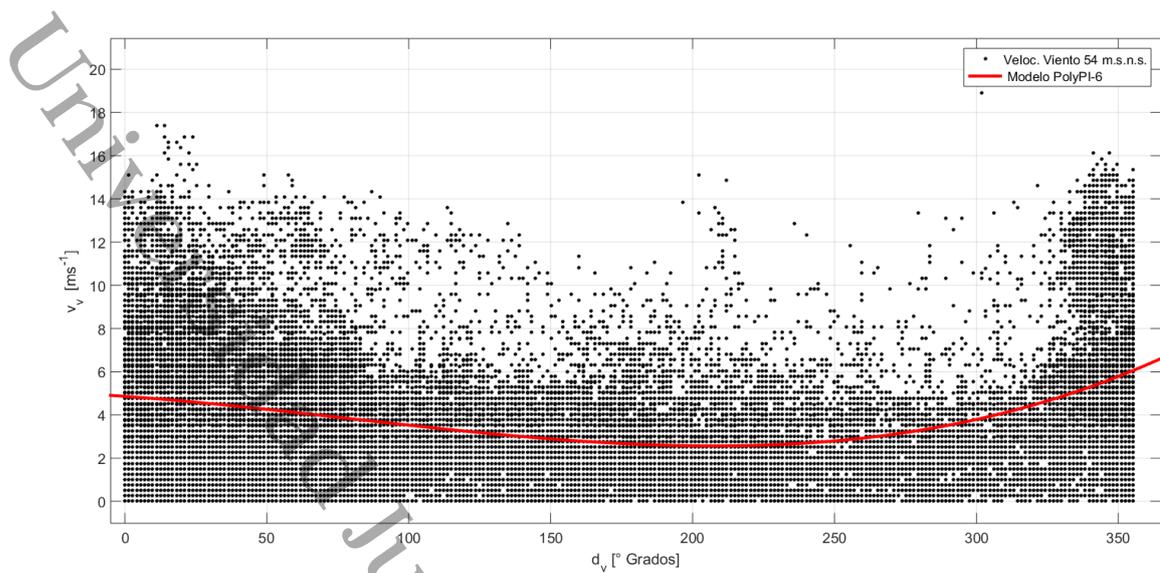


FIGURA 4.19: Modelo PolyPI-N-Lopman para la $\overline{v_v}$ en Cuauhtemotzin I en 54 m.s.n.s., ensayado con 6 modos.

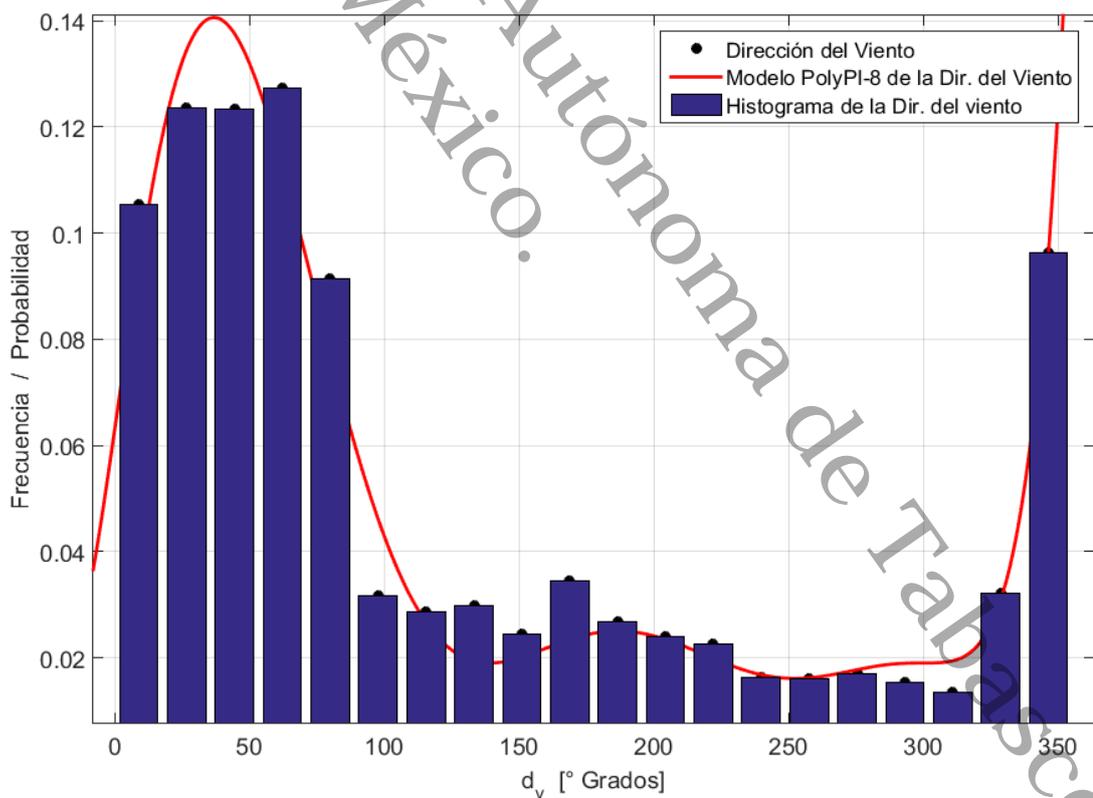


FIGURA 4.20: Modelo PolyPI-8-Lopman para la d_v en Cuauhtemotzin I a 54 m.s.n.s., ensayado con 8 modales, un grado de multiplicidad 3 y 20 bins (sub-clases), ver Tabla 4.8.

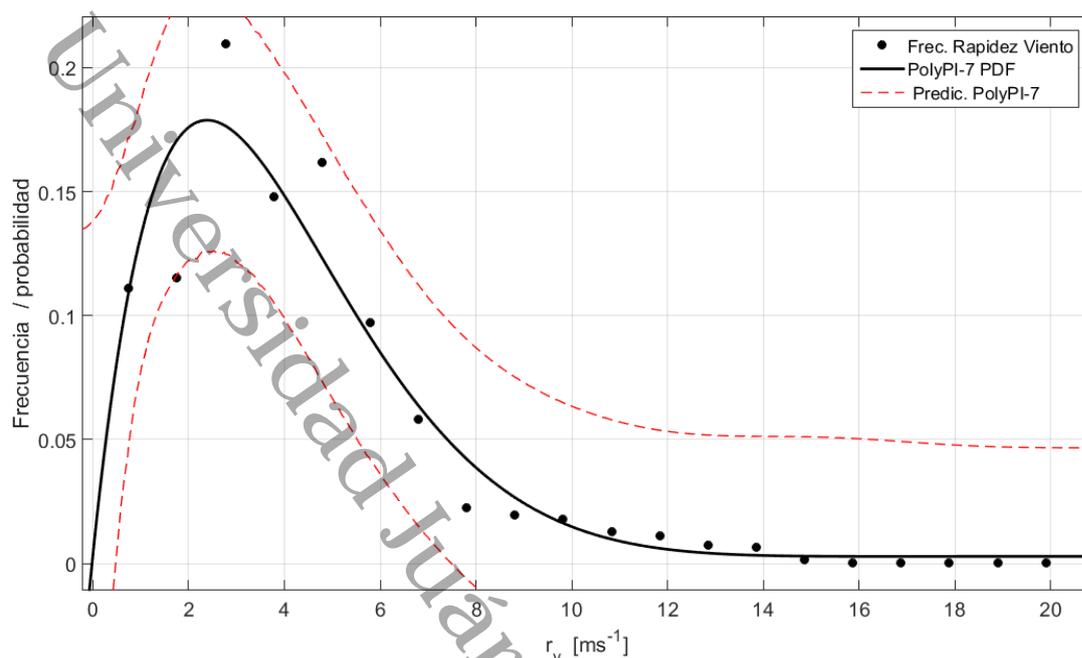


FIGURA 4.21: Modelo PolyPI-7-Lopman ajustada a la densidad de probabilidad de la r_v en Cuauhtemoczin I a 54m.s.n.s., ensayado con 7 modales y 20 bins (sub-clases) sobre base de registros perturbados.

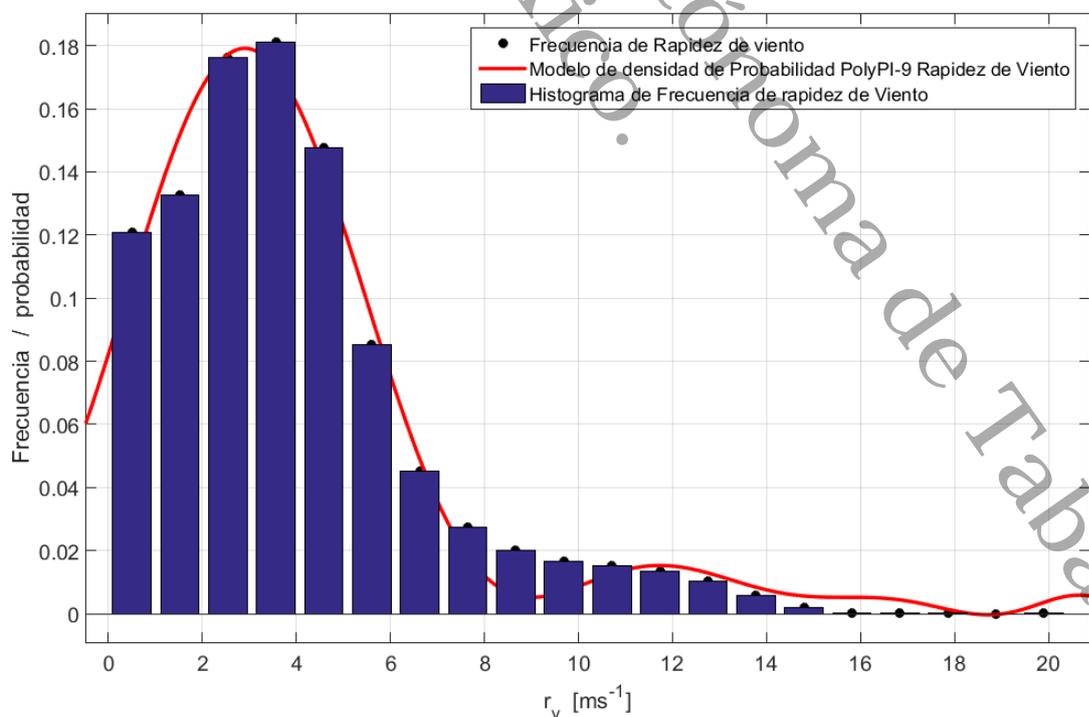


FIGURA 4.22: Modelo de PolyPI-9-Lopman para la r_v en Cuauhtemoczin I en 54m.s.n.s., ensayado con 9 modales, dos grados de multiplicidad 3 y 20 bins (sub-clases), ver Tabla 4.8.

no satisface la expectativa de ajuste reflejado en índices de ajuste se regresa hacer modificaciones, tal como, lo indica el modelo Box Jenkins. Estos valores permitieron comparar el modelo con los datos de la variable o proceso y así se decidió si se requería realizar alguna modificación al modelo que se estaba empleando para ajustarse a los registros empíricos.

La modelación de la v_v se ensayo también previamente con PolyPI-N en el Cap. 3. Se presentan aquí resultados de los ensayos del Apdo. 4.3 para mostrar que los modelos Multimodales propuestos en este trabajo, ajustan tanto a las r_v como a las d_v . Estos permiten ajustar mejor el modelo básico de Weibull-2 expandiéndolo a más modales como el caso de Tetra-Modal propuesto, desarrollado y probado aquí. El modelo PolyPI-N demostró en los ensayos que es más versátil que otros, porque tanto ajusta a la función de densidad de probabilidades como a la distribución de frecuencia y a la media de variables físicas desde gráficos de dispersión.

Como conclusión a este tema se demuestra que la modelación eólica mejora con el uso de la multimodalidad en el modelo de Weibull y el uso del nuevo modelo PolyPI-N mejora el ajuste de los modelos a los registros empíricos. Esto es una mejor alternativa para tener mejores evaluaciones eólicas y estimaciones del RE.

4.3.2 Evaluación energética

La potencia disponible en el viento se puede modelar directamente de los valores instantáneos de la r_v o v_v aplicando la Ec. 4.4. Esta es la potencia eólica disponible antes de atravesar la TE. El flujo de viento que atraviesa e impulsa la TE reduce su energía al pasar por ella, solo puede transmitir una fracción de esta y este efecto se caracteriza por $C_{p(a)}$ como ya se demostró en capítulos anteriores. La potencia mecánica en la flecha de salida de la TE se inyecta a la transmisión mecánica (multiplicadora). Esta también tiene una eficiencia denotada por η_{mec} que permite el aprovechamiento de un porcentaje alto de la energía mecánica y así sucesivamente hasta obtenerse la energía eléctrica en terminales del GTE. La Ec. 4.5 sintetiza lo anterior y permite calcular la potencia en las terminales eléctricas de una GTE en función del A_{rot} .

$$P(v_v) = \frac{1}{2} \rho_{air} A_{rot} v_v^3 \quad (4.4)$$

La potencia eléctrica por unidad de área de barrido de una TE se expresa en términos de la ρ_{air} , v_{vir}^3 y de las eficiencias de la GTE en su coeficiente de potencia $C_{p(a)}$ específico de cada modelo y diseño, la eficiencia mecánica del multiplicador de revoluciones y la transmisión mecánica dada por η_{mec} y la

TABLA 4.7: Modelación con Weibull-2 Tetramodal para la $\mathcal{F}_{4W}(r_v) = (0.09, 0.8) \left(\frac{k_1}{c_1}\right) \left(\frac{r_v}{c_1}\right)^{(k_1-1)} \exp\left(-\left(\frac{r_v}{c_1}\right)^{k_1} + (0.41, 0.40) \left(\frac{k_2}{c_2}\right) \left(\frac{r_v}{c_2}\right)^{(k_2-1)} \exp\left(-\left(\frac{r_v}{c_2}\right)^{k_2} + (0.33, 0.35) \left(\frac{k_3}{c_3}\right) \left(\frac{r_v}{c_3}\right)^{(k_3-1)} \exp\left(-\left(\frac{r_v}{c_3}\right)^{k_3} + (0.07, 0.15) \left(\frac{k_4}{c_4}\right) \left(\frac{r_v}{c_4}\right)^{(k_4-1)} \exp\left(-\left(\frac{r_v}{c_4}\right)^{k_4}\right)$ para Coeficientes con límites de confianza y predicción en 95%: función de densidad de probabilidades de la r_v , donde $(p_{33}(m), p_{54}(m))$: set de probabilidades por altura y modal $\forall m \in 1, 2, \dots, M$, ver Figs. 4.16 y 4.17 en Apdo. 4.3.

Ensayo de medición [m.s.n.s.]	Parámetro Weibull [s/p]	Valor del parámetro [-]	Rango de búsqueda y confianza [-]
33	k_1	12.55	(-65.07, 90.18)
	c_1	5.282	(3.162, 7.401)
	k_2	0.673	(-0.4349, 1.781)
	c_2	2.29	(1.062, 3.517)
	k_3	4.031	(0.2923, 7.769)
	c_3	3.313	(1.641, 4.984)
	k_4	1.683	(-39.93, 43.29)
	c_4	8.784	(-2294, 2312)
Índices de Ajuste	SSE:	0.0007475	RMSE: 0.007892
	R^2 :	0.9908	$R^2_{ajustada}$: 0.9855
54	k_1	1.228	(-234.1, 236.5)
	c_1	0.2365	(-40.55, 41.02)
	k_2	2	(1.445, 2.555)
	c_2	6.115	(5.225, 7.005)
	k_3	3.645	(1.723, 5.567)
	c_3	3.078	(2.007, 4.15)
	k_4	5.247	(4.105, 6.389)
	c_4	11.54	(-34.68, 57.76)
Índices de Ajuste	SSE:	0.0005874	RMSE: 0.006996
	R^2 :	0.9928	$R^2_{ajustada}$: 0.9887

TABLA 4.8: comparación en el desempeño de la Modelación de la función de densidad de probabilidades que ajusta a la distribución de frecuencias de la ρ_{air} utilizando PolyPI-N en la forma (1) $f_1(x) = \lambda(x-a)(x-b)(x-c)(x-d)(x-e)(x-f)^3 + g$ y la forma (2) $f_2(x) = \lambda(x-a)(x-b)(x-c)(x-d)(x-e)(x-f)^3 + (x-g)^3 + h$, medido a 54 m.s.n.s. donde $x = v_v$ y $f(x)$: función de densidad de probabilidades, ver Figs. 4.20 y 4.22, Apdo. 4.3.

Ensayo Modelo/ Forma (i)	Parámetro	Valor del parámetro [-]	Rango de búsqueda y confianza [-]
PolyPI-8 / forma (1)	λ	1.111112e-18	(ajustado al límite)
	a	138.4	(-701.1, 977.8)
	b	-18.75	(-1221, 1183)
	c	139.7	(-721.7, 1001)
	d	-18.01	(-1188, 1152)
	e	226.1	(170.8, 281.5)
	f	299.7	(290.3, 309.1)
	g	1.9e-02	(ajustado al limite)
Índices de Ajuste	SSE:	0.001398	RMSE: 0.009994
	R^2 :	0.9589	$R^2_{ajustada}$: 0.9442
PolyPI-9 / forma (2)	λ	1.055521112e-15	(fijado al límite)
	a	9.049	(-43.09, 61.19)
	b	-7.757	(-15.78, 0.2674)
	c	20.26	(11.09, 29.43)
	d	21.19	(12.07, 30.31)
	e	9.002	(-42.46, 60.46)
	f	15.68	(14.11, 17.25)
	g	-3.788	(-7.409, -0.1669)
h	5.21e-03	(Ajustado al límite)	
Indices de Ajuste	SSE:	0.001245	RMSE: 0.009788
	R^2 :	0.9842	$R^2_{ajustada}$: 0.977

TABLA 4.9: Modelación de la curva de potencia por unidad de area como función de la r_v y ρ_{air} a 33 m.s.n.s. y 54 m.s.n.s. utilizando PolyPI-5 en la forma $f(x) = \lambda(x - a)^3(x - b)(x - c) + d$, donde $P(r_v) = f(x)$ y $\rho_{air} = x$, con multiplicidad modal de $m = 3$, ver Fig. 4.24 y Fig. 4.25.

Ensayo modelo/ Altura	Parámetro	Valor del parámetro [-]	Rango de búsqueda y confianza [-]
PolyPI-5 / 33 m.s.n.s.	λ	1.02e-04	(0.5e - 04, 1.5e - 04)
	a	-30	(-30.51, -29.5)
	b	0.3743	(-172.6, 173.3)
	c	0.3154	(-173.6, 174.2)
	d	-15,5	(-44.7, 13.7)
Índices de Ajuste	SSE:	5.491e+06	RMSE: 10.25
	R^2 :	0.9958	$R^2_{ajustada}$: 0.9858
PolyPI-5 / 54 m.s.n.s.	λ	1.17e-04	(fijado al límite)
	a	-22.37	(-31.65, -13.09)
	b	6.929	(6.864, 6.993)
	c	-21.94	(-49.63, 5.748)
	d	201.6	(196.1, 207.1)
Indices de Ajuste	SSE:	1.606e+06	RMSE: 5.545
	R^2 :	0.9995	$R^2_{ajustada}$: 0.9995

eficiencia del generador eléctrico η_{elect} son expresados en la Ec. 4.5. Si se tienen los registros disponibles los valores de la v_{vi}^3 y las variaciones de T_{air} y P_{atm} es posible tener una estimación confiable de la relación $\frac{P_{elect}}{A}$. En los Apdos. 4.2, Fig. 4.9 y Fig. 4.10 se abordó y modeló la ρ_{air} y se conoció de su variación.

Para la Ecuación de la ρ_{air} se consideró que las variables de entrada Temperatura, Presión atmosférica y humedad relativa no se encuentran correlacionadas tomando en cuenta que su aplicación tiene varias fuentes de incertidumbre como se describe en [71].

$$\frac{P_{elect}}{A_{Rot}} = \frac{1}{2} \rho_{air} v_{vi}^3 C_{p(a)} \eta_{mec} \eta_{elect} \quad (4.5)$$

Sin embargo, despreciando las incertidumbres en instrumentos y demás factores la potencia eólica disponible es el punto de partida de la evaluación eólica del SE. Las Figs. 4.23 (a) y (b) muestran el comportamiento de la T_{air} y la P_{atm} , mientras que la ρ_{air} y la potencia eólica son mostradas en la Figs. 4.23 (c) y (d) cuya convolución vectorial resulta de la Ec. 4.4.

Una forma de visualizar el efecto que la variación de ρ_{air} sobre la potencia del viento se puede analizar desde la Fig. 4.23 a la Fig. 4.25 y en la Tabla 4.9.

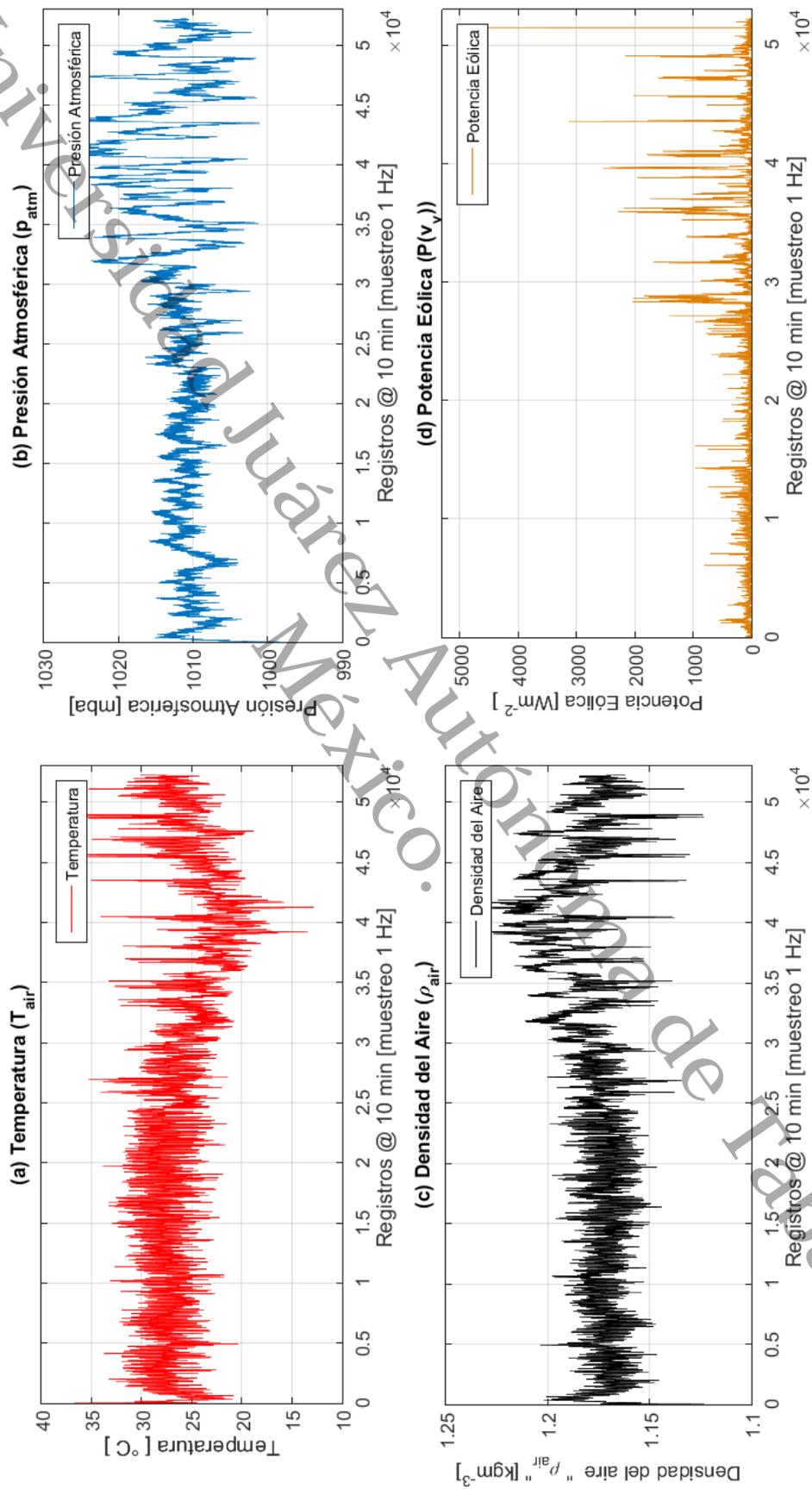


FIGURA 4.23: Estimación de la Potencia Eólica por unidad de area en función de la ρ_{air} , T_{air} , r_v , y P_{atm} , ver Ec. 4.4.

