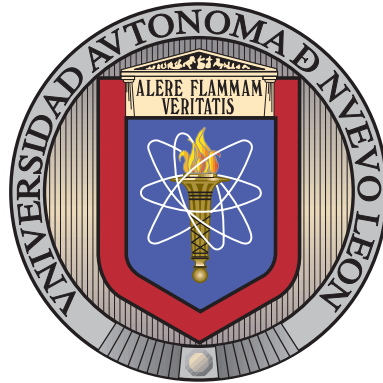


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



MODELO HÍBRIDO DE ANÁLISIS DE DATOS Y
OPTIMIZACIÓN PARA LA PLANEACIÓN DE
ENERGÍA EÓLICA

POR

MAURICIO ALEJANDRO RÍOS PALACIO

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN INGENIERÍA