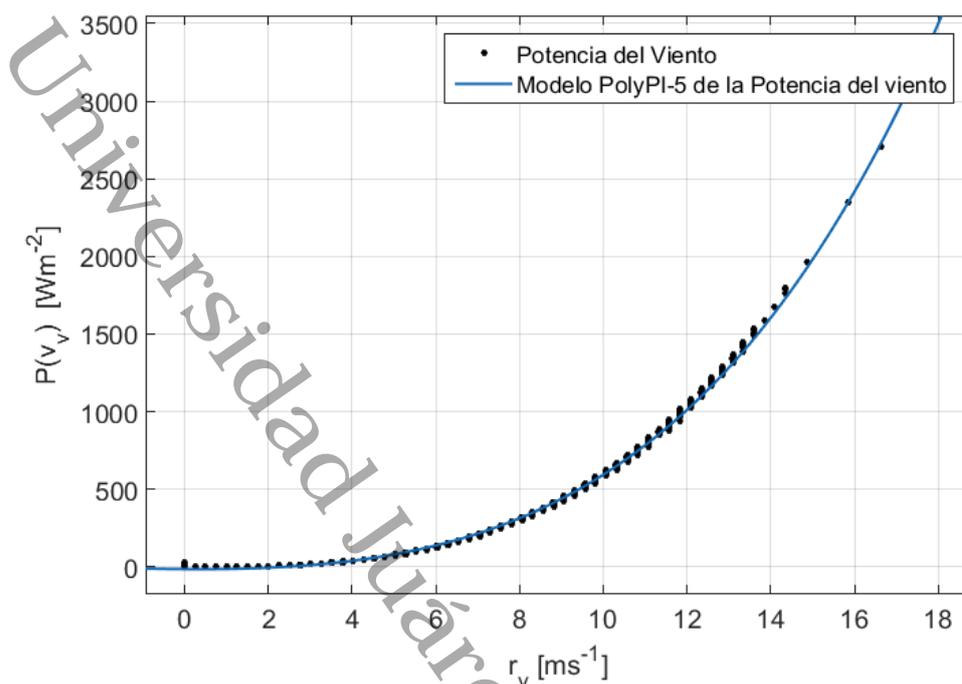


FIGURA 4.24: Modelación de la Potencia Eólica por unidad de area en función de la ρ_{air} y r_v a 33 m s n s en Cuauhtemoczin I, utilizando PolyPI-5, con grado de multiplicidad $m = 3$, ver Tabla 4.9.

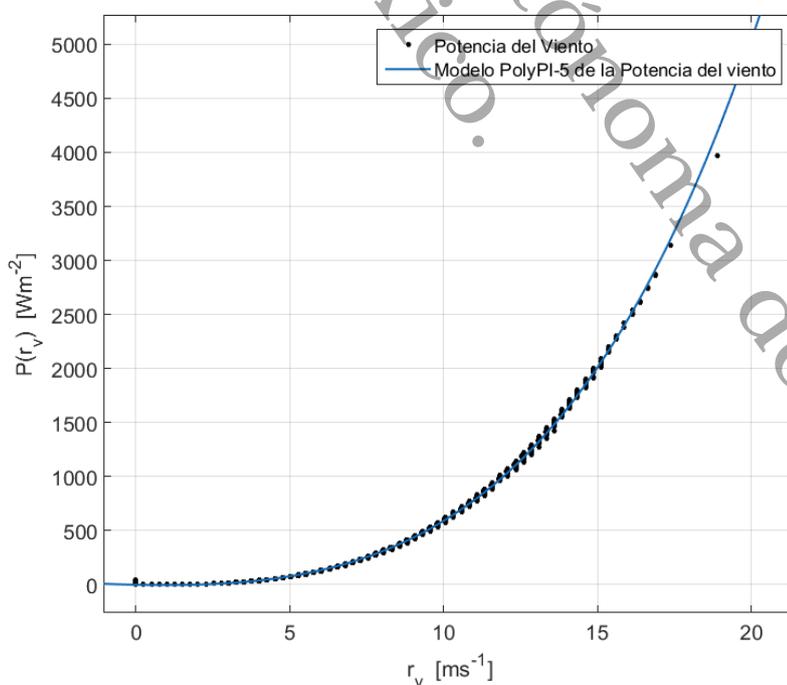


FIGURA 4.25: Modelación de la Potencia Eólica por unidad de area en función de la ρ_{air} y r_v a 54 m s n s en Cuauhtemoczin I, utilizando PolyPI-5, con grado de multiplicidad $m = 3$, ver Tabla 4.9.

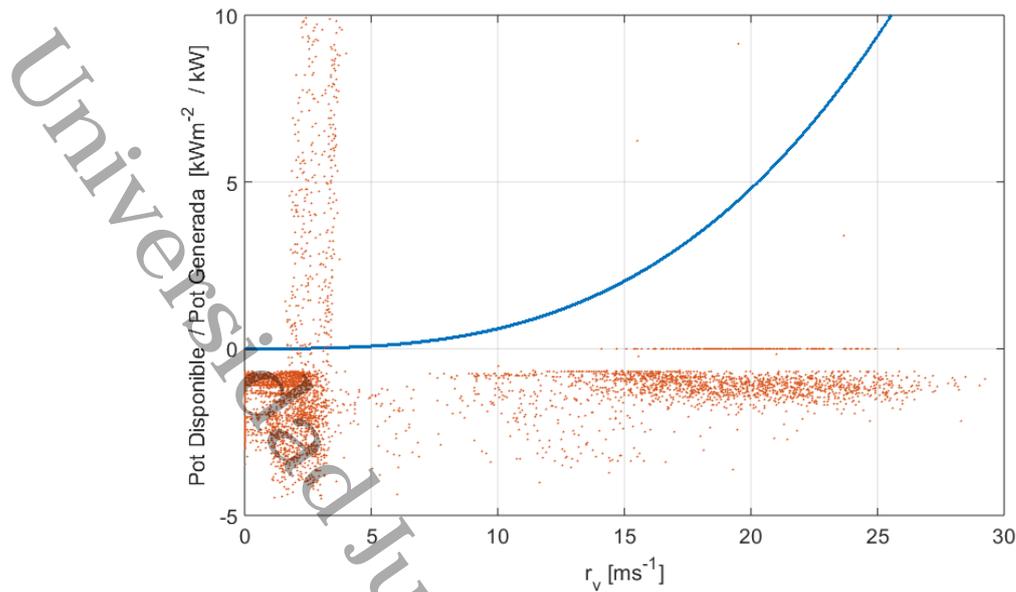


FIGURA 4.26: Comparación de la Potencia Eólica por unidad de área disponible con la potencia generada y tomada por una turbina eólica G58/850 manufacturada por Gamesa y en operación en La Venta Oaxaca en 2015.

La potencia generada por un GTE es propia para cada modelo y marca o manufactura. Esta potencia generada está relacionada con la densidad de potencia disponible en el viento para el SE. También esta potencia generada depende directamente del área de barrido de la TE del GTE. Estos GTE tienen un consumo de energía eléctrica que no rebasa los 5 kW para GTEs de hasta 1 MW. Como un ejemplo de uso de las curvas de potencia se presenta un comparativo entre la densidad de potencia disponible entrando a la turbina eólica de manufactura Gamesa modelo G58/850 clase de viento IIIb/IIa, con un rotor de 58 m con un índice de densidad de potencia de producción de $3.11 \text{ m}^2 \text{ kW}^{-1}$ el cual tiene un área de barrido del rotor de 2643 m^2 . La potencia por metro cuadrado en 20 m s^{-1} es de 4.90 kW m^{-2} , mientras que en 25 m s^{-1} es 9.50 kW m^{-2} , ver la Fig. 4.26.

Una vista de comparación entre la potencia eólica atravesando la TE de una GTE Gamesa G58/850 y la potencia generada y entregada en terminales a la subestación del parque eólico La Venta II en Oaxaca. Estas dos potencias dan una idea de la capacidad de manejo y desvío de la potencia por medio del control del "Pitch" de las palas del GTE. Por ejemplo mientras que en 15 m s^{-1} la potencia generada es 850 kW, en ese valor de la rapidez del viento la potencia disponible ingresando a la TE es 5.40 MW, ver Fig. 4.27. Para el Caso de Cuauhtemotzin tanto la densidad de potencia disponible como la potencia generada son distintas. Esto es porque tenemos valores de r_v son menores a las mismas alturas que en la Venta Oaxaca. En este trabajo otras variables

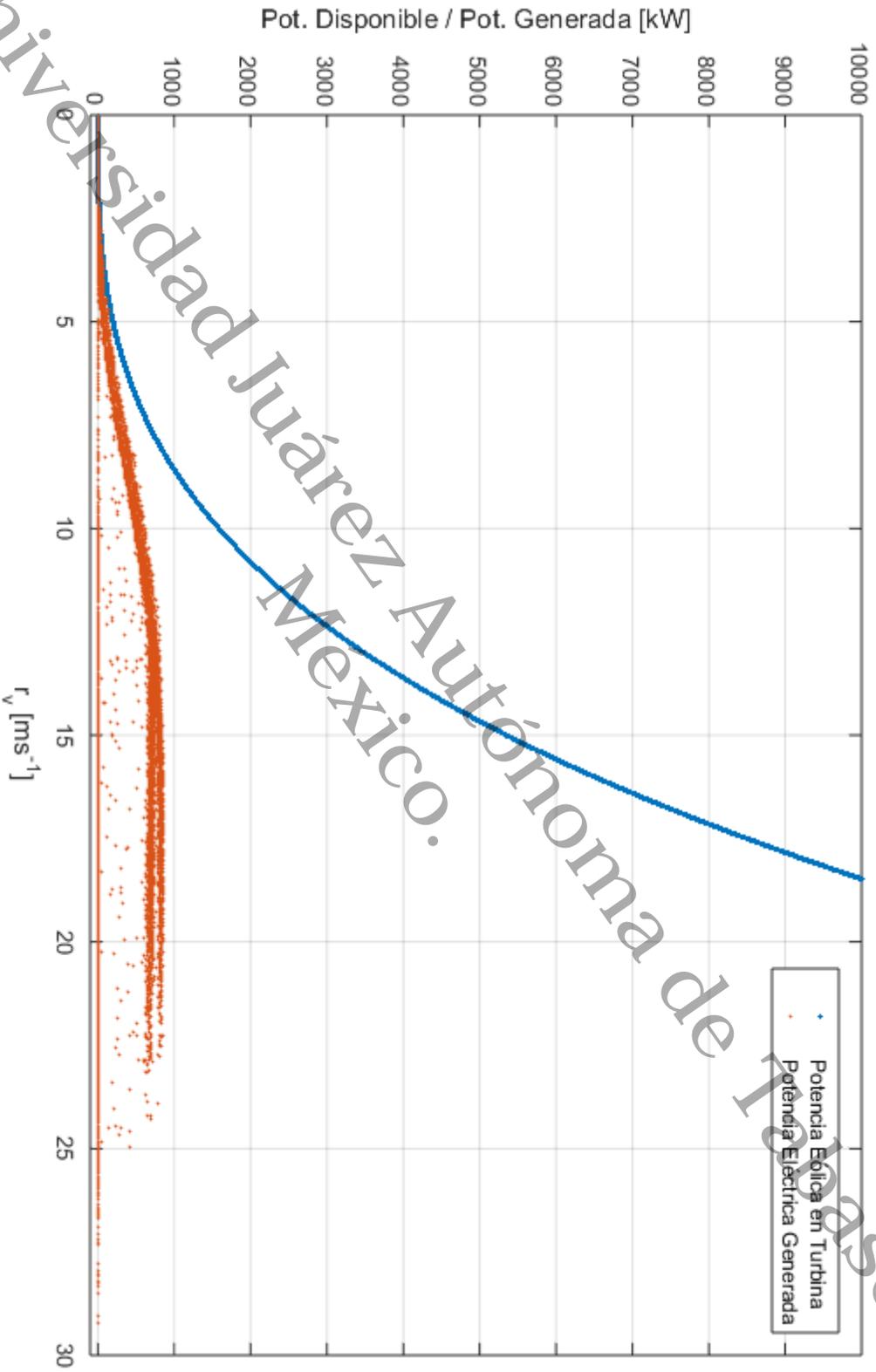


FIGURA 4.27: Comparación de la Potencia Eólica disponible atravesando la turbina *versus* la potencia producida por una GTE modelo G58/850 Gamesa de 850 kW de capacidad en La Central eólica La Venta II, CFE, Oax. Registros proporcionados por cortesía de CFE.

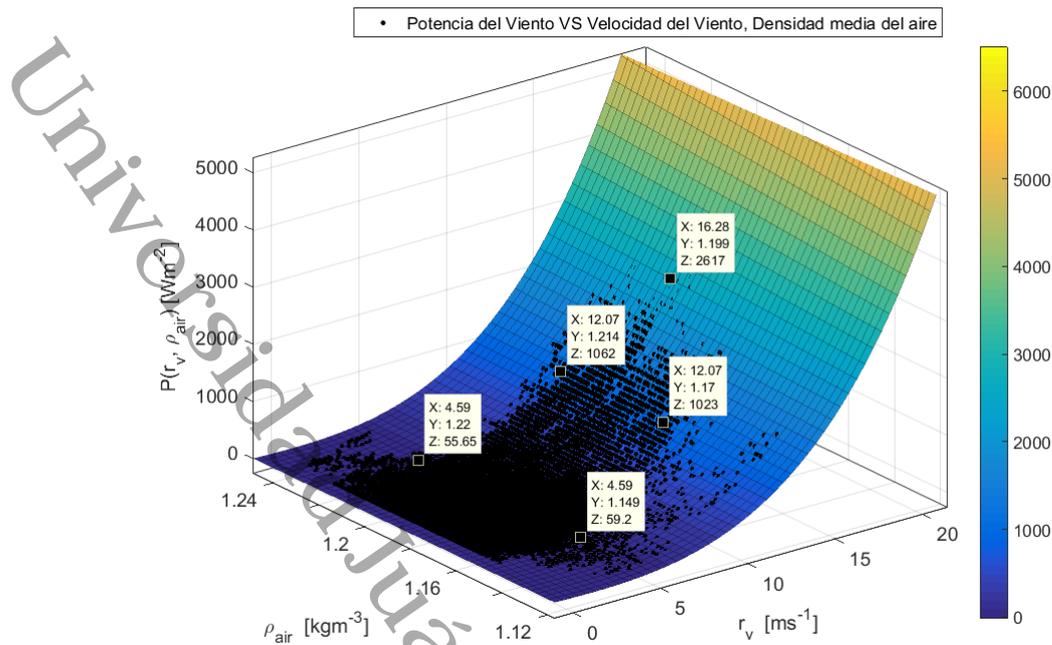


FIGURA 4.28: Modelación con PolyPI-6 de la Potencia disponible como función de r_v , ρ_{air} a 54 m.s.n.s., con multiplicidad modal $m = 3$, ver Tabla. 4.10.

meteorológicas fueron tomadas en cuenta para la evaluación energética de Cuauhtemotzin.

La Fig. 4.27 hace una modelación de la Potencia eólica disponible y la compara a un gráfico de dispersión de la potencia en terminales entregadas por una GTE de 850 kW dentro de un rango de r_v . Esto tiene mucho contenido didáctico si se compara esta potencia disponible a la potencia de salida de la GTE. También se realizaron modelaciones con PolyPI-5 de forma multivariable en forma tridimensional. Se presenta aquí la modelación para 54 m.s.n.s., su comportamiento se puede analizar desde la Fig. 4.28 a la Fig. 4.29, ver Tabla 4.10. En este caso la modelación para $P(r_v, \rho_{air})$ va en función de dos variables (ρ_{air} , r_v), o también de (HR , r_v). Esto comprueba que polyPI-N es versátil porque se puede emplear en diversas modelaciones con dos o tres variables del RE.

$$P(v_v | GTE) = \int_0^{\infty} \mathcal{P}_{TE}(v_v | GTE) \mathcal{F}_W(v_v) dv \quad (4.6)$$

Donde la función de densidad de probabilidades PDF-Weibull-2 es:

$$\mathcal{F}_W(v_v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v_v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v_v}{c}\right)^k\right] = 1 \quad (4.7)$$

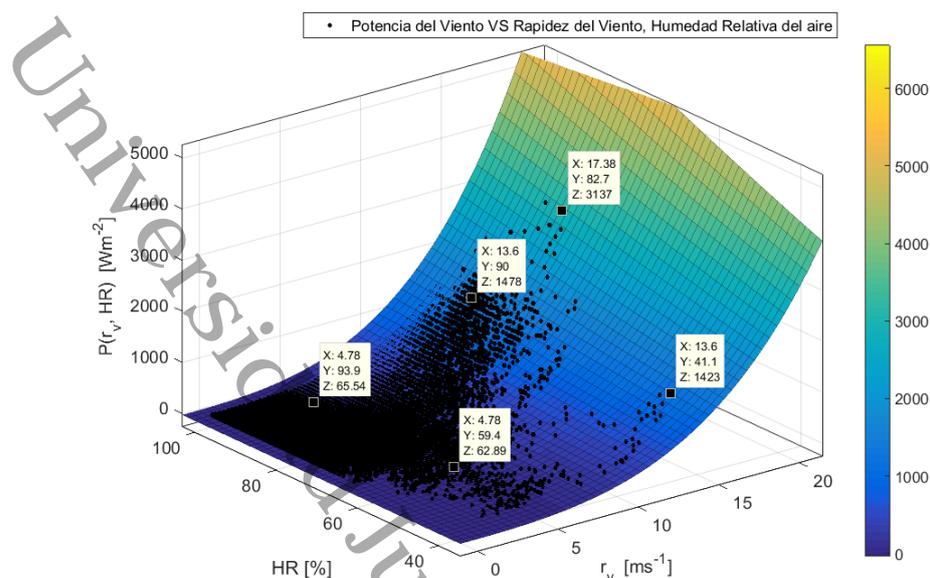


FIGURA 4.29: Modelación con PolyPI-6 de la Potencia disponible como función de r_v , RH a 54 m.s.n.s., con multiplicidad modal $m = 3$, ver Tabla 4.10.

TABLA 4.10: Modelación de la curva de potencia por unidad de area como función de la r_v , ρ_{air} y HR a 54 m.s.n.s. utilizando PolyPI-6 en la forma $f(x, y) = \lambda(x - a)^3(x - b)(y - c)(y - d) + e$, donde $r_v = x$, $(\rho_{air}, HR) = y$ y $P(r_v) = f(x, y)$ con grado de multiplicidad $m = 3$, ver Fig. 4.28 y Fig. 4.29.

Ensayo Modelo/ Altura	Parámetro	Valor del parámetro [-]	Rango de búsqueda y confianza [-]
PolyPI-5 / 54 m.s.n.s.	λ	0.12e-03	(ajustado al límite)
	a	-12.37	(-12.4, -12.35)
	b	5.699	(5.685, 5.712)
	c	-74.77	(-75.33, -74.22)
	d	0.09419	(0.08612, 0.1023)
Índices de Ajuste	SSE:	4.453e+05	RMSE: 2.92
	R^2 :	0.9999	$R^2_{ajustada}$: 0.9999
PolyPI-5 / 54 m.s.n.s.	λ	0.001232e-04	(fijado al límite)
	a	-9.292	(-9.458, -9.126)
	b	2.022	(1.872, 2.171)
	c	-204.5	(-4182, 3773)
	d	-205	(-4189, 3779)
Índices de Ajuste	SSE:	1.792e+07	RMSE: 18.52
	R^2 :	0.9942	$R^2_{ajustada}$: 0.9942

Alternativamente se procede en la modelación como se explicó en el Apdo. 2.5.1 aplicando la Ec. 2.41. Para este caso hay que escoger el modelo y valor de sus parámetros y también los de la curva de potencia del GTE. Por ejemplo suponga que la curva típica del GTE es:

$$\mathcal{P}_{TE}(v_v | GTE) = a_2 + \frac{a_2 - a_1}{1 + \exp(v_v - \frac{a_3}{a_4})} \quad (4.8)$$

Donde:

$\mathcal{P}_{TE}(v_v | GTE)$: curva de potencia de un GTE marca Vestas 27; $a_1 = -0.035$; $a_2 = -1.00$; $a_3 = -9.00$; $a_4 = 1.50$. Expuesto lo anterior basta con integrar en el tiempo la v_v o r_v desde $[0 - \infty)$, con esto se obtiene la $P(v_v | GTE)$: se lee la Potencia eólica dado el modelo de un GTE.

4.3.2.1 Densidad de potencia

De acuerdo al histograma de frecuencias y el modelo de probabilidades de la Fig. 4.30 a la Fig. 4.31 muestran la densidad de potencia disponible para Cuauhtemoczin I. El "zoom" de la Fig 4.32 realizada con 50 bins nos da más detalles para realizar hasta manualmente una suma de las potencias si se conoce el número total de registros. Este detalle en la figura indica que: 78 % es $\simeq 0-100 \text{ W m}^{-2}$, 8 % es $\simeq 100-200 \text{ W m}^{-2}$, 2.80 % es $\simeq 200-300 \text{ W m}^{-2}$, 1.80 % es $\simeq 300-400 \text{ W m}^{-2}$, 1.10 % es $\simeq 400-500 \text{ W m}^{-2}$ y así sucesivamente. Un ejercicio de sumatoria producto permite calcular el acumulado de la potencia y de la energía acumulada en el tiempo para el SE.

Haciendo un balance de momentos de potencia con los valores visibles en el zoom de la Fig. 4.32, el valor de equilibrio o "media ponderada" es $\simeq 90 \text{ W m}^{-2}$ sin embargo, la potencia disponible por unidad de área de barrido en la salida de una GTE es $\geq 30 \text{ W m}^{-2}$, tomando en cuenta la Eq. 4.4.

$$E_{TC} = T_A \int_0^{\infty} P_T(v_v) \mathcal{F}(v_v) dv_v \quad (4.9)$$

4.3.2.2 Producción de energía anual

La producción de energía anual está estrechamente ligada a la frecuencia y magnitud de la $P(v_v)$ en el SE de estudio. El número de horas con viento determina la cantidad de energía que ese SE tendrá anualmente. El histograma de la distribución de frecuencias de la disponibilidad de potencia por unidad de área indicado en la Fig. 4.30 muestra que el 90 % de la $P(v_v) A_{rot}^{-1}$ está entre 0 W m^{-2} y 250 W m^{-2} . El histograma de 20 bins indica en solo cuatro bins el 95 % de ellos está en el rango de 0 W m^{-2} y 1000 W m^{-2} .

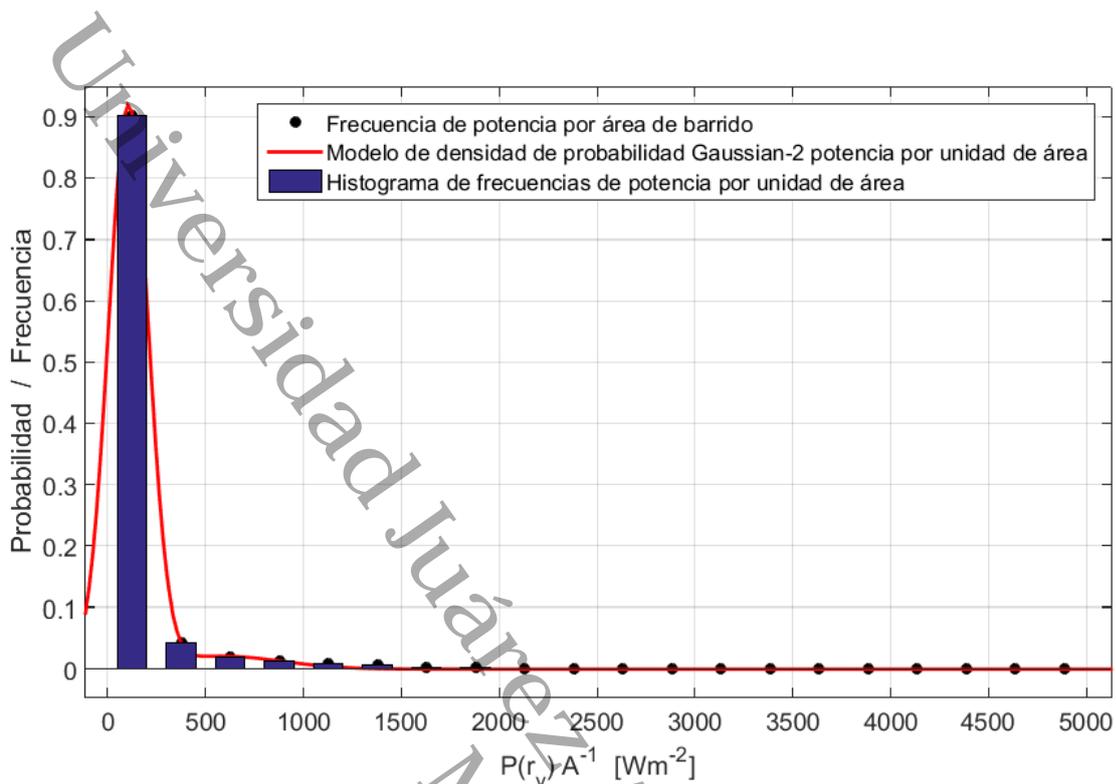


FIGURA 4.30: Histograma de distribución de la potencia por unidad de área anual en Cuauhtemocztin I, 54 m.

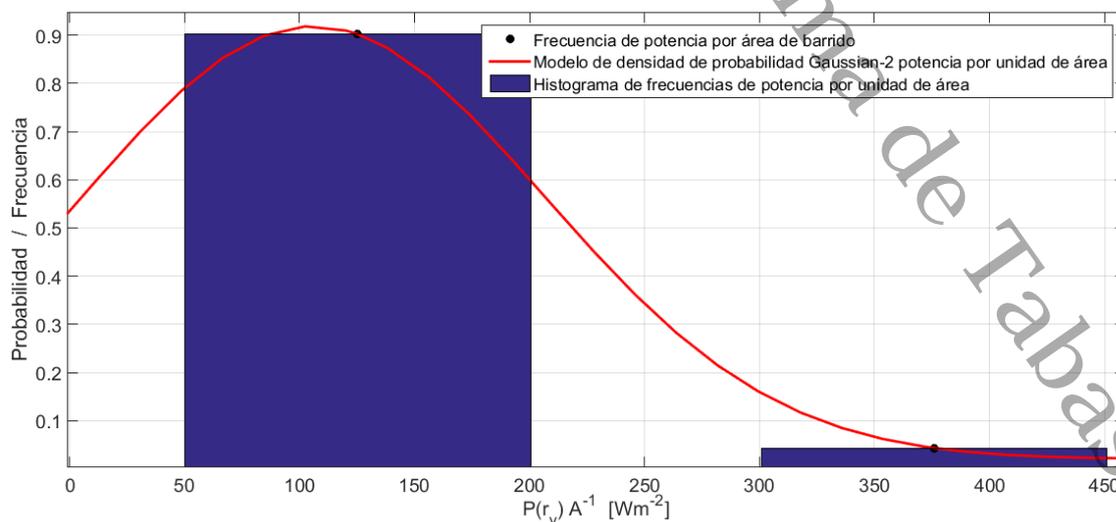


FIGURA 4.31: Distribución frecuencias de la potencia disponible por unidad de área anual en Cuauhtemocztin I, 54 m.

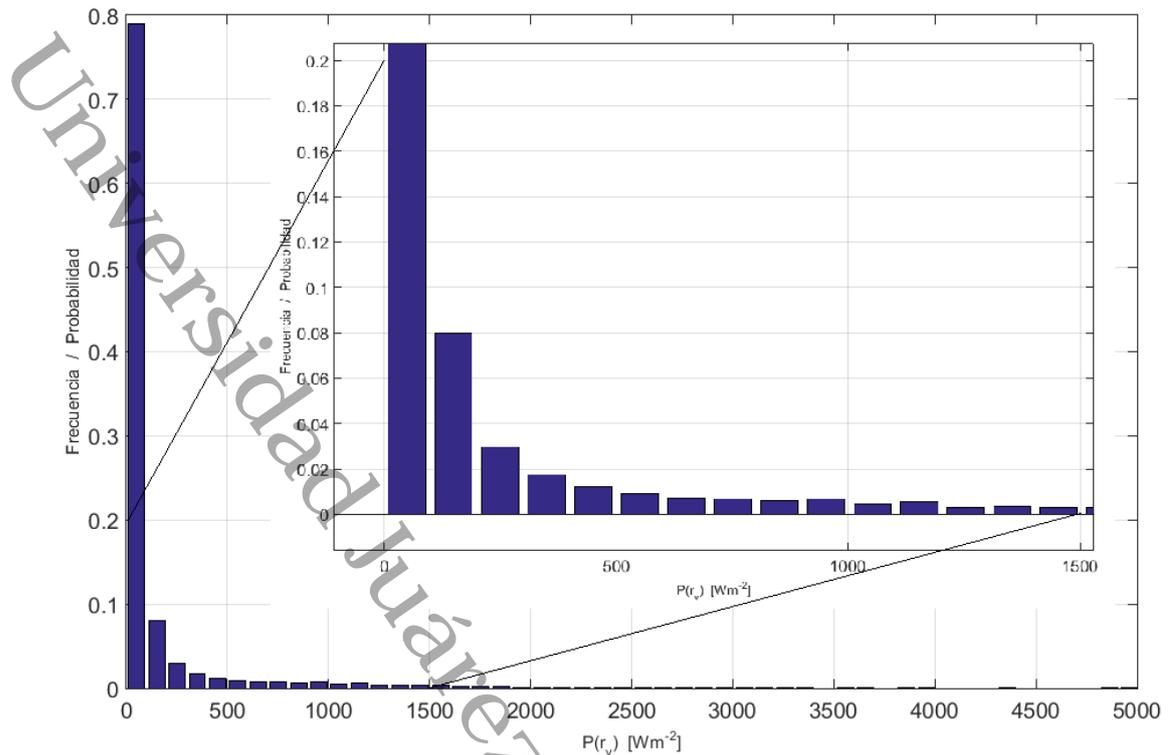


FIGURA 4.32: Detalles de la distribución frecuencias de la potencia disponible por unidad de área anual en Cuauhtemoczin I, 54 m., usando 50 bins.

El Factor de Capacidad (FC) de un GTE se establece como la integral definida del producto de la función del modelo de la curva de potencia del GTE y el modelo de la función de densidad de probabilidad del SE , cuyos límites de integración están entre la velocidad del viento que arranca la turbina v_{v_i} y la velocidad del viento donde GTE se detiene o deja de generar v_{v_o} .

$$FC = \int_{v_{v_i}}^{v_{v_o}} \mathcal{P}_{TE}(v_v | GTE) \mathcal{F}_W(v_v) dv_v \quad (4.10)$$

Donde:

$v_{v_i} = 4.00$: velocidad de inicio o arranque del GTE ; $v_{v_r} = 15.0$: velocidad donde la potencia de salida es nominal; $v_{v_o} = 25.00$: velocidad en la que el control del GTE lo deja fuera de operación. La Ec. 4.10 representa el FC ; $\mathcal{P}_{TE}(v_v | GTE)$: curva de potencia del GTE y $\mathcal{F}_W(v_v)$: modelo de densidad de probabilidad de Weibull o similar que mejor ajuste a la distribución de frecuencias de la r_v o v_v .

$$PEA = FC (8766) P_{elect} F_d \quad (4.11)$$

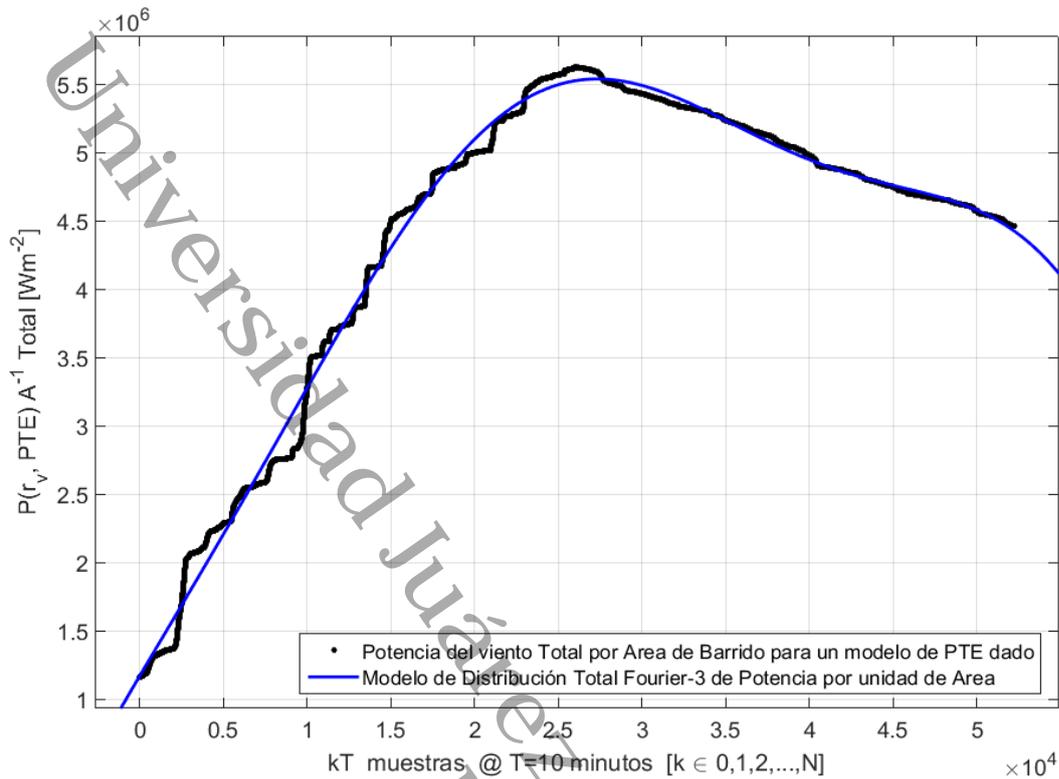


FIGURA 4.33: Producción de energía anual por unidad de área en Cuauhtemocztzin I, 54 m.

Donde:

PEA : producción de energía anual; FC : factor de capacidad de la GTE ; (8766): número de horas al año que equivalen a 52560 registros guardados cada 10 min; P_{elect} : potencia eléctrica de salida incluyendo los factores de eficiencia (ver Ec. 4.5) y F_d : factor de disponibilidad de la GTE .

La PEA obtenida directamente de la $P(r_v)$ se calcula a partir de los registros aplicando las ecuaciones adecuadas descritas anteriormente, con lo que se obtiene una producción de Energía Anual total o acumulada. La Fig.4.33 muestra el acumulado de la potencia en el tiempo (kT). Esta Producción de energía se modeló con Fourier-3 y ello permite ensayar cálculos aproximados con poca incertidumbre.

La estimación de la Potencia eólica es en $W m^{-2}$ como se abordó en el Apdo. anterior, esto tiene la ventaja de dejar la decisión de escoger una TE al final de cualquier $ERESE$ y su negociación. Esto permite decidir separadamente cual modelo de GTE es más conveniente utilizar y solo concentrarse en elegir tecnología-costo. Los 10 GTE comerciales de gran escala en uso hoy día cuyas alturas oscilan en los 150 m son los siguientes:

1. MHI Vestas V164-9.5MW.
2. Siemens Gamesa SG 8.0-167 DD.
3. Goldwind GW154 6.7MW.
4. Senvion 6.2M152.
5. GE Haliade 150-6MW.
6. Ming Yang SCD 6.0.
7. Doosan WindS500.
8. Hitachi HTW5.2-136.
9. CSIC Haizhuang H151-5.0MW
10. Adwen AD 5-135

Cuando se emplean *GTEs* con las más recientes tecnologías dan la posibilidad de convertir y generar grandes cantidades de energía eólica en energía electromecánica en una sola máquina cuando su rotor es mayor. Esto optimiza el uso de suelo en los parques eólicos ya sean en tierra o mar. Notar que la mayoría de los *GTEs* de la lista anterior tiene tres veces más altura que la más alta posición del anemómetro de los que se midió en Cuauhtemoczin. Las Figs. ?? y ?? muestran los resultados de ensayo de la estimación del total de la energía para Cuauhtemoczin I en sus dos alturas a 33 m.s.n.s. y 54 m.s.n.s. respectivamente en unidades [$Wm^{-2}año^{-1}$]. La estimación mostrada en ambas figuras incluyó la aplicación de un factor de eficiencia general de la *TE* el cual es típico para este tipo de maquinas, lo que hace mas aproximados y confiables los resultados. El calculo del total de la Potencia eólica por medio de las ecuaciones presentadas para 54 m.s.n.s. fue $6.96 \times 10^6 W m^{-2}año^{-1}$; este cálculo se realiza mediante el modelo pero sin descartar los registros no aprovechables.

TABLA 4.11: Rango Energético para Cuauhtemoczin I a 33 m.s.n.s.
 en (Latitud base=18.21° Norte; Longitud Base=94.09° Oeste).

Rango de velocidad (clase)	Frecuencia de ocurrencia (Frec/Clase)	Porcentaje de registros (%/clase)	Tiempo (hr/Clase)	Contenido de energía ($W m^{-2}/clase$)
0.0-0.5	2,797	5.5855	466.17	33.214
0.5-1.0	1,619	3.389	269.83	153.8
1.0-1.5	3,864	8.0884	644	1,238.9
1.5-2.0	4,387	9.1832	731.17	3,334.1
2.0-2.5	4,404	9.2188	734	6,537.2
2.5-3.0	4,638	9.7086	773	11,896
3.0-3.5	4,570	9.5663	761.67	18,614
3.5-4.0	4,265	8.886	707.5	25,810
4.0-4.5	3,658	7.6572	609.67	31,667
4.5-5.0	2,610	5.4635	435	30,994
5.0-5.5	1,848	3.8684	308	29,209
5.5-6.0	1,212	2.5371	202	24,870
6.0-6.5	854	1.7877	142.33	22,280
6.5-7.0	617	1.2916	102.83	20,105
7.0-7.5	477	0.99849	79.5	19,117
7.5-8.0	400	0.83731	66.667	19,459
8.0-8.5	387	0.8101	64.5	22,578
8.5-9.0	307	0.64264	51.167	21,261
9.0-9.5	336	0.70334	56	27,367
9.5-10.0	335	0.70125	55.833	31,825
10.0-10.5	319	0.66776	53.167	35,082
10.5-11.0	286	0.59868	47.667	36,163
11.0-11.5	233	0.48773	38.833	33,665
11.5-12.0	185	0.36726	30.833	30,370
12.0-12.5	118	0.24701	19.667	21,895
12.5-13.0	61	0.12769	10.167	12,732
13.0-13.5	36	0.075358	6	8,414.5
13.5-14.0	14	0.029306	2.3333	3,649.5
14.0-14.5	7	0.014654	1.1667	2,027.3
14.5-15.0	1	0.0020933	0.16667	320.62
15.0-16.0	1	0.0020933	0.16667	389.12
16.0-17.0	1	0.0020933	0.16667	466.73
17.0-18.0	1	0.0020933	0.16667	554.04
Totales Anual	44,828	93.837	7,471	5.5407e+05
Energ. No útil	($W m^{-2}$)			4,760.014
Energ. Eol. Disp.	($W m^{-2}$)	Disp. en Turbina	Anual	549,309.986
Energ. Elect. Disp	($W m^{-2}$)	Con un $C_p=0.35$	Anual	170,286.095

TABLA 4.12: Rango Energético para Cuauhtemoczin I a 54 m.s.n.s.
 en (Latitud base=18.21° Norte; Longitud Base=94.09° Oeste).

Rango de velocidad (clase)	Frecuencia de ocurrencia (Frec/Clase)	Porcentaje de registros (%/clase)	Tiempo (hr/Clase)	Contenido de energía ($W m^{-2}/clase$)
0.0-0.5	1,632	3.4162	272	19.38
0.5-1.0	965	2.02	160.83	91.675
1.0-1.5	2,381	4.9841	396.83	763.41
1.5-2.0	3,078	6.4431	513	2,393.3
2.0-2.5	3,560	7.4521	593.33	5,284.4
2.5-3.0	4,295	8.9906	715.83	11,017
3.0-3.5	4,405	9.2209	734.17	17,942
3.5-4.0	4,656	9.7463	776	28,308
4.0-4.5	4,497	9.4135	749.5	38,930
4.5-5.0	3,813	7.9817	635.5	45,279
5.0-5.5	2,915	6.1019	485.83	46,073
5.5-6.0	2,142	4.4838	357	43,954
6.0-6.5	1,446	3.0269	241	37,725
6.5-7.0	1,079	2,2586	179.83	35,159
7.0-7.5	791	1.6558	131.83	31,702
7.5-8.0	602	1.2602	100.33	29,281
8.0-8.5	478	1.0006	79.667	27,887
8.5-9.0	428	0.89592	71.333	29,641
9.0-9.5	338	0.70753	56.333	27,530
9.5-10.0	343	0.71799	57.167	32,585
10.0-10.5	274	0.57356	45.667	30,133
10.5-11.0	312	0.6531	52	39,451
11.0-11.5	289	0.60496	48.167	41,756
11.5-12.0	286	0.59868	47.667	46,950
12.0-12.5	272	0.56937	45.333	50,469
12.5-13.0	243	0.50867	40.5	50,718
13.0-13.5	212	0.44377	35.333	49,552
13.5-14.0	145	0.30353	24.167	37,799
14.0-14.5	97	0.20305	9.1667	17,634
14.5-15.0	55	0.11513	3.8333	8,136.7
15.0-15.5	23	0.048145	3.8333	8,136.7
15.0-16.0	8	0.016746	1.3333	3,113
16.0-16.5	6	0.01256	1	2,560.5
16.0-17.0	5	0.010466	0.83333	2,333.7
17.0-17.5	2	0.0041866	0.33333	1,018.3
17.5-19.0	1	0.0020933	0.16667	651.6
Totales Anual	46,074	96.446	7,679	9.0188e+05
Energ. No útil	($W m^{-2}$)			3,213.765
Energ. Eol. Disp.	($W m^{-2}$)	Disp. en Turbina	Anual	898,666.235
Energ. Elect. Disp	($W m^{-2}$)	Con un $C_p=0.35$	Anual	314,533.182

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Capítulo 5

Detalles de la energía eólica experimental en Cuauhtemoczin II

En este capítulo se desarrollan experimentaciones y se ensayan las metodologías introducidas en el capítulo 3. Esto para Cuauhtemoczin II desde la modelación de la rapidez del viento mediante el modelo de Weibull y otros, contrastado al modelo Weibull Bimodal. Se evalúa el recurso eólico mediante Weibull-2 Bimodal y se prueban los modelos multimodal para r_v y v_v como Weibull tetramodal y Poly-PI-N. Se realiza la evaluación energética, densidad de potencia y la producción de energía anual. Aquí se contrastan los modelos tradicionales y se ensayan y validan el uso de los modelos multimodales desarrollados en este trabajo. Esto para demostrar que el uso de estos modelos alternativos dan mejor certidumbre del recurso eólico en los SE.

5.1 Modelación de la rapidez del viento

La modelación de la r_v con Weibull-2 o Rayleigh es el procedimiento estándar en la comunidad de ERESE. Cuauhtemoczin II está separado de Cuauhtemoczin I una distancia $\simeq 4$ km a una altura de 26 m.s.n.s., ver Cap. 4. En la Fig. 5.1 (a) en la esquina superior izquierda se muestra un gráfico de los registros de cada 10 min anualizados. La Fig. 5.1 (b) superior derecha muestra el modelo de Weibull mediante dos gráficos: la función de densidad de probabilidades y la función de distribución acumulativa de frecuencias. Los valores de los parámetros de escala y forma en el modelo de Weibull para Cuauhtemoczin son $k_{26} = 2.87$ y $c_{26} = 1.46$. La Fig. 5.1 (c) muestra la prueba del ajuste del modelo de Weibull en escala Log-Log o Q-Q. La Fig. 5.1 (d)

muestra la prueba de ajuste al modelo Normal en escala Log-Log o Q-Q. Los cuartiles 2 y 3 están señalados como el mejor ajuste a la recta de probabilidad del modelo Weibull-2 y modelo Normal respectivamente. Comparativamente se ve que el ajuste del modelo Weibull con los registros es mejor que el logrado modelo Normal, ver incisos (c) y (d). Sin embargo un comparativo con otros modelos da una idea más clara de que hace falta mejorar el ajuste de Weibull como se muestra mas adelante.

La Fig. 5.2 muestra un comparativo de las modelaciones paramétricas ensayadas con funciones de densidad de la probabilidad. Aquí se aprecia que el ajuste de estos modelos a los extremos de cada una de las barras del histograma de frecuencias de la r_v . Estos modelos ajustan relativamente en valores $> 5 \text{ m s}^{-1}$ en adelante y estan sobredimensionados en los valores $< 5 \text{ m s}^{-1}$. El mejor de los modelos es no paramétrico denominado "Kernel". Este modelo no hay reportes de su uso en la ERESE. Este modelo Fue probado con una funciones de densidad Kernel o (KDF) no paramétrica, específicamente con Epanechnikov = $0.75(1 - \mu)I(|\mu \leq 1|)$, [70]. Donde la μ : es la media de la población de los registros empíricos de la r_v o v_v . En conclusión, la comparación de los modelos probabilísticos en los resultados mostrados en la Fig. 5.2 vemos que muestran errores. Esto tanto en los paramétricos como en los no paramétricos, ninguno logra un buen ajuste ya que las probabilidades obtenidas en el modelo rebasan los valores máximos de los registros medidos. Los valores probabilísticos de los modelos deben ser menores o iguales a los máximos de la distribución de referencia en evaluación del RE.

5.1.1 Modelo de Weibull-2 versus Weibull-2 Bimodal

El modelo de Weibull-2 como aparecen desde la Fig. 5.1 (b) Apdo. 5.1 a la Fig. 5.2 muestran el ajuste de Weibull-2 en su forma estándar a la distribución de frecuencias de Cuauhtemoczin II. Estos modelos tienen un ajuste parcial dado que el modelo no toca los centros de los extremos de las barras del histograma de frecuencias de la r_v para Cuauhtemoczin II a la altura de 26 m.s.n.s. La modelación bimodal le da más flexibilidad a Weibull-2 para hacer que este ajuste a más extremos de las barras del histograma de la base de registros. La Fig. 5.3 es un ensayo de la modelación bimodal sobre la misma base de datos subclasificada con 20 bins de Cuauhtemoczin II. El número de bins utilizado para la sub-clasificación de la distribución de la r_v para Cuauhtemoczin II mostrado en la Fig. 5.3 es igual al número de bins de la de la Fig. 5.2. El comparativo del ajuste del modelo Weibull-2 en modal 1 o forma estándar versus el modelo Weibull-2 bimodal es mostrado en ambas figuras.

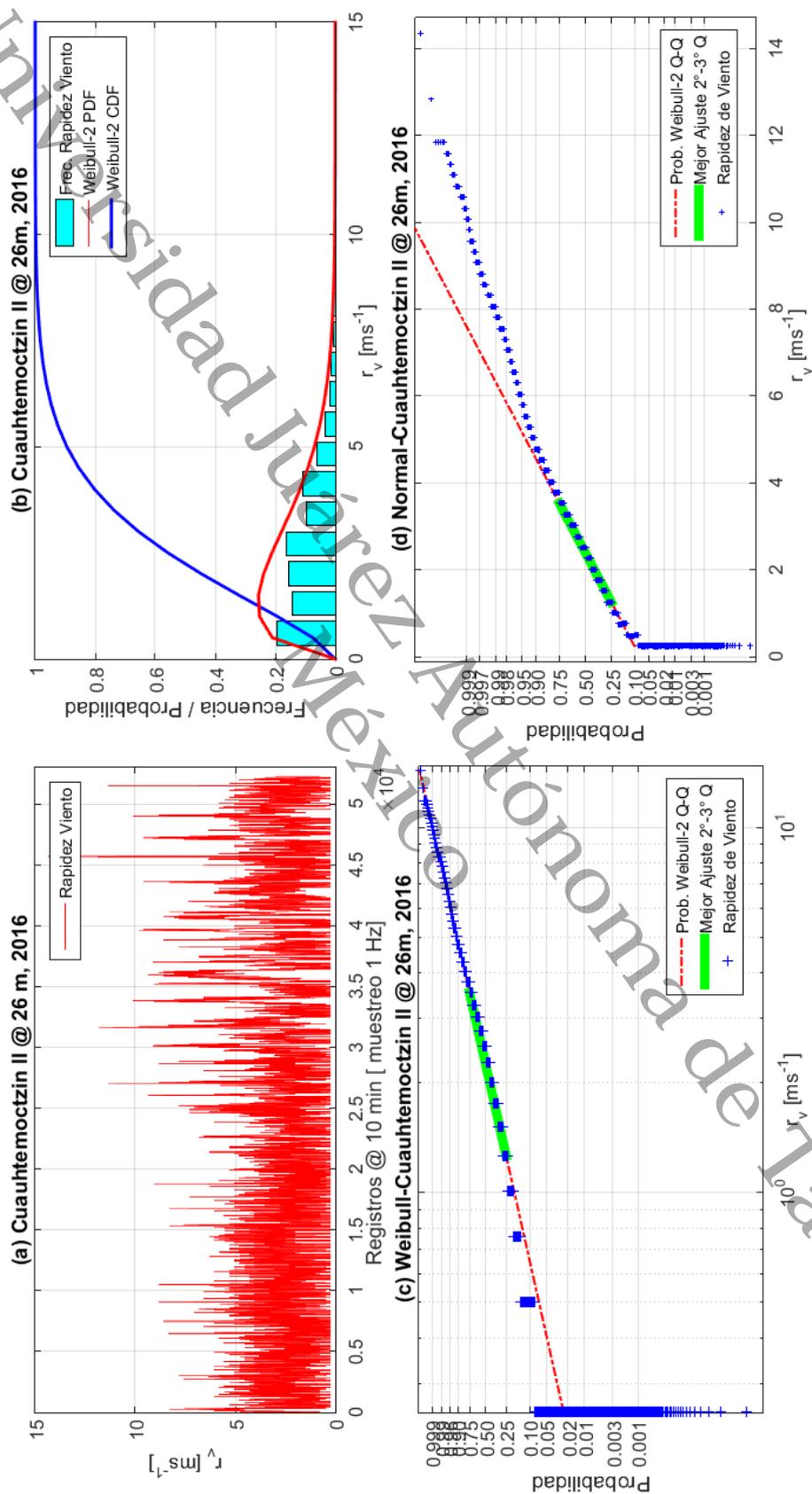


FIGURA 5.1: (a) Vista general de base de datos anual de la r_v , (b) modelo de Weibull-2, distribución acumulativa y distribución de frecuencias anual de la r_v en 10 bins, (c) Gráfico de ajuste de Weibull-2 Q-Q y (d) Gráfico de ajuste del modelo Normal Q-Q anual para la r_v en Cuauhtemoc II a 26 m.s.n.s., subclasificado con 12 bins.

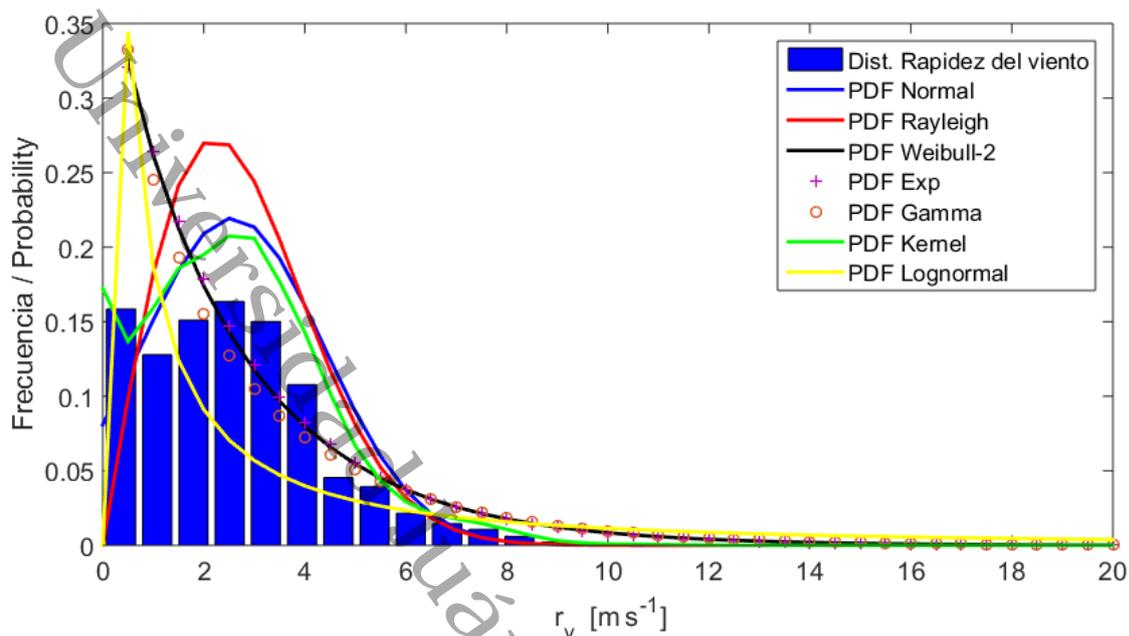


FIGURA 5.2: Comparativo de modelación de la distribución de frecuencias anual para la r_v en Cuauhtemoczin II a 26 m.s.n.s., subclasificado con 14 bins, utilizando modelos de funciones de densidad de probabilidades: PDF-Normal, PDF-Rayleigh, PDF-Weibull-2, PDF-Exponencial, PDF-Gamma, PDF-Kernel y PDF-LogNormal.

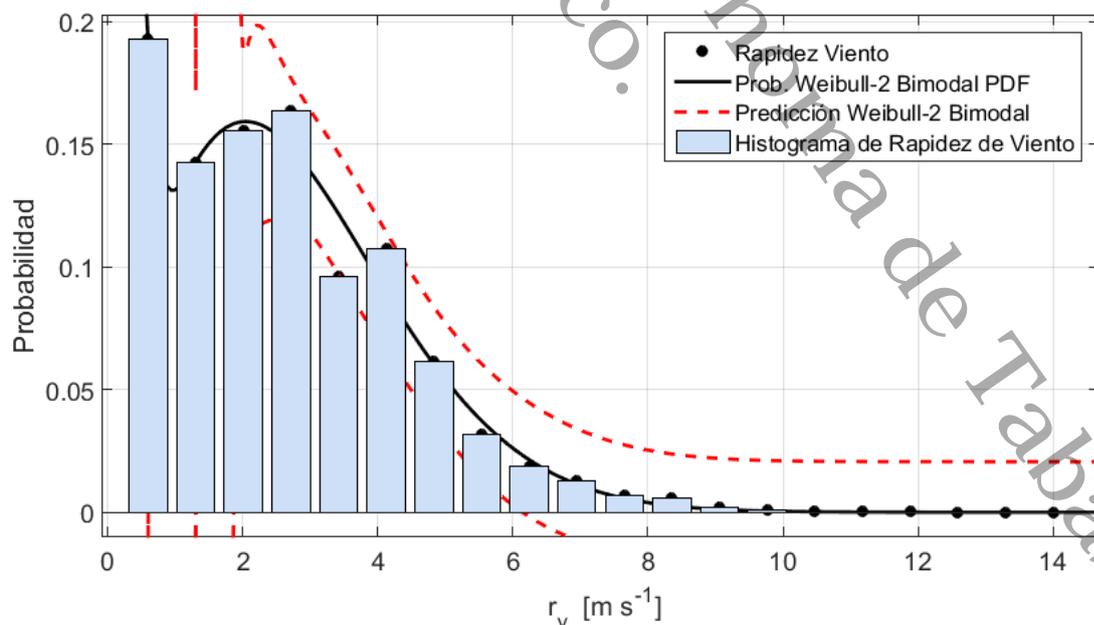


FIGURA 5.3: Modelación de la distribución de frecuencias anual para la r_v en Cuauhtemoczin II a 26 m.s.n.s., subclasificado con 14 bins, PDF-Weibull-2 bimodal como función de densidad de probabilidades.

5.2 Evaluación del recurso eólico

La ERESE requiere que el modelo que se utilice tenga el mejor ajuste sobre las distribuciones de frecuencia de los registros de r_v o v_v . Este ajuste típicamente utiliza el Índice de correlación R^2 y algunos otros como el RMSE para medirlo. El objetivo principal previo a la evaluación de la $P(v_v)$ o la $E(v_v)$ es contar con el modelo que logre el mejor ajuste a las base de datos del SE.

Hasta aquí se ha demostrado que si aumentamos el número de modos del Modelo de Weibull-2 se mejora el ajuste, ver Figs. 5.2 y 5.3. Al incrementar el número de modales en el modelo Weibull-2 el ajuste mejora notoriamente.

5.2.1 Modelo eólico de un sitio específico: Caso Cuauhtemoczin II

El SE de Cuauhtemoczin II se instrumentó con una estación meteorológica de 31 m.s.n.s. en la entrada del poblado Cuauhtemoczin sobre la carretera costera a Paraiso, Tab. El anemómetro y la veleta se instalaron a 26 m.s.n.s. para hacer una correlación de alturas con las mediciones de Cuauhtemoczin I. La distancia entre las dos estaciones es de menos de 4 km y una diferencia de altura de 7 m con la medición a 33 m.s.n.s y de 28 m con la medición a la altura de 54 m.s.n.s. en Cuauhtemoczin I.

5.2.1.1 Modelo Weibull bimodal

El modelo Weibull-2 bimodal está representado en la Ec. 5.1. Este modelo hace que cada uno de los modales agrega un término adicional por cada término modal del modelo. Este término representa la probabilidad de su primer modo y el segundo término es el complemento de probabilidad.

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_{2W}(v_v) = & p_{v_v}(1) \left(\frac{k_1}{c_1}\right) \left(\frac{v_v}{c_1}\right)^{(k_1-1)} \exp \left[- \left(\frac{v_v}{c_1}\right)^{k_1} \right] \\ & + p_{v_v}(2) \left(\frac{k_2}{c_2}\right) \left(\frac{v_v}{c_2}\right)^{(k_2-1)} \exp \left[- \left(\frac{v_v}{c_2}\right)^{k_2} \right] \end{aligned} \quad (5.1)$$

El ajuste de los parámetros de Weibull-2 bimodal se logra manualmente si se entiende lo que representa cada uno de los parámetros del modelo en la forma estándar Weibull-2 y se propone una probabilidad de uno de los modales y de los parámetros del primero y segundo modal. De acuerdo a la metodología

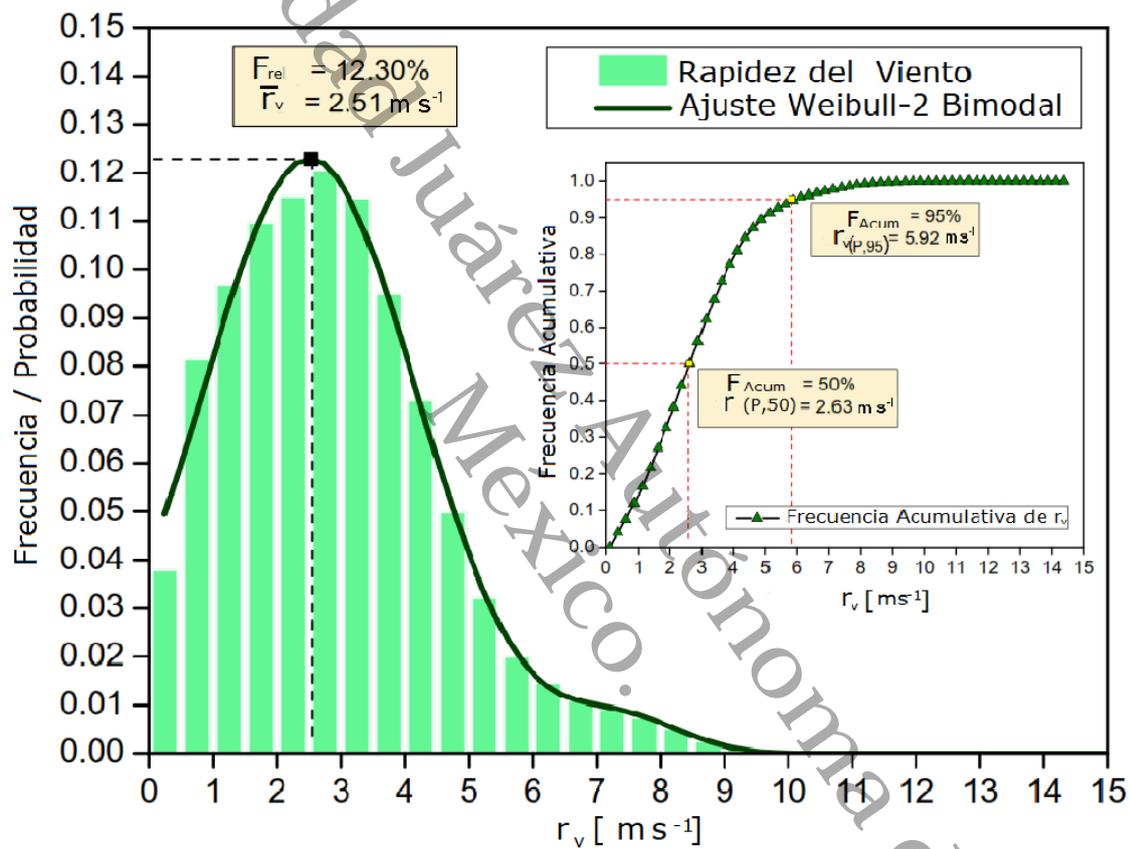


FIGURA 5.4: Ajuste de la distribución de frecuencias de la r_v en Cuauhtemoczin II a 26 m.s.n.s., en 20 bins (sub-classes), con el modelo de Weibull-2 Bimodal anual de la función de densidad de probabilidad.

propuesta en este trabajo se hace una prueba de modelación seguido de una prueba de R^2 al tiempo que se observa gráficamente el modelo en comparación a la distribución de frecuencias. Este procedimiento se realiza repetitivamente hasta lograr el mejor ajuste. La Fig. 5.4 muestra el mejor ajuste que se puede lograr sobre un conjunto de registros de prueba que representa un periodo de la campaña de medición en Cuauhtemotzin II. Aquí se muestran varios datos: la media de la r_v , la frecuencia relativa de dicha media. La función de distribución acumulativa muestra que entre el 50 % y 95 % corresponden a la r_v dentro del primer modal. El rango de r_v esta entre 2.70 m s^{-1} y 5.80 m s^{-1} . El segundo modal representa el 5 % hasta completar el 100 %

5.2.1.2 Modelos Lopman-Multimodal para r_v y v_v

Cuando la distribución de frecuencias de la r_v o v_v no se puede ajustar mejor, entonces ensayar y ajustar modelos multimodales puede ser la mejor opción. En este trabajo ensayamos varias opciones de multimodalidad para lograr un mejor ajuste a las distribuciones de frecuencia con funciones de densidad de probabilidades.

El modelo de Weibull se puede hacer multimodal hasta lograr un mejor ajuste de la distribución de probabilidades. Weibull además de tener la configuración de Weibull-2 puede ser de tres parámetros o Weibull-3 [72]. Este modelo Weibull-3 logra más precisión pero está limitado a una distribución global unimodal, englobando todos los registros como una sola modal o régimen de viento. En esta investigación se probó que en las zonas costeras los modales pueden ser mayores a dos, tres, cuatro o más. Esto requiere el uso de un modelo más completo para lograr un ajuste mas adecuado. Una de los primeros ensayos realizados fue el Weibull-2 Tetra-modal. La Ec. 5.2 retoma la modelación con 4 modales. Para lograr balancear los parámetros adicionales a cada modal de la función de densidad de probabilidades Weibull-2 tetramodal se propuso la Ec. 5.3 para distribuir las probabilidades complementarias de los demás modales dentro de la Ec. 5.2. La referencia esencial es que la sumatoria de todos los términos $p_{v_v}(i)$ debe ser igual a 1. La Fig. 5.5, Fig. 5.6 y Fig. 5.7 son ensayos realizados con la Ec. 5.2. La Fig. 5.5 muestra el ajuste a la distribución bimodal de frecuencias tomada de dos grupos de dirección dominantes. Estas dos direcciones se escogen desde la base de registros y se superponen en el histograma identificando de origen dos modales. La distribución solo se pudo ajustar con un modelo Weibull-2 Tetra-Modal . La Fig. 5.5 indica los valores de los parámetros de los cuatro modales. En este caso particular se utilizó un solo parámetro general que representa una pendiente de ajuste para el modelo Weibull-2 Tetra-Modal lo cual ajustó como se muestra.

$$\begin{aligned}
\mathcal{F}_{4W}(v_v) = & p_{v_v}(1) \left(\frac{k_1}{c_1}\right) \left(\frac{v_v}{c_1}\right)^{(k_1-1)} \exp\left[-\left(\frac{v_v}{c_1}\right)^{k_1}\right] \\
& + p_{v_v}(2) \left(\frac{k_2}{c_2}\right) \left(\frac{v_v}{c_2}\right)^{(k_2-1)} \exp\left[-\left(\frac{v_v}{c_2}\right)^{k_2}\right] \\
& + p_{v_v}(3) \left(\frac{k_3}{c_3}\right) \left(\frac{v_v}{c_3}\right)^{(k_3-1)} \exp\left[-\left(\frac{v_v}{c_3}\right)^{k_3}\right] \\
& + p_{v_v}(4) \left(\frac{k_4}{c_4}\right) \left(\frac{v_v}{c_4}\right)^{(k_4-1)} \exp\left[-\left(\frac{v_v}{c_4}\right)^{k_4}\right]
\end{aligned} \tag{5.2}$$

para sintonizar los parámetros de probabilidades en la Ec. 5.2 se planteó la Ec. 5.3 que permite mejorar los ajustes en los modelos Weibull-2 Tetra-Modal.

$$p_{v_v}(M) = [1 - \sum_{i=1}^{M-1} (p_{v_v}(i))] \tag{5.3}$$

Donde:

$p_{v_v}(M)$: probabilidad del modo M ; $M-1$: resto de los modos; $1 - \sum_{i=1}^{M-1} (p_{v_v}(i))$: complemento de las probabilidades de los modales.

La Fig. 5.6 es un primer ensayo de aproximación a la modelación con Weibull-2 Tetra-Modal empleando la Ec. 5.2. Esta modelación aunque es Weibull-2 Tetra-Modal el ajuste se detuvo antes de lograr el mejor ajuste para comparación. La Fig. 5.7 muestra una modelación Weibull-Tetra-Modal con la Ec. 5.2 con refinamiento en el ajuste. Los valores de los parámetros obtenidos en estos ensayos se pueden revisar en la Tabla 5.1.

La modelación para Cuauhtemoczin II a 26 m s^{-1} de la \bar{v}_v con PolyPI-7 se logró como se muestra en la Fig. 5.8. El modelo aquí muestra que las velocidades medias más altas son más probables en las direcciones NNO, N y NNE. Los valores de las \bar{v}_v por cada una de las d_v se puede obtener con este modelo para cada una de ellas. Con los valores promedio de v_v por cada d_v se puede calcular el valor promedio de la $P(\bar{v}_v | d_v)$. La Fig. 5.9 y la Fig. 5.10 muestra ensayos de modelación para r_v con PolyPI-7 en la forma de función de distribución de frecuencias y de función de densidad de probabilidades. La Tabla 5.2 muestra los resultados de los parámetros obtenidos en los ensayos mostrados en las Figs. 5.9 y 5.10.

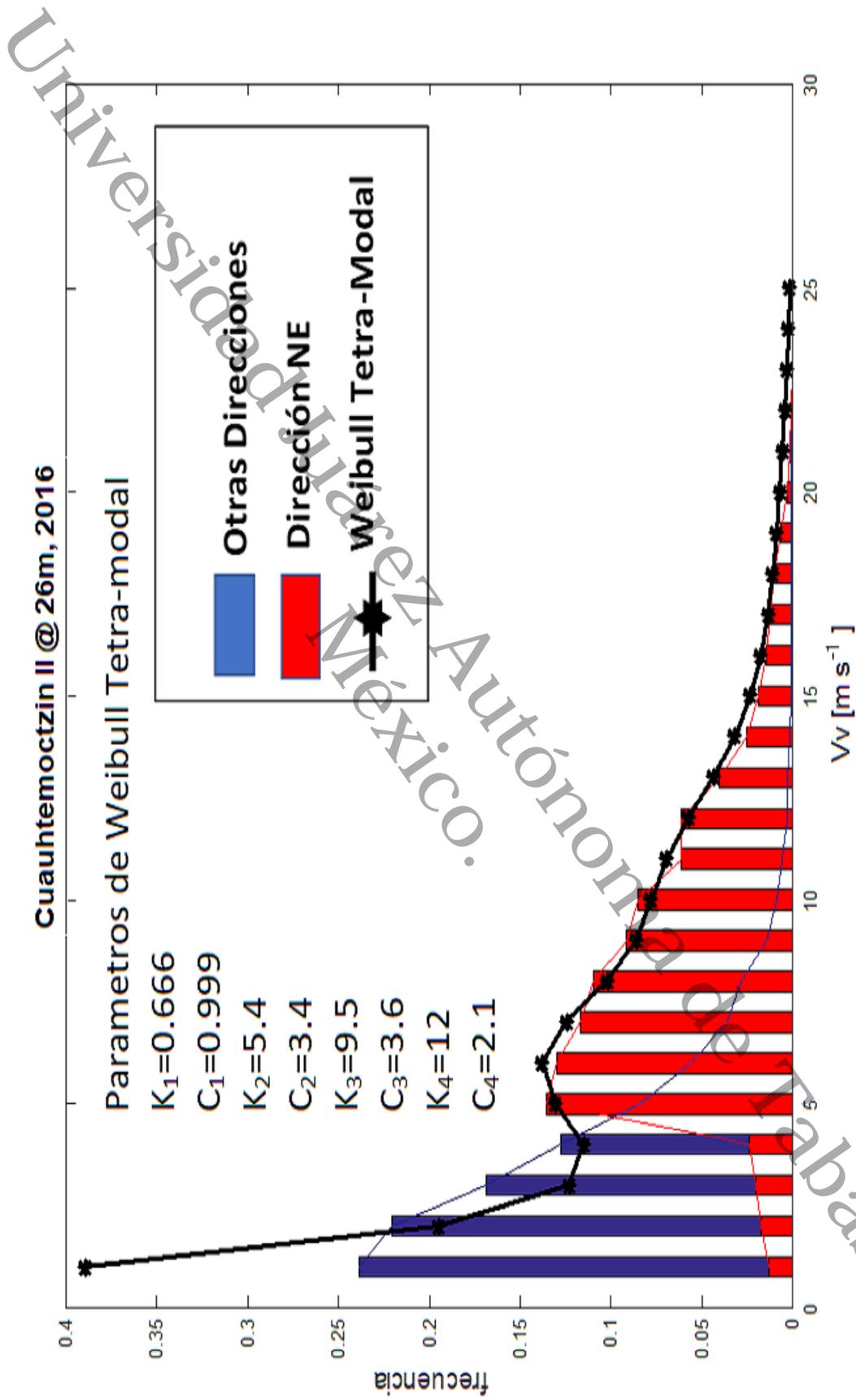


FIGURA 5.5: Ajuste de la distribución de frecuencias bimodal seleccionada para dos sectores de d_v para Cuauhtemoczin II y ajustada en modo multimodal con Weibull-2 Tetra-modal de 9 parámetros.

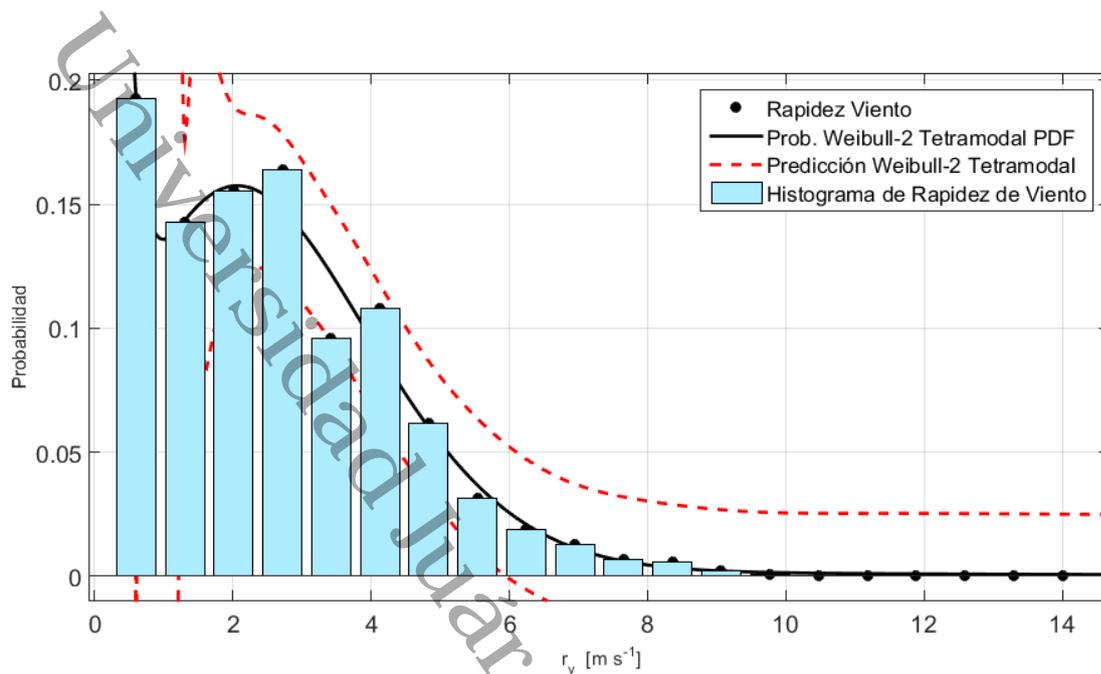


FIGURA 5.6: Distribución de frecuencia de Cuauhtemoczin II, ajustada en modo multimodal Weibull-2 Tetra-modal como función de densidad de probabilidad.

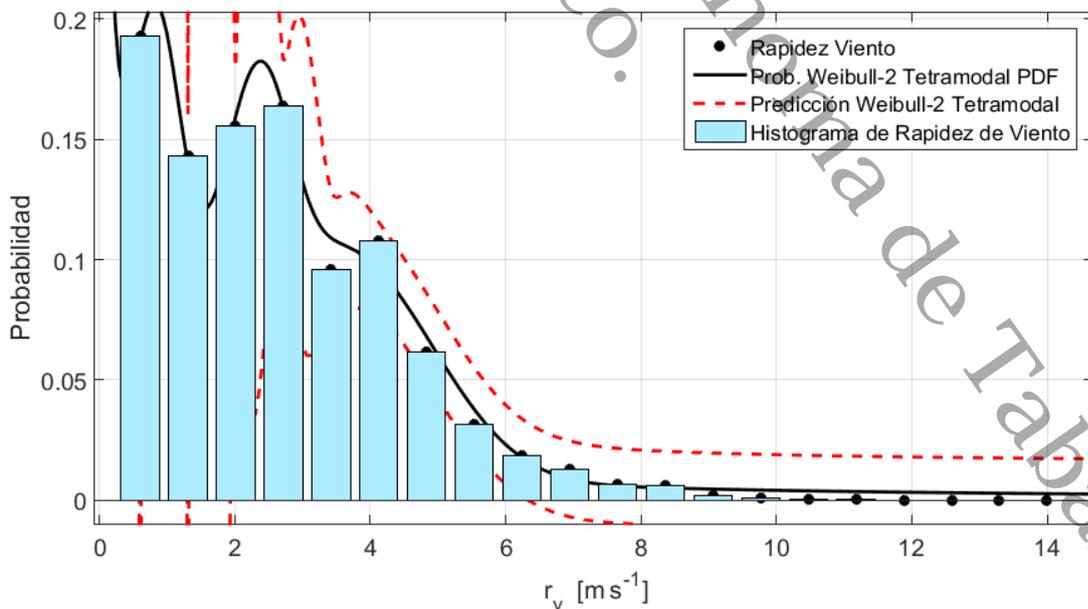


FIGURA 5.7: Distribución bimodal de Cuauhtemoczin II y ajustada en modo multimodal Weibull-2 Tetra-modal como función de densidad de probabilidad con mejor ajuste.

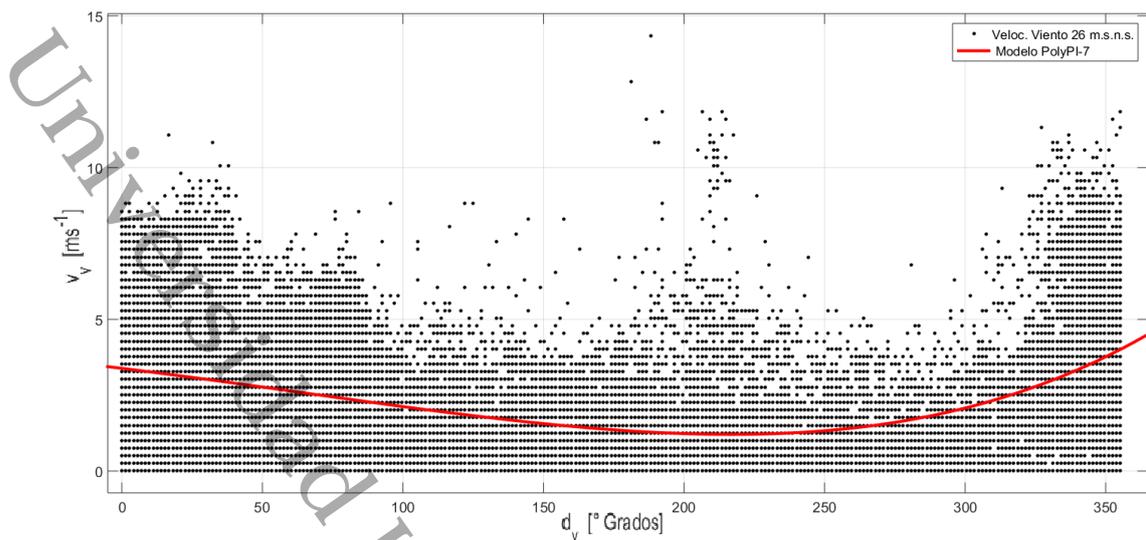


FIGURA 5.8: Modelación con PolyPI-7 de la $\overline{v_v}$ anual en Cauhtemoctzin II a 26 m.s.n.s.

5.2.2 Cálculo y ajuste de parámetros

El ajuste de los parámetros del modelo Weibull-2 bimodal o Tetra-Modal requiere identificar los valores de v_v o r_v en donde la distribución de frecuencia aparece una especie de joroba o incremento en la frecuencia. Por cada una de estas jorobas se agrega un modal que equivale a tres parámetros por modal. Con la aparición de las diferentes formas de distribución que se revisaron se propuso y ensayaron otras configuraciones de las ecuaciones de Weibull ya presentadas. Se propuso la sintetización del tercer parámetro de probabilidad empleado en cada modo del modelo de Weibull-2 desde la configuración bimodal a multimodal. Este parámetro se sintetizó en uno solo que representa a cada uno de los que deben incluirse en cada uno de los modos. Estas nuevas estructuras multimodales de Weibull-2 deben incluir una probabilidad por modal y la suma de todos debe ser menor o igual a 1. En su lugar se agregó un solo factor de probabilidad que representa a todas las demás. Esto implica que solo se debe agregar y modelar un parámetro adicional en el modelo global ya sea bimodal, tetramodal o mayor. En síntesis en esta metodología se debe reajustar este parámetro hasta lograr la mejor similitud entre el modelo y la distribución de frecuencias medidas o empíricas.

En este ensayo se pudo desarrollar también un segundo modelo Weibull-2 Tetramodal de 9 parámetros en vez de 12 parámetros. La Fig. 5.11 muestra la comparación de ajuste de un modelo Weibull-2 Tetra-Modal, en el cual se muestra el efecto de utilizar o eliminar el tercer parámetro sustituto al modelo de Weibull-2 Multimodal, ver Ec. 5.4.

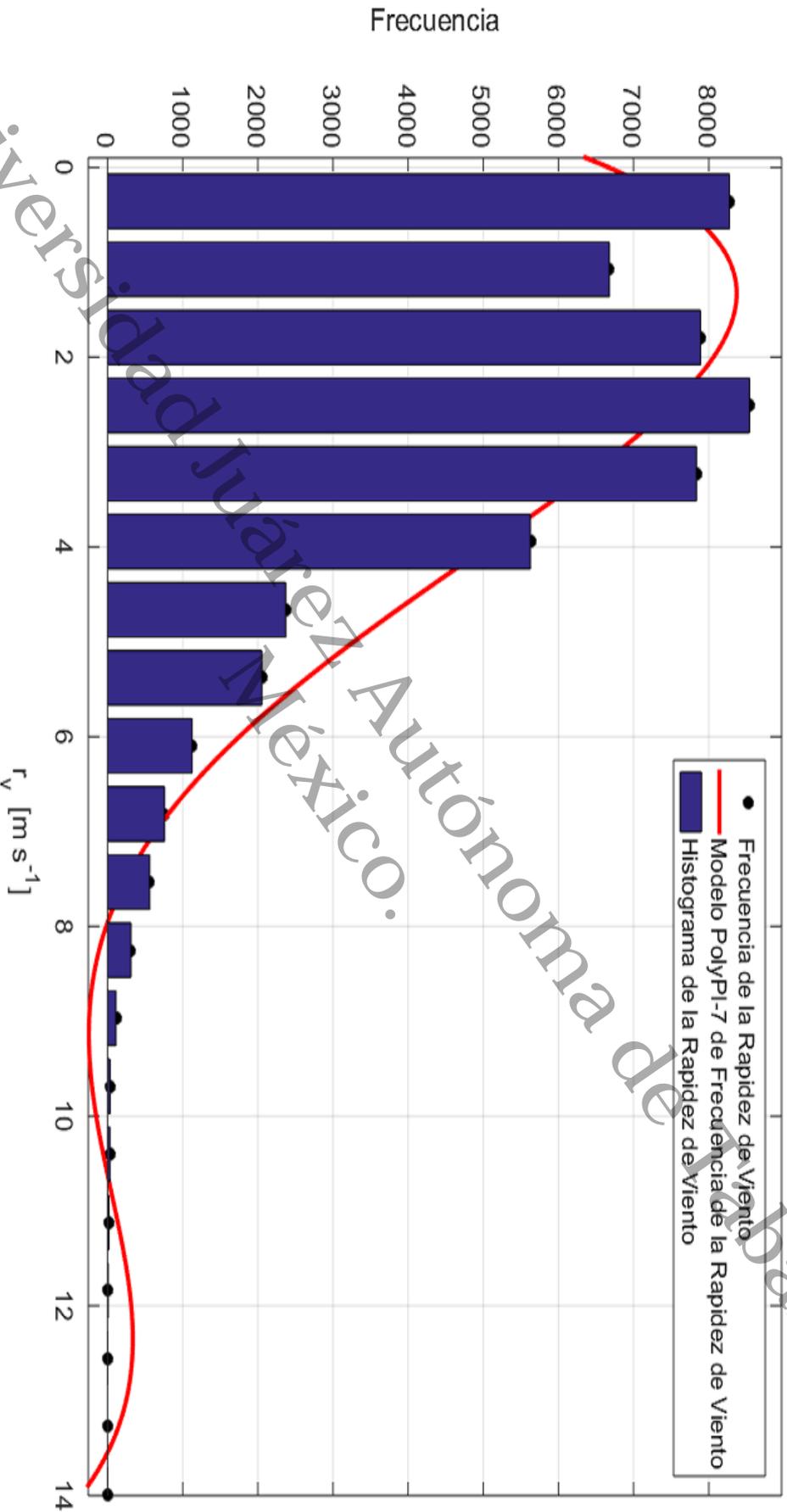


FIGURA 5.9: Modelación de la distribución de la frecuencia de r_v de Cuauhtemoczin II y ajustada en modo multimodal con PolyPI-7 con multiplicidad modal $m = 3$ como función de la distribución de frecuencia de la r_v representada por $f(x) = \lambda(x-a)(x-b)(x-c)(x-d)(x-e)^3 + f$, donde $p(r_v) = f(x)$, ver Tabla 5.2.

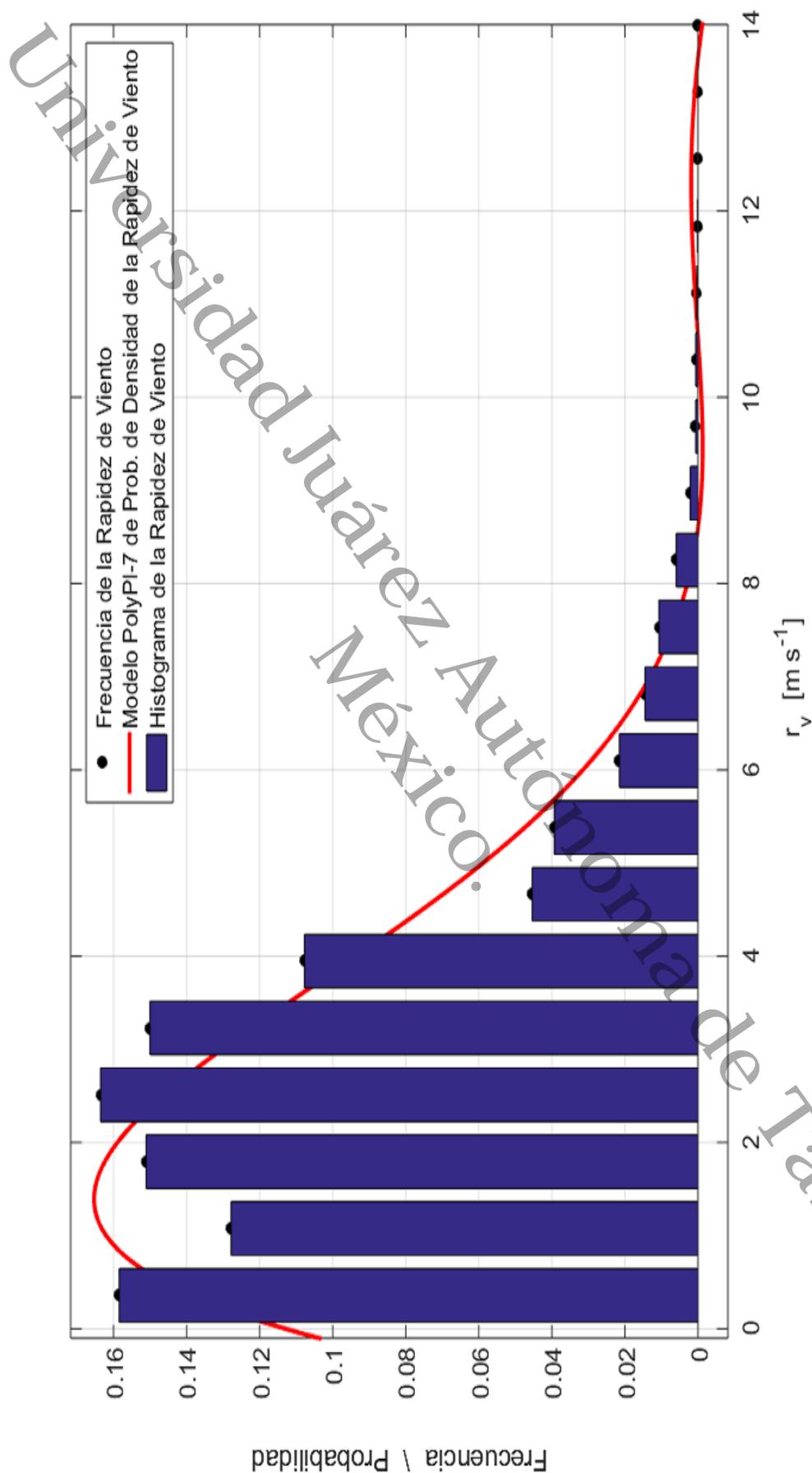


FIGURA 5.10 Modelación de función de densidad de probabilidad de Cuauhtemotzin II y ajustada en modo multimodal con PolyPI7 con multiplicidad modal $m = 3$ como función de la densidad de la probabilidad representada por $f(x) = \lambda (x - a) (x - b) (x - c) (x - d) (x - e)^3 + f$, donde $p(r_v) = f(x)$, ver Tabla 5.2.

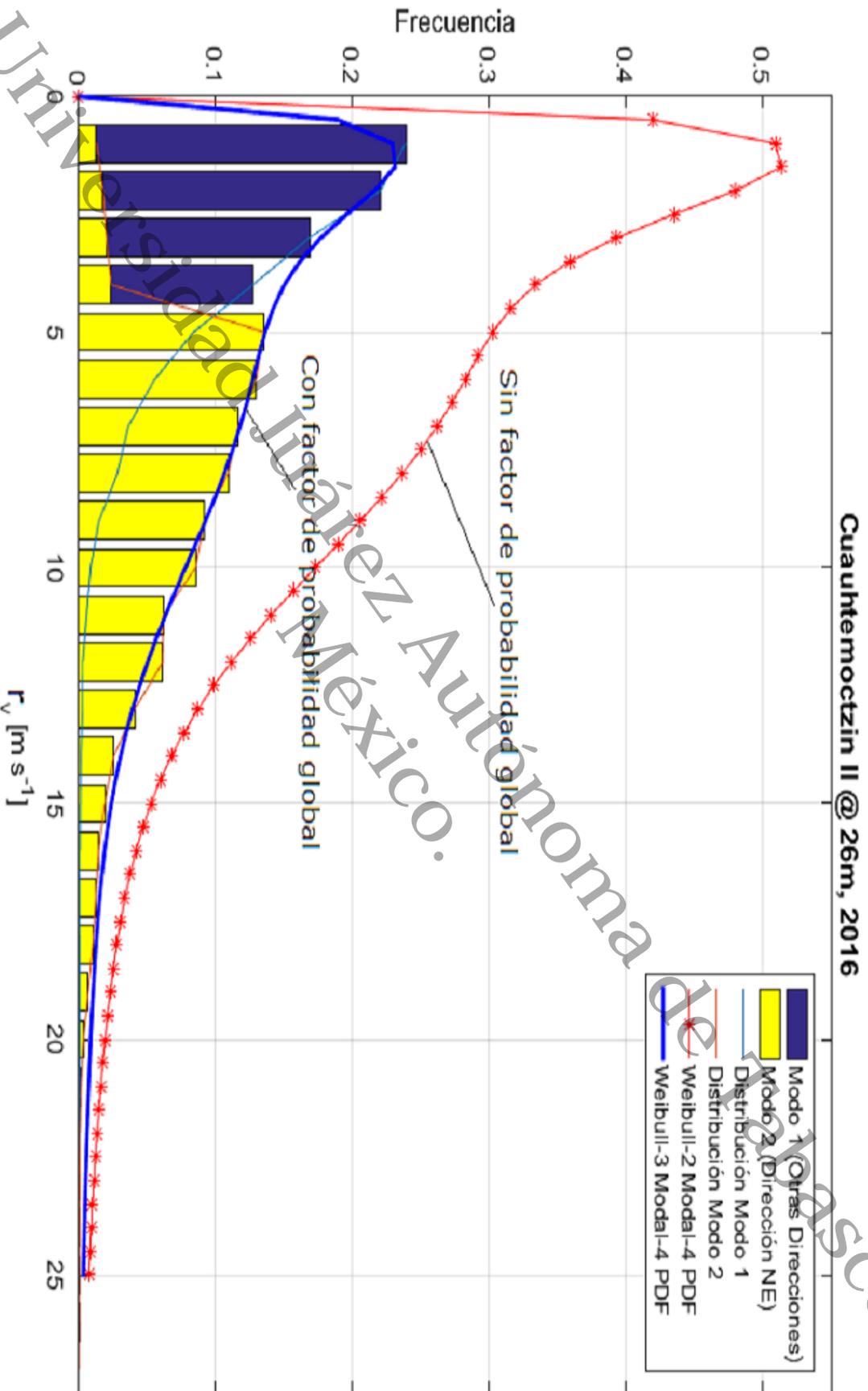


FIGURA 5.11: Comparación de ajuste del modelo de Distribución bimodal de Cuauhtemoczin II ajustada en modo multimodal Weibull-2 Tetra-modal de 9 parámetros (con y sin factor de probabilidades global)

TABLA 5.1: Modelación con Weibull-2 Tetramodal de 12 parámetros usando $\mathcal{F}_{4W}(r_v) = 0.12 * (a/b) * (x/b)^{(a-1)} * \exp(-(x/b)^a) + 0.45 * (c/d) * (x/d)^{(c-1)} * \exp(-(x/d)^c) + 0.3 * (e/f) * (x/f)^{(e-1)} * \exp(-(x/f)^e) + 0.13 * (h/g) * (x/g)^{(h-1)} * \exp(-(x/g)^h)$ para Coeficientes con límites de confianza y predicción en 95%: como función de densidad de probabilidades de la r_v , ver Figs. 5.6 y 5.7.

Ensayo Núm./ Medición en [m.s.n.s.]	Parámetro Weibull [s/p]	Valor del parámetro [-]	Rango de búsqueda y confianza [-]
01/26	k_1	1.894	(-86.04, 89.83)
	c_1	3.39	((-152.6, 159.4)
	k_2	1.914	(-16.06, 19.89)
	c_2	3.199	(-37.34, 43.74)
	k_3	0.2818	(-2.468, 3.031)
	c_3	0.187	(-2.816, 3.19)
	k_4	0.3472	(-0.3181, 1.012)
	c_4	1.616	(-64.1, 67.33)
	SSE:	0.001298	RMSE: 0.0104
	R^2 :	0.9847	$R^2_{ajustada}$: 0.9758
02/26	k_1	2.882	(-74.76, 80.53)
	c_1	0.9789	(0.7837, 1.174)
	k_2	0.2873	(-0.3724, 0.9471)
	c_2	1.989	(-15.72, 19.7)
	k_3	3.178	(2.628, 3.728)
	c_3	4.012	(3.539, 4.486)
	k_4	2.401	(1.775, 3.027)
	c_4	4.957	(1.382, 8.532)
	SSE:	0.000519	RMSE: 0.006577
	R^2 :	0.9939	$R^2_{ajustada}$: 0.9903

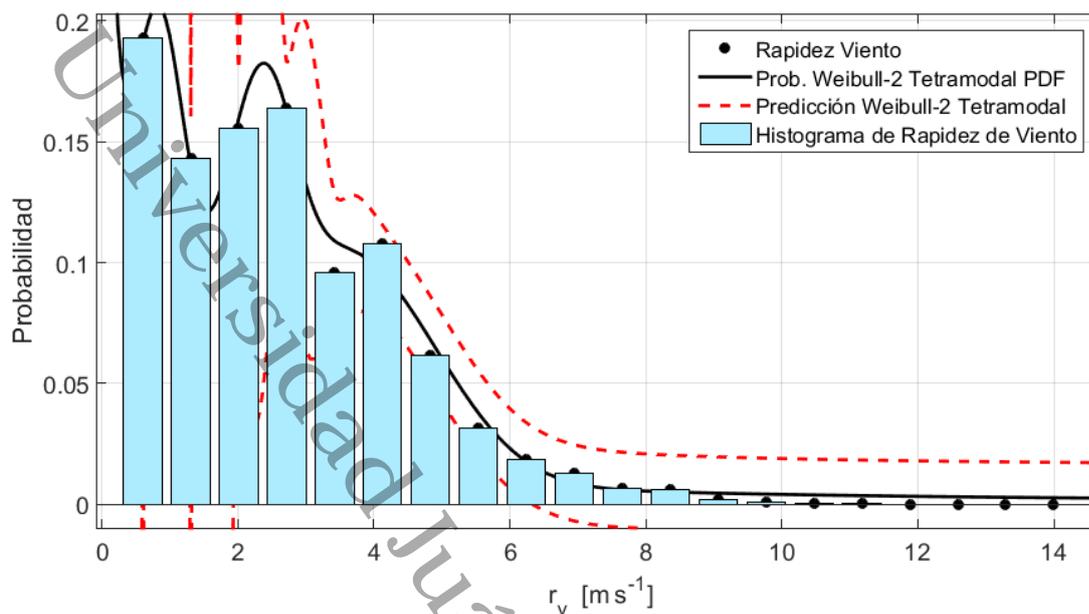


FIGURA 5.12: Modelación Distribución Tetramodal Weibull-2 para Cuauhtemoczin II ajustada en modo multimodal de Weibull-2 Tetra-Modal de 12 parámetros exhibiendo mejor ajuste, ver Ec. 5.4.

$$\begin{aligned}
 \frac{\mathcal{F}_{4W}(v_v)}{p_{v_v}(m)} &= \left(\frac{k_1}{c_1}\right) \left(\frac{v_v}{c_1}\right)^{(k_1-1)} \exp\left[-\left(\frac{v_v}{c_1}\right)^{k_1}\right] \\
 &+ \left(\frac{k_2}{c_2}\right) \left(\frac{v_v}{c_2}\right)^{(k_2-1)} \exp\left[-\left(\frac{v_v}{c_2}\right)^{k_2}\right] \\
 &+ \left(\frac{k_3}{c_3}\right) \left(\frac{v_v}{c_3}\right)^{(k_3-1)} \exp\left[-\left(\frac{v_v}{c_3}\right)^{k_3}\right] \\
 &+ \left(\frac{k_4}{c_4}\right) \left(\frac{v_v}{c_4}\right)^{(k_4-1)} \exp\left[-\left(\frac{v_v}{c_4}\right)^{k_4}\right]
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

Donde:

$p_{v_v}(m)$: probabilidad global del modelo, su valor es $\simeq m$: numero de modales.

TABLA 5.2: Modelación con PolyPI-7 para la r_v como función $f(x) = \lambda(x-a)(x-b)(x-c)(x-d)(x-e)^3 + f$ para Coeficientes con límites de confianza y predicción en 95% ensayado sobre: (1) función de distribución de frecuencias y (2) función de densidad de probabilidades de la r_v , ver Figs. 5.9 y 5.10

Ensayo Núm./ Medición en [m.s.n.s.]	Parámetro Weibull [s/p]	Valor del parámetro [-]	Rango de búsqueda y confianza [-]
01/26	λ	1.56e-02	(Ajustado al límite)
	a	7.958	(6.356, 9.56)
	b	13.55	(11.82, 15.27)
	c	-1.318	(-2.137, -0.4993)
	d	10.62	(7.718, 13.52)
	e	81.6	(65.78, 97.42)
	f	5.21e-04	(Ajustado al Límite)
	SSE:	1.038e+07	RMSE: 831.7
	R^2 :	0.9522	$R^2_{ajustada}$: 0.9395
02/26	λ	1.005e-5	(Ajustada al límite)
	a	-0.8592	(-1.442, -0.2766)
	b	8.597	(4.618, 12.58)
	c	13.64	(6.147, 21.12)
	d	10.64	(1.674, 19.6)
	e	27.2	(17.74, 36.67)
	f	5.21e-04	(Ajustada al Límite)
	SSE:	0.003786	RMSE: 0.01589
	R^2 :	0.9524	$R^2_{ajustada}$: 0.9397

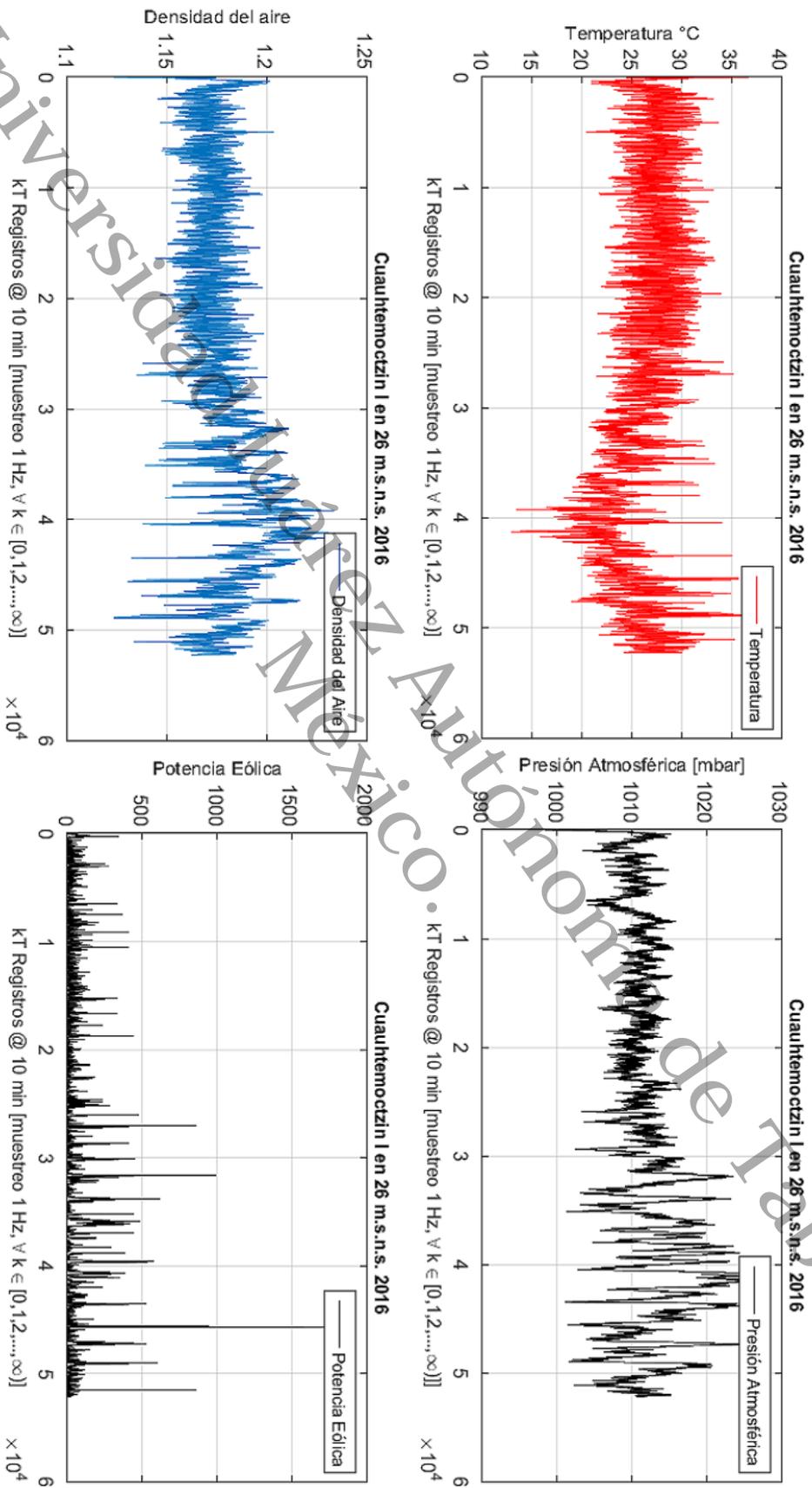


FIGURA 5.13: Cálculo de la $P(v_0)$ en función de sus componentes para Cuauhtemoczin II

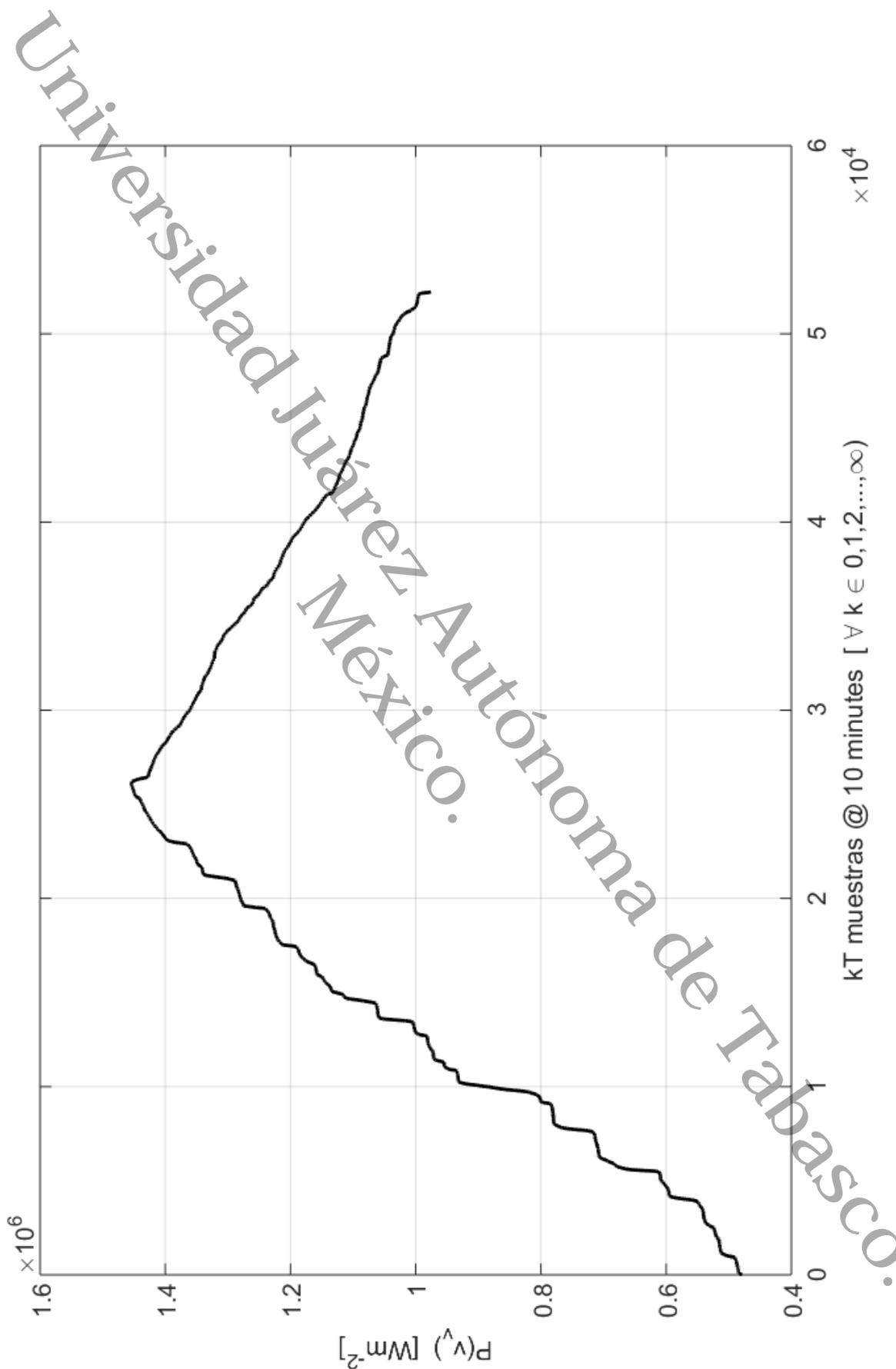


FIGURA 5.14: Cálculo de la potencia total de Cuauhtemoczin II usando un V27

5.2.3 Evaluación energética

Para el caso de Cuauhtemoczin II a 26 m.s.n.s., la $P(r_v)$ disponible en el viento es calculada con las mismas ecuaciones que en Cuauhtemoczin I y representada en la Fig. 5.13.

La potencia representada aquí incluye la convolución con la función de la curva de potencia del GTE. En lugar de convolucionar con uno de los modelos obtenidos para la r_v se convolucionó con el valor real de r_v . Esto es equivalente a el FC con valor más realista (posteriori) dado que existen los registros. La Fig. 5.13 muestra un desarrollo de un FC más cercano a la realidad. De aquí se pueden derivar los cálculos que se deseen realizar según sea el caso para la $P(v_v)$ por unidad de área o la PEA de cualquier periodo.

5.2.3.1 Producción de energía anual

Aplicando las ecuaciones definidas en el Cap. 3 y Cap. 4 se puede obtener la PEA para 26 m.s.n.s. del SE de Cuauhtemoczin II. La Fig. 5.14 muestra la $P(v_v)$ disponible dado un GTE, en este caso para un Vestas 27. Con la Fig. 5.14 se puede determinar la PEA disponible para cualquier fecha escogiendo el rango de registros adecuado. Los valores obtenidos desde estas figuras no incluyen los factores C_p , η_{mec} , η_{elect} , F_d ni los necesarios para tomar en cuenta las condiciones reales del SE o del GTE.

La Fig. 5.15 muestra un comparativo de la potencia por unidad de área para las alturas de 26 m.s.n.s., 33 m.s.n.s. y 54 m.s.n.s. El valor de la PEA en 26 m.s.n.s. fue de 242.33 kW m^{-2} cada año, el valor de la PEA en 33 m.s.n.s. fue de 611.15 kW m^{-2} cada año y valor de la PEA en 54 m.s.n.s. fue de $1160.07 \text{ kW m}^{-2}$ cada año.

Como ejemplo esto equivale a tener una potencia de 264.66 W m^{-2} a 54 m.s.n.s. Esto fue obtenido considerando un 50% de F_d o dicho de otro modo para la mitad del tiempo de las 8766 h de un año con la dinámica de viento encontrada a dicha altura.

Se obtuvo una P_{disp} eólica de 264.66 W m^{-2} , con un $F_d = 50\%$ a 54 m.s.n.s. Por lo que si $\eta_{turb} = 0.397$, $\eta_{mec} = 0.96$ y una $\eta_{elect} = 0.94$ se puede obtener una P_{elect} para inyectar sobre la red eléctrica de $\approx 95 \text{ W m}^{-2}$ resultando un valor de $C_p = \eta_{turb} \cdot \eta_{mec} \cdot \eta_{elect} = (0.397)(0.96)(0.94) = 0.358$.

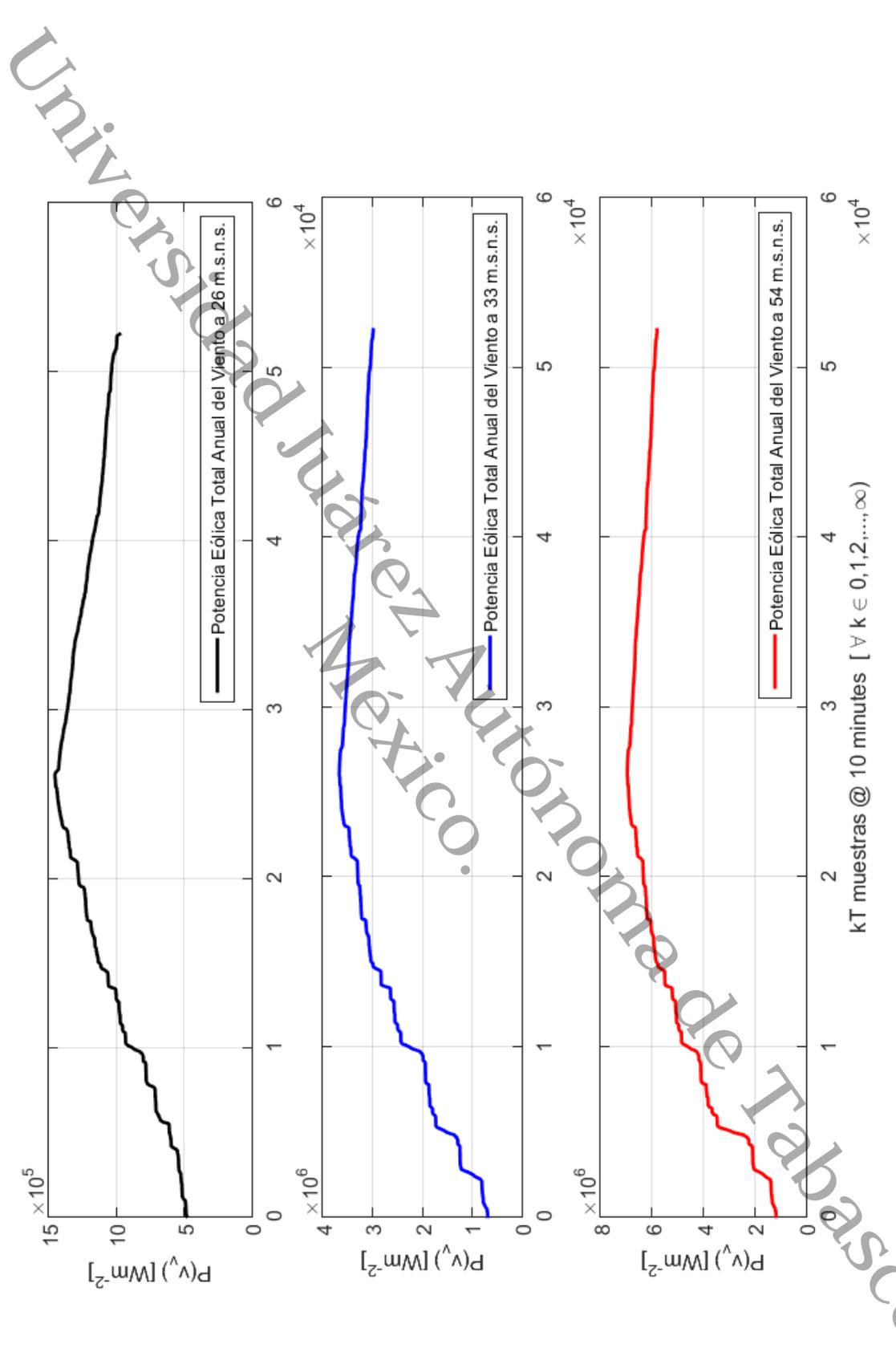


FIGURA 5.15: Comparativo del comportamiento de la potencia total disponible de Cuauhtemoczin I y II usando un V27

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

6. Conclusiones y recomendaciones.

Se presentan aquí las conclusiones de los principales resultados obtenidos durante la investigación que abarca desde su instrumentación, el desarrollo de las metodologías hasta el desarrollo e implementación de nuevas propuestas de modelos multimodales. Esto incluye la contrastación de los ajustes logrados en comparación a los modelos tradicionales. Se emiten algunas recomendaciones para trabajos futuros que pudieran continuar con lo iniciado aquí. Por otra parte independiente de los resultados de ajuste obtenidos con cada uno de los modelos empleados. Es importante hacer notar que el desarrollo del nuevo modelo Lopman-Multimodal denominado Poly-PI-N, el cual es comparable a Fourier como se demostró en las Capítulos anteriores. Este nuevo recurso para modelación matemática de variables meteorológicas y eólicas, resulta en la implementación de una nueva herramienta. Después de probarlo en cada uno de los sitios para modelar las distintas variables meteorológicas esta mostró que converge y ajusta con una convenientemente fiabilidad.

6.1 Conclusiones

En este trabajo se cumplió con el objetivo general y objetivos específicos planteados al inicio del proyecto y descritos en el Apdo 1.5 del Cap. 1, dado que:

1. Se logró la estimación y modelación del potencial de RE en la zona costera de Tabasco. Se obtuvo una P_{disp} eólica de 264.66 W m^{-2} , con un $F_d = 50\%$ a 54 m.s.n.s. y una P_{elect} para inyectar sobre la red eléctrica de $\approx 95 \text{ W m}^{-2}$

considerando un valor de $Cp = \eta_{turb} \cdot \eta_{mec} \cdot \eta_{elect} = (0.397)(0.96)(0.94) = 0.358$.

2. Con la instalación de dos estaciones meteorológicas en una zona costera de Tabasco (Cuauhtemoczin I y II) se logró recuperar mediciones que permitieron ensayar modelación y evaluación de RE para ambos sitios.
3. Se logró verificar que:
 - Hay una correlación entre estos dos SE que están separados ≈ 4 km.
 - Las variaciones de ρ_{air} y HR tienen un impacto de $\approx 10\%$ sobre la P_{disp} .
 - Los valores de la \bar{r}_v , $P(v_v)$ y PEA están correlacionados por la ley de potencias.
 - Se encontró y verificó que las distribuciones de frecuencia y funciones de densidad de probabilidad en las mediciones eólicas exhiben multimodalidad.
4. Se comprobó que la multimodalidad de la frecuencia y la densidad de la probabilidad de los registros medidos condiciona el ajuste del modelo de Weibull, Rayleigh y otros.
5. Hubo aportación en el desarrollo de nuevos modelos que exhiben mejores ajustes que los utilizados comunmente, identificando sus ventajas sobre los modelos tradicionalmente empleados que mejoran el ajuste a las dinámicas eólicas costeras.
6. Los modelos PDF-Weibull-2 Tetra-modal de 9 y 12 parámetros y el modelo PolyPI-N, fueron desarrollados para esta investigación y utilizados en:
 - Comprobar que los modelos Weibull-2 Tetra-Modal ajustan mejor que los modelos Weibull-2 estándar y Weibull-2 bimodal.
 - La modelación de los valores medidos en gráficos de dispersión, distribuciones de frecuencias, densidad de probabilidades entre otros.
 - Verificar que el PolyPI-N puede ajustar en diversas configuraciones ya que es un modelo inspirado en eigenvalores y eigenvectores con solución numérica computacional con características polimorfas, multimodal y grado de multiplicidad.

7. La ventaja de los modelos PolyPI-N sobre los modelos tradicionales incluyendo la tetra-modal y otros que son capaces de ajustar tanto para distribuciones de frecuencia, funciones de densidad de probabilidades, medias sobre gráficos de dispersión y otras distribuciones de registros en 3D. El valor de la PEA obtenido mediante modelación fue similar a los obtenidos directamente de los registros como se mostró en las Tablas. 4.11 y 4.12 en los cuales $C_p = 0.35$, y ahí no se consideró un $F_d = 50\%$.
8. El modelo PolyPI-N-Lopman desarrollado en esta investigación exhibió un desempeño comparable a varios de los modelos de ajuste como funciones de Fourier, funciones Gaussianas, Weibull-2, etc. PolyPI-N-Lopman mostró que es polimorfo y adaptable para ajustarse a bases de registros tanto a distribuciones de frecuencia, gráficos de dispersión y funciones de densidad de probabilidad de pequeños, medianos y grandes conjuntos de registros. Los resultados obtenidos con PolyPI-N-Lopman pueden resultar mejor en algunos casos hasta en donde Fourier, Gauss, Weibull u otros no ajustan. Hay que tomar en cuenta que PolyPI-N-Lopman podría no ajustar completamente en algunos casos en la que los otros modelos lo hacen bien. Entre otras ventajas PolyPI-N-Lopman mostró ser muy flexible cuando probó que puede ajustarse a dos variables en una distribución tridimensional como se demostró en el Cap. 4, ver Figs. 4.28 y 4.29.
9. Finalmente, después del análisis representa un comparativo de la evolución temporal de la potencia por unidad de área para un año para cada una de las alturas medidas 26 m.s.n.s., 33 m.s.n.s. y 54 m.s.n.s. hay disponibilidad como mínimo de 95 W m^{-2} de área de rotor para alguna TE que se seleccione, ver Fig. 5.15.
10. Se probó una ventaja de los modelos multimodales desarrollados y probados sobre los tradicionalmente empleados. Al mismo tiempo estos nuevos modelos permitieron una primera aproximación en la evaluación de recursos eólicos que mejoran el ajuste especialmente a las dinámicas eólicas costeras.

Dado que la *ERESE* es el objetivo principal cuando se desea iniciar un proyecto eólico este trabajo le abona en la clarificación de las metodologías. Las consideraciones previas descritas en los Caps. 1, 2 y 3 son fundamentales desde el inicio de una *ERESE*. La aplicación de las ecuaciones presentadas en los capítulos mencionados permiten obtener cada uno de los resultados para completar el reporte final de una *ERESE* y es conveniente continuar trabajando en el tema ya que la *EE* puede tener diversos fines y aplicaciones.

6.2 Recomendaciones para trabajos futuros.

Las metodologías, modelos desarrollados y empleados aquí se recomiendan para utilizarlos en alguna *ERESE* o para la modelación de variables físicas en general que presenten dinámicas con alto contenido estocástico.

Aunque los resultados obtenidos en este trabajo son numerosos hay muchos trabajos pendientes por realizar tanto para la modelación de las variables eólicas como para la modelación de las condiciones aerodinámicas de *SEs* ya sean costeros o sitios con orografía compleja para cualquier *ERESE*, estos pueden denominarse:

1. Desarrollo de algoritmos de validación de ajuste de modelación de distribuciones de frecuencia y funciones de densidad de probabilidades.
2. Modelación y evaluación de *RE* de sitios conectados a Cuauhtemocztzin sobre la costa de Tabasco en la dirección de los límites con Campeche.
3. Modelación del *RE* mar adentro entre 10 km y 15 km.
4. Hacer Modelaciones a alturas mayores a los 120 m.s.n.s.
5. Implementar, desarrollar y validar mediciones con equipamiento más moderno como el LIDAR y SODAR.
6. Realizar estudios sobre la probabilidad de daños prematuros en la maquinaria eólica por vientos extremos.
7. Establecer metodologías con los contenidos adecuados para elaborar el reporte final de una *ERESE* de acuerdo a IEC en cuanto se publique.

Referencias Bibliográficas

- [1] J. N. Bahcall, *Physical Review C* **2002**, 65, 1–5.
- [2] M. Wild, A. Ohmura, C. Schär, G. Müller, D. Folini, M. Schwarz, M. Z. Hakuba, A. Sanchez-Lorenzo, *Earth System Science Data* **2017**, 9, 601–613.
- [3] M. M. S. y Andrew S. Kowalski, Parámetros de rugosidad representativos de terrenos naturales. Tesis presentada para cumplir con los requisitos finales para la obtención del título de Máster en Geofísica y Meteorología, tech. rep., **2011**, pp. 1–39.
- [4] M. Coriolis, *Journal de l'École polytechnique* **1831**, XV, 142–154.
- [5] G.-G. de Coriolis, *Journal de l'École polytechnique* **1832**, XIII, 268–302.
- [6] S. Strahler, Coriolis Strength and Latitude, **1999**, <https://www.lateinamerika-studien.at>.
- [7] E. C. Fonseca, D. Brenes, W. López, O. Madrigal, B. Matarrita, Manual de Procedimientos para las Estaciones Meteorológicas: Organización para Estudios Tropicales, tech. rep. 1, Departamento Científico de la Selva y Manejo de Información, Sarapiquí, Costa Rica, **2008**.
- [8] B. A. G. Juan C. Suárez, C. P. Quine, *Meteorological Application* **1999**, 6, 329–342.
- [9] L. L. E. L. Petersen, N. G. Mortensen, J. H. a. H. P. Frank, *WIND ENERGY* **1998**, 1, 2–22.
- [10] SEMARNAT, NOM-151-SEMARNAT-2006, Diario de la Federación-EUM, tech. rep. 1, SEMARNAT, Boulevard Adolfo Ruíz Cortines No. 4209 Col. Jardines en la Montaña Deleg. Tlalpan C.P. 14210 México D.F., **2006**, pp. 1–13.
- [11] LAERFTE, Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética-Mex, tech. rep. 1, pp. 1-12, 01 12 2012, Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión-EUM, Palacio Legislativo de San Lázaro, Av. Congreso de la Unión 66 Col. El Parque México D.F. C.P. 15960, **2012**.
- [12] C. S. Association et al., CSA Guide to Canadian wind turbine codes and standards, tech. rep., CSA, **2008**, p. 28.
- [13] H. F. Mattio, F. Tilca, *Instituto Nacional Tecnología Argentina. Retrieved from* **2009**.

- [14] MEASNET, Measurement Procedure for Cup Anemometer Calibration, tech. rep. 1, MEASNET, Group draft, Leuven Belgium, **1998**.
- [15] J.-Å. Dahlberg, T. Friis Pedersen, P. Busche, ACCUWIND-methods for classification of cup anemometers, tech. rep., ACCUWIND, **2006**.
- [16] M. A. Baseer, J. P. Meyer, S. Rehman, M. M. Alam, L. Al-Hadhrani, A Lashin, *Renewable Energy* **2016**, *86*, 733–744.
- [17] MEASNET, MEASNET procedure: Evaluation of Site-Specific Wind Conditions. Version 2, tech. rep. 1, MEASNET, **2016**.
- [18] J. S. Rodrigo, *WAUDIT CENER* **2010**.
- [19] I. WIND, 13. Wind Energy projects in Cold Climates, Expert Group Study on Recommended Practices, tech. rep. Second Edition, Submitted to the Executive Committee of the International Energy Agency Programme for Research, Development and Deployment on Wind Energy Conversion Systems, IEA Wind TCP, Ville Lehtomäki, **2017**.
- [20] I. W. TCP, 4 task 19 Wind Energy in Cold Climates, tech. rep., IEA Wind TCP, **2015**.
- [21] S. V. José A. Carta, P. Cabrera, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2013**, 362–400.
- [22] A. S. Aidan Coville, K.-O. Vogstad, *Energy* **2011**, 4505–4517.
- [23] E. B. e. a. Sónia Liléo, Long-term correction of wind measurements. State-of-the-art, guidelines and future work, tech. rep. 13:18, **2013**, pp. 1–80.
- [24] I. E. Commission, International Standards and Conformity Assessment for all electrical, electronic and related technologies: wind energy generation systems, **2019**, https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:7:0::::FSP_ORG_ID:1282.
- [25] H. Cheng, Y. Hou, F. Wu, *International journal of energy* **2011**, *5*, 17–26.
- [26] R Ramakumar, A. Naeter in Power and Energy Society General Meeting, IEEE, Stillwater, Oklahoma USA 74078-5034, **2011**, pp. 1–4.
- [27] R. Deshmukh, R Ramakumar, *Solar Energy* **1982**, *28*, O038-092X/g2/O40Ms-08503.0010, 345–352.
- [28] R. Billinton, D. Huang, *IEEE Transactions on Power Systems* **2011**, *26*, 2509–2517.
- [29] N. B. Negra, O. Holmstrøm, B. Bak-Jensen, P. Sørensen, *IEEE Transactions on energy conversion* **2007**, *22*, 159–166.
- [30] S. J. Watson, P. Kritharas, G. Hodgson, *Wind Energy* **2015**, *18*, 21–42.
- [31] M. C. Brower, M. Barton, L Lledó, J Dubois, *AWS Truepower* **2013**, 1–11.
- [32] A. truepower, WINDNAVIGATOR Method and Validation, tech. rep. 1, AWS truepower LLC, Albany, N.Y. 12205, **2010**.

- [33] S. Saha, S. Moorthi, X. Wu, J. Wang, S. Nadiga, P. Tripp, D. Behringer, Y.-T. Hou, H. ya Chuang, M. Iredell, M. Ek, J. Meng, R. Yang, M. P. Mendez, H. van den Dool, Q. Zhang, W. Wang, M. Chen, E. Becker, *Journal of Climate* **2014**, *27*, 2185–2208.
- [34] C. C. Soares, G. O. Chagas, R. A. Guedes in European Wind Energy Conference (EWEC), Brussels, Belgium, **2011**, pp. 1–9.
- [35] M. M. Rienecker, M. J. Suarez, R. Gelaro, R. Todling, J. Bacmeister, E. Liu, M. G. Bosilovich, S. D. Schubert, L. Takacs, G.-K. Kim, et al., *Journal of climate* **2011**, *24*, 3624–3648.
- [36] D. Dee, S. Uppala, A. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, et al., *Quarterly Journal of the royal meteorological society* **2011**, *137*, 553–597.
- [37] G. D. Chiara, *Proceedings. Seminar on Use of Satellite Observations in Numerical Weather Prediction* **2014**, 1–12.
- [38] N Lakshmanan, S Gomathinayagam, P Harikrishna, A Abraham, S. C. Ganapathi, *Current Science* **2009**, *96*, 911–922.
- [39] A. M. Razali, M. S. Sapuan, K. Ibrahim, A. Zaharim, K. Sopian in Proceedings of the 9th WSEAS international conference on System science and simulation in engineering, World Scientific, Engineering Academy, and Society (WSEAS), **2010**, pp. 397–403.
- [40] A. Sarkar, S. Singh, D. Mitra, *International Journal of Engineering Science and Technology* **2011**, *3*.
- [41] G. I. El-Shanshoury, A. Ramadan, *Arab Journal of Nuclear Science and Applications* **2012**, *45*, 265–274.
- [42] X. G. Larsén, J. Mann, O. Rathmann, H. E. Jørgensen, *Wind Energy* **2015**, *18*, 59–74.
- [43] IEC-TC88, Wind energy generation systems, tech. rep., IEC, Geneva, Switzerland and Denmark, **2016**.
- [44] L. Landberg, L. Myllerup, O. Rathmann, E. L. Petersen, B. H. Jørgensen, J. Badger, N. G. Mortensen, *Wind Energy* **2003**, *6*, 261–271.
- [45] M Jarraud, *Guide to meteorological instruments and methods of observation (WMO-No. 8)*, ISBN 978-92-63-10008-5, World Meteorological Organisation: Geneva, Switzerland, geneva 2, Switzerland, **2008**.
- [46] N. G. Mortensen, *Wind resource assessment using the WAsP software (DTU Wind Energy E-0135)*, Technical University of Denmark, (DTU Wind Energy), **2016**.
- [47] J. L. Walmsley, I. Troen, D. P. Lalas, P. J. Mason, *Boundary-Layer Meteorology* **1990**, *52*, 259–281.
- [48] W Weng, P. Taylor, *Advances in Science and Research* **2011**, *6*, 75.

- [49] R. Farrugia, T Sant, P Mifsud, G Sant, *9th International Conference on Heat Transfer Fluid Mechanics and Thermodynamics* **2012**.
- [50] W. L. Godson, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **1950**, 76, 3–15.
- [51] ESMAP2010, Best Practice Guidelines for Mesoscale Wind Mapping Projects for the World Bank, tech. rep. 1, ESMAP, Group draft, Washington DC 20433 USA, **2010**.
- [52] I. Troen, E. L. Petersen, *Roskilde: Riso National Laboratory* 1989 **1989**.
- [53] A. R. Mehrens, A. N. Hahmann, X. G. Larsén, L. von Bremen, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **2016**, 142, 3186–3194.
- [54] W. Hallgren, U. B. Gunturu, A. Schlosser, *PloS one* **2014**, 9, 9.
- [55] C. D. Claire L. Vincent, J. R. Nielsen, Mesoscale meteorological models, tech. rep. 1, DTU National Laboratory for Sustainable Energy, Frederiksborgvej 399, 4000 Roskilde, Denmark, **2010**.
- [56] J Badger, N. Mortensen, J. Hansen, *Proceedings GWREF (cd-rom)* **2006**.
- [57] H. P. Frank, O. Rathmann, N. G. Mortensen, L. Landberg, *In Conference proceedings (on CD-ROM); Risø-R-1252 (EN)* **2001**, 60.
- [58] NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999, Boulder CO, **2000**.
- [59] K. Clayton, *The Geographical Journal* **1971**, 137, 1–13.
- [60] Pilot Chart Summary Data, Boulder CO, **1984**.
- [61] M. R. Dr. Rupp Carriveau, A. M. Ragheb in, InTech, 51000 Rijeka, Croatia, **2011**, Chapter Wind Turbines Theory - The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio, pp. 19–38/422.
- [62] ABB, Technical Application Papers No.13 - Wind power plants, tech. rep., **2018**, pp. 1–123.
- [63] S. M. E. Khaled S. M. Essa, M. Embaby, A Notional Variation of the Wind Profile Power-Law Exponent as a function of Surface Roughness and Stability. Tech. rep. EG0600166, 4th Conference on Nuclear and Particle Physics., **2003**, pp. 410–419.
- [64] A. A. Sekai Sen, T. Erdik, *Advances in Meteorology* **2012**, 2012, 6.
- [65] C. G. Justus, A. Mikhail, *Geophysical Research Letters* **1976**, 3, 261–264.
- [66] N. Systems, NRG CLASS 1 ANEMOMETER, **2019**, <https://www.nrgsystems.com/products/met-sensors/anemometers/detail/class-1-anemometer>.
- [67] N. Systems, NRG 200P WIND VANE, **2019**, <https://www.nrgsystems.com/products/met-sensors/wind-direction-vanes/detail/200p-wind-vane>.
- [68] O. Jaramillo, M. Borja, *Journal of Renewable Energy* **2004**, 1613–1630.

- [69] O. Jaramillo, M. Borja, *Journal of WIND ENGINEERING* **2004**, 2, 225–234.
- [70] H. Y. Bo HU, Yudun LI, H. WANG, *Journal Modern Power System Clean Energy* **2016**, 2, 220–227.
- [71] L. O. B. S. y María Elena Guardado González, ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DEL AIRE, tech. rep., **2003**, pp. 1–23.
- [72] L. Van Der Auwera, F. De Meyer, L. M. Malet, *Journal of Applied Meteorology* **1980**, 19, 819–825.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Apéndice A

Preguntas Frecuentes, detalles y demostraciones

A.1 La Fuerza de Coriolis Atmosférica

La fuerza de Coriolis por unidad de masa¹ que actúa sobre una parcela de aire viene dada por la expresión

$$f_c = 2\Omega v_v \sin \phi \quad (\text{A.1})$$

Donde:

Ω : velocidad angular de rotación de la Tierra = $\frac{360^\circ}{(23 \text{ hr } 56 \text{ m})} = \frac{2\pi \text{ rad}}{86160 \text{ s}} = 0.0000729 \text{ rads}^{-1}$,

v_v : la velocidad horizontal del paquete en $[\text{ms}^{-1}]$,

ϕ : la latitud de la parcela.

La dirección de la fuerza de Coriolis siempre hace un ángulo recto con la dirección de la velocidad de la parcela y se dirige a la derecha (izquierda) de la velocidad en el hemisferio norte (sur).

Ejemplo: una parcela de aire se mueve de oeste a este a una velocidad de $v_v = 100 \text{ mph} (= 44.7 \text{ ms}^{-1})$, directamente sobre Provo ($\phi = 40.25^\circ$, $\sin \phi = 0.646$). La fuerza de Coriolis por unidad de masa, dirigida hacia el sur, es:

$$f_c = 2\Omega v_v \sin \phi = 2(0.0000729 \text{ s}^{-1})(0.646) = 0.00421 \text{ N/kg}.$$

Tener en cuenta que la fuerza de Coriolis es cero en el ecuador ($\phi = 0^\circ$, $\sin \phi = 0$), y máxima en los polos ($\phi = \pm 90^\circ$, $\sin \phi = \pm 1$).

¹<https://www.physics.byu.edu/faculty/christensen/physics>

A.2 Desarrollo de la ley extendida de potencias

Ecuación de la ley de potencias extendida

$$\frac{v_{v(z)}}{v_{v_0}} = \left[\frac{z}{z_0} \right]^\alpha \quad (\text{A.2})$$

Donde

$v_{v(z)}$: velocidad del viento a la altura z deseada, v_{v_0} : velocidad del viento de referencia o cota cero, z : altura de deseada, z_{v_0} : altura de referencia o cota cero.

$$\left[\frac{z_0}{z} \right]^\alpha = \frac{v_{v_0}}{v_{v(z)}} \quad (\text{A.3})$$

Asumiendo perturbaciones en los promedios de la v_v

$$\left[\frac{z_0}{z} \right]^\alpha = \frac{\overline{v_{v_0}} + \widehat{v_{v_0}}}{\overline{v_{v(z)}} + \widehat{v_{v(z)}}} \quad (\text{A.4})$$

Donde

$\widehat{v_{v(z)}}$ y $\widehat{v_{v_0}}$: términos de perturbación con promedios iguales cero, $\overline{\widehat{v_{v(z)}}} = \overline{\widehat{v_{v_0}}} = 0$

$$\left[\frac{z_0}{z} \right]^\alpha = \frac{\overline{v_{v_0}}}{\overline{v_{v(z)}}} \left(1 + \frac{\widehat{v_{v_0}}}{\overline{v_{v_0}}} \right) \left(1 + \frac{\widehat{v_{v(z)}}}{\overline{v_{v(z)}}} \right)^{-1} \quad (\text{A.5})$$

$$\left[\frac{z_0}{z} \right]^\alpha = \frac{\overline{v_{v_0}}}{\overline{v_{v(z)}}} \left(1 + \frac{\widehat{v_{v_0}}}{\overline{v_{v_0}}} \right) \left[1 - \left(\frac{\widehat{v_{v(z)}}}{\overline{v_{v(z)}}} \right) + \left(\frac{\widehat{v_{v(z)}}}{\overline{v_{v(z)}}} \right)^2 - \left(\frac{\widehat{v_{v(z)}}}{\overline{v_{v(z)}}} \right)^3 + \left(\frac{\widehat{v_{v(z)}}}{\overline{v_{v(z)}}} \right)^4 - \dots \right] \quad (\text{A.6})$$

Asumiendo que los terminos con exponente impares de los promedios son iguales a cero se obtiene:

$$\left[\frac{z_0}{z} \right]^\alpha = \left(\frac{\overline{v_{v_0}}}{\overline{v_{v(z)}}} \right) \left[1 - \frac{\widehat{v_{v_0}} \widehat{v_{v(z)}}}{\overline{v_{v_0}} \overline{v_{v(z)}}} + \left(\frac{\widehat{v_{v(z)}}}{\overline{v_{v(z)}}} \right)^2 \right] \quad (\text{A.7})$$

Por definición $\widehat{v}_{v_0} = 0\widehat{v}_{v(z)} = 0$ En realidad para los términos de perturbaciones simétricas (Ej. con distribución Gaussiana). Los factores con exponente impar de las medias aritméticas tales como $\overline{\widehat{v}_{v_0} \widehat{v}_{v(z)}} \cong 0$

$$\left(\frac{z_{v_0}}{z}\right)^\alpha = \left(\frac{\overline{v_{v_0}}}{\overline{v_{v(z)}}}\right) \left[1 - \frac{S_{v_0} S_{v_{v(z)}}}{\overline{v_0} \overline{v_{v(z)}}} r_{v_{v_0} v_{v(z)}} + \frac{S_{v_0}^2}{\overline{v_{v_0}}^2}\right] \quad (\text{A.8})$$

Donde

$S_{v_0}, S_{v_{v(z)}}$: desviaciones estándar de las velocidades, $r_{v_{v_0} v_{v(z)}}$: coeficiente de correlación cruzada entre v_{v_0} y $v_{v(z)}$. Por definición la relación de la desviación estándar a la media aritmética se define aquí como los coeficientes de variación: $C_{v_{v_0}}$ y $C_{v_{v(z)}}$.

$$\left(\frac{z_{v_0}}{z}\right)^\alpha = \left(\frac{\overline{v_{v_0}}}{\overline{v_{v(z)}}}\right) \left[1 - C_{v_{v_0}} C_{v_{v(z)}} r_{v_{v_0} v_{v(z)}} + C_{v_{v_0}}^2\right] \quad (\text{A.9})$$

A.2.1 Ecuaciones de conservación

Conservation of energy

$$\begin{aligned} E_{kin} &= E'_{kin} \\ m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2 &= m_1 v_1'^2 + m_2 v_2'^2 \\ m_1 (v_1^2 - v_1'^2) &= m_2 (v_2'^2 - v_2^2) \\ m_1 (v_1 + v_1')(v_1 - v_1') &= m_2 (v_2' + v_2)(v_2' - v_2) \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

Conservation of momentum

$$\begin{aligned} p &= p' \\ m_1 v_1 + m_2 v_2 &= m_1 v_1' + m_2 v_2' \\ m_1 (v_1 - v_1') &= m_2 (v_2' - v_2) \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

A.3 Tablas de Equivalencias

Aquí se muestran las principales equivalencias de la energía desde el punto de vista termico.

TABLA A.1: Equivalencias de Unidades de Energía

Cant	Unidad	Equivalencia
1	caloria (termoquímica)	= 4.184 J
1	caloria (15° C)	= 4.1858 J
1	caloria (IT)	= 4.1868 J
1	caloria (media)	= 4.1900 J
1	Btu	= 251.9958 calories
1	Btu (termoquímica)	= 1054.35 J
1	Btu (59° F)	= 1054.80 J
1	Btu (IT)	= 1055.06 J
1	Btu (media)	= 1055.87 J
1	kilowatt-hora (kWh)	= 3.6 x 10 ⁶ J
1	kilowatt-hora (kWh)	= 3412 Btu (IT)
1	therm	= 100,000 Btu
1	electron-volt	= 1.6022 x 10 ⁻¹⁹ J

TABLA A.2: Unidades de Energía de Gran Escala

Cant	Unidad	Equivalencia
1	quad	= 10 ⁹ MBtu = 10 ¹⁵ Btu
1	ExaJoule (EJ)	= 10 ¹⁸ J
1	TeraWatt-año (TWaño)	= 8.76 x 10 ¹² kWh

nota: para localizar esta información en la WEB ² copie y pegue el link de la nota al pie.

A.3.1 modelos

$$f(v_v, k, c) = \begin{cases} \frac{k}{c} \left(\frac{v_v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v_v}{c}\right)^k} & v_v \geq 0 \quad \forall v_v \in [0, \infty) \\ 0 & v_v < 0 \end{cases} \quad (\text{A.12})$$

Donde:

v_v : velocidad del viento del SE; c : parámetro Weibull de escala; k : parámetro Weibull de forma.

²<https://www.aps.org/policy/reports/popa-reports/energy/units.cfm>

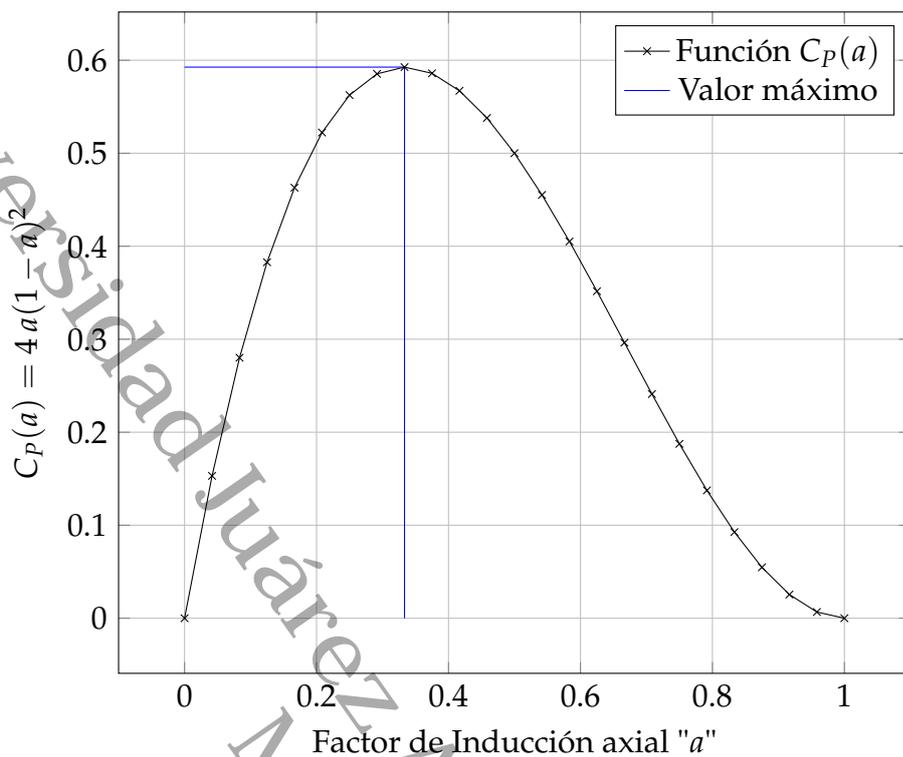


FIGURA A.1: Coeficiente de Potencia

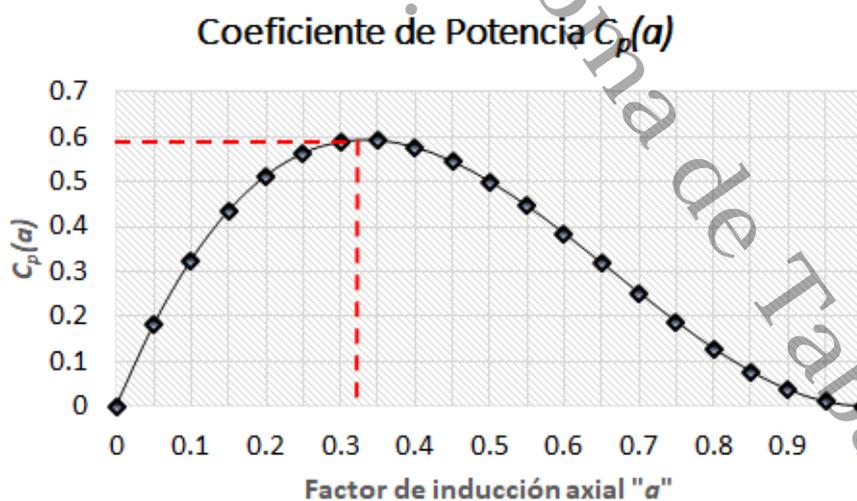


FIGURA A.2: Coeficiente de Potencia $C_p(a)$ empleado en la conversión de energía cinética eólica a energía mecánica en una TE

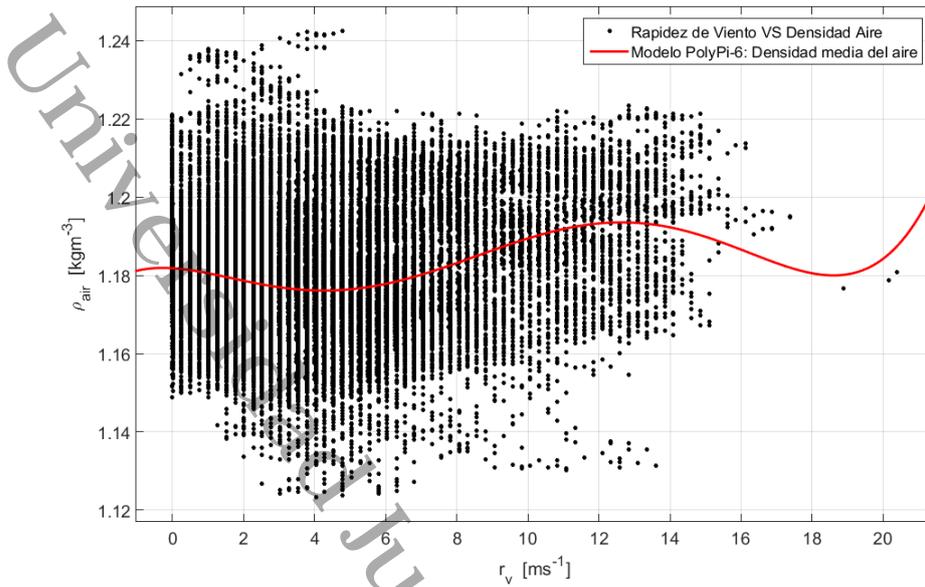


FIGURA A.3: Variación de la ρ_{air} en función de la r_v para Cuauhtemotzin

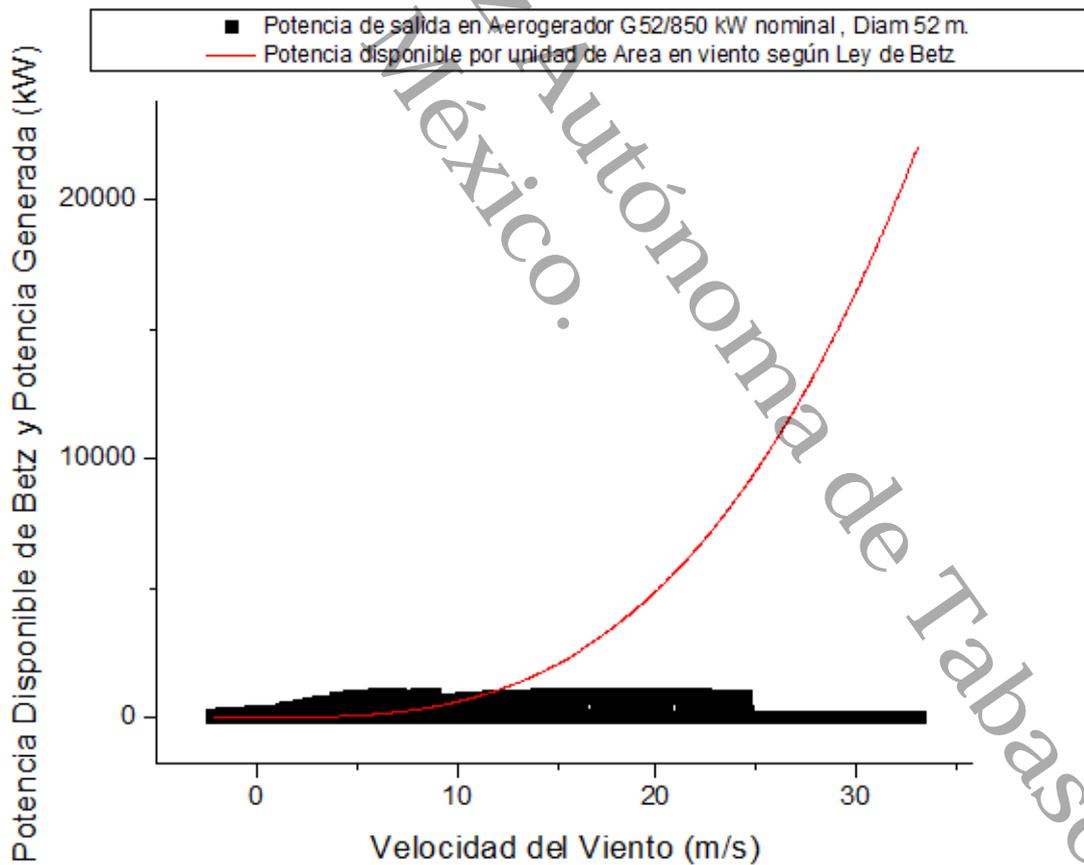


FIGURA A.4: Comparativo de la P_{disp} de la energía eólica en función de la r_v para La Venta, Oaxaca con un aerogenerador G52/850 kW

Apéndice B

Actividades Académicas Complementarias

1. Certificado de capacitación para redacción de artículos científicos en Inglés, ver Figura B.1.
2. Programa del 2do. CRAE donde aparece artículo de la ponencia en Congreso Regional, ver Figura B.2.
3. Portada de artículo publicado en memorias de Congreso, ver Figura B.3.
4. Carta de aceptación de estancia de investigación en UADY, ver Figura B.4.
5. Constancia de presentación de ponencia en Congreso CRAE de la UADY, ver Figura B.5.
6. Constancia de participación con un cartel en Congreso CRAE de la UADY, ver Figura B.6.
7. Constancia de participación en Curso-Taller "Estrategias de ingreso, permanencia y promoción en el Sistema Nacional de Investigadores (redacción de Artículos Científicos y Proyectos de Investigación), ver Figura B.7.
8. Constancia de participación en Curso-Taller "Estrategias de ingreso, permanencia y promoción en el Sistema Nacional de Investigadores (Trabajo en Redes, Desarrollo Tecnológico, Transparencia de Tecnología y Propiedad Intelectual e Industrial), ver Figura B.8.
9. Carta de conclusión de Estancia Académica en la UADY, Figura B.9.
10. Portada de artículo publicado en Energies-MDPI denominado: Assessment of Resource and Forecast Modeling of Wind Speed through

an Evolutionary Programming Approach for the North of Tehuantepec Isthmus (Cuauhtemoczin, Mexico), ver Figura B.10.

11. Portada de artículo publicado en *Energy and Environment* denominado: *Review on Methodological and Normative Advances in Assessment, Estimation, and Forecasting of Wind Energy*, ver Figura B.11.
12. Acuse de recibo de la revista *Energy and Environment*, ver Figura B.12.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.



Mérida, Yucatán, España, 02 de febrero de 2018

Asunto: CARTA DE ACEPTACIÓN para Estancia de Investigación

Luis Manuel López Manrique
Estudiante del Doctorado en Ciencias en Ingeniería
Presente

Por este medio me es grato comunicarle que ha sido **ACEPTADO** para realizar una estancia académica durante los días del **08 al 23 de marzo** del presente año, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY), México.

Durante el periodo de la estancia podrá adquirir conocimientos sobre la modelación con redes neuronales considerando los historiales de los datos experimentales que ha obtenido durante el desarrollo de su proyecto de tesis. Lo anterior, como una herramienta para procesar y analizar los conjuntos de datos obtenidos, lo cual, le permitirá evaluar la factibilidad del uso de esta herramienta en su proyecto de tesis.

ATENTAMENTE

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ali', written over a horizontal line.

Dr. Bassam Ali
Profesor –Investigador de la UADY

FIGURA B.1: Carta de aceptación de estancia II en la UADY

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.



FIGURA B.2: Carta de conclusión de estancia I en la UADY



FIGURA B.3: Certificado de capacitación para la redacción de artículos científicos en Inglés.

Hora	Actividad	Hora
8:00 - 9:00	Registro	8:00 - 9:00
9:00 - 9:30	Ceremonia de inauguracion	9:00 - 9:30
9:30 - 10:15	Aula Magna - Plenaria 1 Jesús Serrano Landeros "Integración de Generación Renovable al Sistema Eléctrico Nacional: Retos, Estrategias e Impacto"	9:30 - 10:15
BLOQUE 1 - Aula Magna		BLOQUE 2 - Audiovisual 1
10:20 - 10:40	ENERGIA EOLICA EN EL ITSMO DEL GOLFO. <i>Luis Manuel López Manrique, Edgar Vicente, Macías Melo, Karla M. Aguilar Castro, Ali Bassam, Carlos García Aguilar e Iván Hernández-Perez</i>	10:20 - 10:40
10:40 - 11:00	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA EÓLICO PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA EN LA ZONA DE HERMOSILLO. <i>Flor Ramirez Torres, Elie E. Montijo Valenzuela, Aureliano Cerón Franco</i>	10:40 - 11:00
		LA ESTACIÓN SOLARIMÉTRICA "SELEGUA" ESTACIÓN DE REFERENCIA TIPO BSRN EN MÉXICO. <i>Roberto Bonifaz-Alfonzo, Adriana González-Cabrera, Héctor Estévez-Pérez, Mauro Valdés-Barrón</i>
		APROVECHEMOS LA TRAYECTORIA RELATIVA DEL SOL, DISTRIBUCIÓN DE POSICIONES AZIMUTAL Y ZENIT. <i>Oswaldo Carvente Muñoz, Francisco R. Peñuñuri Anguiano</i>
(Explanada de La Facultad de Ingeniería de la UADY)		
11:00 - 11:30	Coffee Brake + Sección POSTER (A)	11:00 - 11:30

FIGURA B.4: Cartel para presentación en Congreso de Acuerdo al programa

REVISOR
19-7-122do Congreso Regional de Aprovechamiento de Energías Renovables en el Sureste de México 30 – 31
de octubre de 2018 Mérida, Yucatán, México.**Energía Eólica del Golfo al Istmo de México (ID 019)**Luis Manuel López-Manrique ⁽¹⁾, Edgar Vicente Macías Melo⁽¹⁾, Karla M. Aguilar
Castro ⁽¹⁾, Ali Bassam⁽³⁾, Carlos García Aguilar ⁽²⁾ e Iván Hernández-Pérez⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Programa Doctoral en Ciencias de la Ingeniería,
Cunduacán Tabasco, carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez km 1, Col. La Esmeralda C.P. 86690,
luis.lopez@ujat.mx; edgar.macias@ujat.mx

⁽²⁾ Comisión Federal de Electricidad, CELV-CFE, Oaxaca, La venta Oaxaca Carretera la Venta-Juchitán
km 1, carlo.garcia@yahoo.com.mx.

⁽³⁾ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Av. Industrias No Contaminantes, Apdo.
Postal 150, Mérida, Yucatán México; baali@correo.uady.mx

RESUMEN

En este trabajo se presenta una revisión de los cambios que ha experimentado el aprovechamiento de la energía eólica desde 1994 hasta la fecha en la zona del istmo de Tehuantepec en rubros tales como: la tasa de crecimiento en capacidad instalada, las participaciones de la industria local e internacional; la participación de la UJAT como universidad que ha desarrollado tecnología en la industria eólica; la variación tecnológica respecto a la madurez de los parques eólicos que se están desarrollando; las fortalezas de lo avanzado, las debilidades de lo que se tiene referente a la renta y tenencia de la tierra; los retos respecto a lograr las metas del plan eólico nacional; las participaciones de los diferentes actores que han propiciado el cambio; la tendencia tecnológica de la energía eólica en la zona golfo-istmo; un esbozo de hipótesis de la relación eólica entre la costa de Oaxaca y la costa del golfo (caso Tabasco) en materia energía eólica y una perspectiva sobre lo que se está haciendo en Tabasco en materia de prospección de la energía eólica.

INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de energía eólica en México para generar energía eléctrica, es relativamente reciente en comparación con la historia eólica de Estados Unidos y varios países europeos como Dinamarca, Alemania, España y entre otros. Actualmente, estos países son fabricantes mundialmente reconocidos y líderes en investigación, desarrollo y tecnología de aerogeneradores de gran tamaño para el aprovechamiento de la energía cinética del viento.

El primer Parque Eólico (PE) experimental con fines comerciales que se instaló en México data de octubre de 1994 en el poblado denominado "La Venta", (*Latitud: 16° 34' 49.9"*, *Longitud: -94° 49' 7.7"*, *Sistema geodésico: WGS84, 33 km de Juchitán Oaxaca*) en el estado de Oaxaca, financiado y operado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Este PE estuvo constituido por siete aerogeneradores marca

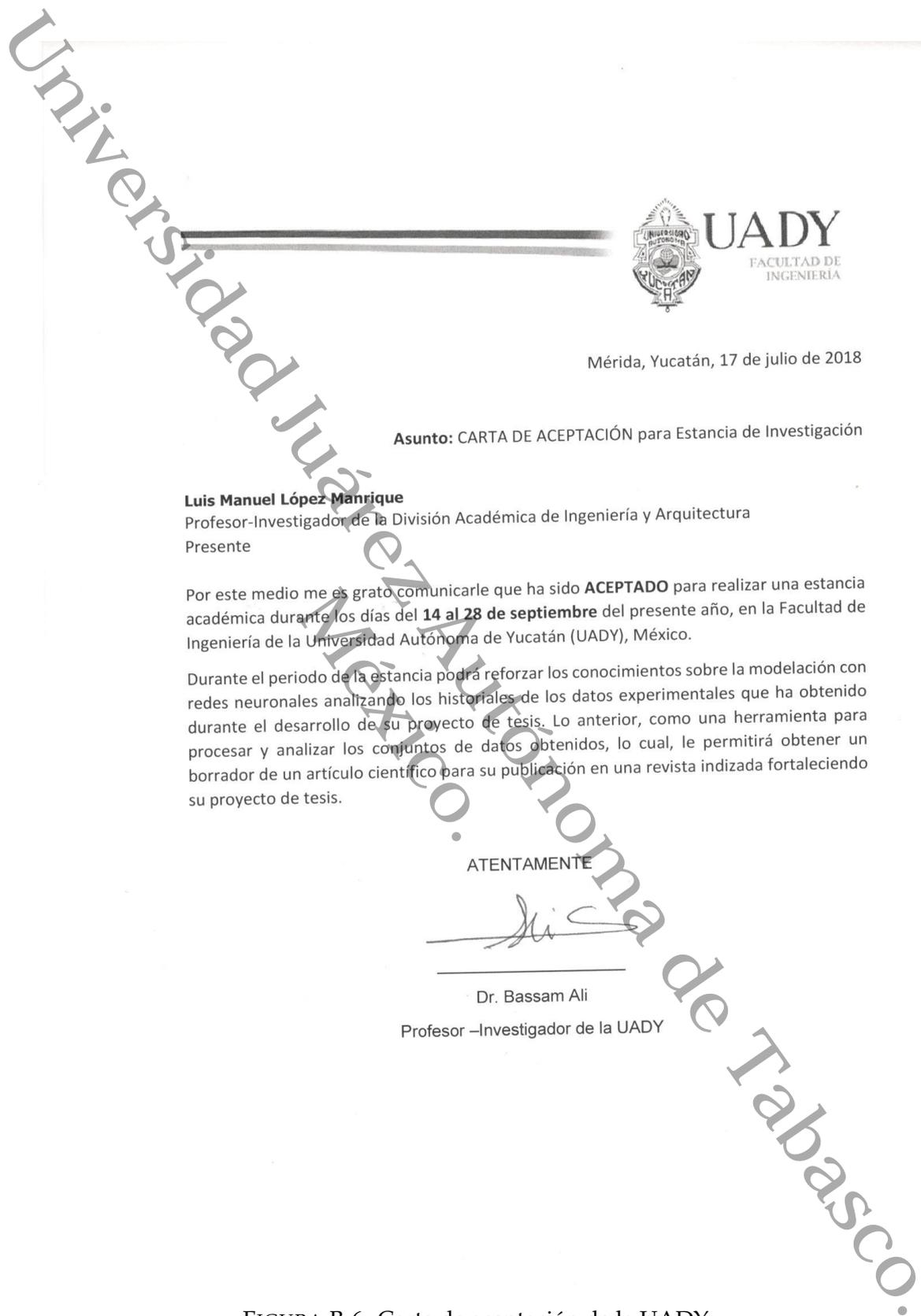


FIGURA B.6: Carta de aceptación de la UADY



FIGURA B.7: Constancia de presentación de Ponencia en Congreso CRAE de la UADY



El comité organizador otorga la presente:

CONSTANCIA

A H. Pastrana Alcocer, Luis López Manrique, O. May Tzuc, A. Bassam, Edgar Macias Melo, Karla M. Aguilar, I. Hernández-Pérez por su destacada participación en el Segundo Congreso Regional de Aprovechamiento de Energías a través del Poster denominado:

"INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y ANÁLISIS DE LA SENSIBILIDAD PARA EL MODELADO DEL RECURSO EÓLICO EN EL ISTMO-GOLFO DE MÉXICO"

Mérida, Yucatán, México Octubre 31 de 2018

Dr. Luis Enrique Fernández Baqueiro
Director de la Facultad de Ingeniería de la UADY

Dr. Bassam Ali
Presidente del Comité Organizador del CRAE 2018



FIGURA B.8: Constancia de participación con un cartel de la UADY



FIGURA B.9: Curso en Redacción de artículos científicos

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco



Otorga la presente:

CONSTANCIA

Al: M.C. Luis Manuel López Manrique

Por haber participado en el Curso-Taller **“Estrategias de ingreso, permanencia y promoción en el Sistema Nacional de Investigadores (Trabajo en Redes, Desarrollo Tecnológico, Transferencia de Tecnología y Propiedad Intelectual e Industrial)”**, del 23 al 26 de Octubre del presente año, con una duración de 80 horas.

M. en C. Raúl Guzmán León
Secretario de Investigación, Posgrado y Vinculación

Villahermosa, Tabasco, 26 de Octubre de 2018

Evento financiado con recursos PFCE 2018. "Los recursos del PFCE son de carácter público y queda prohibido su uso con fines partidistas o de promoción personal".

FIGURA B.10: Curso para transferencia de Tecnología



UADY
FACULTAD DE
INGENIERÍA
QUÍMICA

Mérida, Yucatán, 28 de
septiembre de 2018

Asunto: CARTA DE CONCLUSIÓN de Estancia Académica

M.C Luis Manuel López Manrique

Estudiante del Doctorado en Ciencias en Ingeniería
Presente

Por este medio se le extiende la presente CARTA DE CONCLUSIÓN de la Estancia Académica realizada durante los días del **14 al 28 de septiembre** del presente año, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY), México. El objetivo de la estancia fue colaborar en la modelación con redes neuronales analizando los historiales de los datos experimentales que se han obtenido dentro del proyecto de tesis de estimación y prospección de la energía eólica.

Como actividades principales:

1. Se trabajó en la identificación, aprendizaje y familiarización en el manejo de herramientas Programación Multi-genética (MGGP) y Análisis de sensibilidad en Matlab para la identificación de modelos de predicción.
2. Se revisó en conjunto un artículo que se inició en colaboración en el periodo anterior, se hicieron las modificaciones pertinentes para ajustarse al formato de una revista JCR y el título del artículo es: *Assessment of resource and forecast modeling of wind speed through an evolutionary programming approach for the north of Tehuantepec Isthmus (Guauhtemotzin, Mexico)*. Se analizaron y discutieron los resultados reportados del artículo trabajado para afinar la redacción del resumen, resultados y conclusión del mismo para subirlo a la plataforma de la revista.
3. Para continuar publicando en colaboración se estableció una propuesta de trabajos futuros para la redacción de otros artículos, quedando un tercer artículo acordado para una siguiente estancia.

Sin más por el momento me despido.

ATENTAMENTE

Dr. Bassam Ali
Profesor –Investigador de la UADY

c.c.p Archivo

FIGURA B.11: Carta de conclusión de estancia II en la UADY



Article

Assessment of Resource and Forecast Modeling of Wind Speed through An Evolutionary Programming Approach for the North of Tehuantepec Isthmus (Cauhtemotzin, Mexico)

Luis M. López-Manrique ^{1,2} , E. V. Macias-Melo ², O. May Tzuc ³ , A. Bassam ^{3,*},
K. M. Aguilar-Castro ² and I. Hernández-Pérez ²

¹ División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Doctorado en Ciencias de la Ingeniería (DCI), DAIA-UJAT, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carret. Cunduacán-Jalpa de Méndez Km. 1, Unidad Chontalpa, Cunduacán 86690, Mexico; lopman20044@hotmail.com

² División Académica de Ingeniería y Arquitectura, DAIA-UJAT, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carret. Cunduacán-Jalpa de Méndez Km. 1, Unidad Chontalpa, Cunduacán CP 86690, Mexico; edgar.macias@ujat.mx (E.V.M.-M.); karla.aguilar@ujat.mx (K.M.A.-C.); ivan.hernandezp@ujat.mx (I.H.-P.)

³ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Av. Industrias No Contaminantes, Apdo. Postal 150, Mérida 97310, Mexico; maytzuc@gmail.com

* Correspondence: baalj@correo.uady.mx; Tel.: +52-1-999-233-3534

Received: 14 October 2018; Accepted: 16 November 2018; Published: 18 November 2018

Abstract: This work studies the characteristics of the wind resource for a location in the north zone of Tehuantepec isthmus. The study was conducted using climatic data from Cauhtemotzin, Mexico, measured at different altitudes above the ground level. The measured data allowed establishing the profile of wind speeds as well as the analysis of its availability. Analysis results conclude that the behavior of the wind speed presents a bimodal distribution with dominant northeast wind direction (wind flow of sea-land). In addition, the area was identified as feasible for the use of low speed power wind turbines. On the other hand, the application of a new approach for very short-term wind speed forecast (10 min) applying multi-gene genetic programming and global sensitivity analysis is also presented. Using a computational methodology, an exogenous time series with fast computation time and good accuracy was developed for the forecast of the wind speed. The results presented in this work complement the panorama for the evaluation of the resource in an area recognized worldwide for its vast potential for wind power.

Keywords: wind energy; wind characteristics; artificial intelligence; multi-gene genetic programming; sensitivity analysis.

1. Introduction

In recent years, wind energy (WE) has presented an unceasing growth as a sustainable alternative for electric power production. According to Renewable Global Status Report 2017 [1], it represents the second greatest source of sustainable electric power generation only below hydropower. The total wind energy construction is estimated to grow by 21% in the next years [2] because of the advancement in the sophisticated procedures to fabricate and install wind turbines having a height greater than 170 m.g.s.l.

In that context, Mexico is one of the Latin-American countries with the highest prospects for growth in the WE sector [3]. The vast extension of its territory, its wide coastline, and the diversity of its orography provide conditions for a wide wind potential (Figure 1). Several studies have identified propitious conditions for the development of wind activity in various regions of the

Review on Methodological and Normative Advances in Assessment, Estimation, and Forecasting of Wind Energy

L.M. López-Manrique^a, E.V. Macias-Melo^{b,*}, K.M. Aguilar-Castro^b, I. Hernández-Pérez^b, H.P. Díaz-Hernández^b

^aDoctorado en Ciencias de la Ingeniería, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ingeniería y Arquitectura (DAIA-UJAT), Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez km. 1, Cunduacán, Tabasco, CP 86690, México

^bUniversidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ingeniería y Arquitectura (DAIA-UJAT), Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez km. 1, Cunduacán, Tabasco, CP 86690, México

Abstract

In this study we present a review of articles that address the state of the art in wind energy from different perspectives, specifically focusing on the criteria used for wind energy assessment and wind turbine standards, along with an overview of the technologies necessary to make reliable Wind Power-Grid penetration more efficient. Wind power dynamics are also considered from the perspective of their intermittency and the nature of wind speed variability in order to establish appropriate sampling times for measurements and monitoring. The literature discussed is representative of the technological and methodological advances dedicated to the development, adaptation and application of statistical, computational, numerical and artificial intelligence tools for an assessment of wind energy and wind power forecasting. These applications and methodologies commonly use data registers measured in very short, short, medium and long-term measurement campaigns. Finally, literature on wind power social, environmental and economic policies and trends in costs-capacity-addition and their impact are reviewed from a global perspective. In light of today's concerns with global warming, it is essential that wind energy interact steadily on the grid with experienced operators and high automatic-control technology worldwide.

Keywords: Measurement campaign, Methodologies, Wind power, Wind energy, Wind intermittency, Wind variability.

Contents

1 Introduction 2

*Corresponding author: edgar.macias@ujat.mx

Preprint submitted to Energy and Environment

November 24, 2018

FIGURA B.13: Artículo 2 para publicación en Energies Energy and Environment

24-Nov-2018

Dear Professor. López Manrique:

A manuscript titled Review on Methodological and Normative Advances in Assessment, Estimation, and Forecasting of Wind Energy (EAE-18-0670) has been submitted by Dr. Edgar Vicente Melo to Energy & Environment.

You are listed as a co-author for this manuscript. The online peer-review system, ScholarOne Manuscripts, automatically creates a user account for you and you may receive e-mails and communications from the journal editorial office staff regarding your manuscript based on the authorization you provided to the co-author who created the account.

Please take a moment to log into the site to confirm your profile information is accurate. Upon logging in, you will be able to update your contact information and set your account preferences. When setting your account preferences you may also choose to opt in or out of receiving announcements from SAGE and its affiliates. Please "opt in" if you would like to receive future updates and announcements from SAGE and its affiliates that may be of interest to you. You may refer to the SAGE Privacy Policy at <http://www.sagepub.com/privacyPolicy.nav> or contact SAGE via email at marketingservices@sagepub.com for more details.

Your USER ID and a link to set a permanent PASSWORD for your account are located below:

SITE URL: <https://mc.manuscriptcentral.com/eae>

USER ID: lopman20044@hotmail.com

LINK TO SET

PASSWORD: https://mc.manuscriptcentral.com/eae?URL_MASK=379839956bb342d99b6191f284e9976a

When you log in for the first time, you will be asked to complete any missing account information. You can use your account to log in to the site and check the status of papers you have authored/co-authored.

To create a new ORCID iD record or to link your user account to an existing ORCID iD, simply click this link: https://mc.manuscriptcentral.com/eae?URL_MASK=8d4368c7b0b74dcd9e125f416be38038

Thank you for your participation.

Sincerely,
Energy & Environment Editorial Office

SAGE Publications Inc., 2455 Teller Road, Thousand Oaks, CA 91320

Phone: 1-800-818-7243

Fax: 1-800-583-2665

www.sagepub.com

FIGURA B.14: Artículo 2 Acuse de recibo de la revista Energy and Environment

31/8/2019

Mail - LUIS LOPMAN - Outlook

RV: Energy & Environment EAE-18-0670.R1

KARLA MARIA AGUILAR CASTRO <karla.aguilar@Ujat.mx>

Fri 8/30/2019 9:52 PM

To: lopman20044@hotmail.com <lopman20044@hotmail.com>

De: Energy and Environment [onbehalf@manuscriptcentral.com]

Enviado: domingo, 25 de agosto de 2019 14:00

Para: lopman20044@hotmail.com; EDGAR VICENTE MACIAS MELO; KARLA MARIA AGUILAR CASTRO;

IVAN ALEJANDRO HERNANDEZ PEREZ; heididiaz@hotmail.com

Asunto: Energy & Environment EAE-18-0670.R1

25-Aug-2019

Dear Ms. Lopman:

Your revised manuscript entitled "Review on Methodological and Normative Advances in Assessment and Estimation of Wind Energy" has been successfully submitted online and is presently being given full consideration for publication in Energy & Environment.

Your manuscript ID is EAE-18-0670.R1.

Please mention the above manuscript ID in all future correspondence or when calling the office for questions. If there are any changes in your street address or e-mail address, please log in to ScholarOne Manuscripts at <https://mc.manuscriptcentral.com/eae> and edit your user information as appropriate.

You can also view the status of your manuscript at any time by checking your Author Center after logging in to <https://mc.manuscriptcentral.com/eae>.

As part of our commitment to ensuring an ethical, transparent and fair peer review process SAGE is a supporting member of ORCID, the Open Researcher and Contributor ID (<https://orcid.org/>). We encourage all authors and co-authors to use ORCID iDs during the peer review process. If you already have an ORCID iD you can link this to your account in ScholarOne just by logging in and editing your account information. If you do not already have an ORCID iD you may login to your ScholarOne account to create your unique identifier and automatically add it to your profile.

Thank you for submitting your manuscript to Energy & Environment.

Sincerely,
Energy & Environment Editorial Office

<https://outlook.live.com/mail/inbox/id/AQMKADAwATY3ZmYAZS05MWU1LTlkNjQIMDAQLTAwCgBGAAADMaXPIL9Nk02lLWUPwmVfNwcAzW421UIX...> 1/1

FIGURA B.15: Artículo 2 Acuse de recibo de la revista Energy and Environment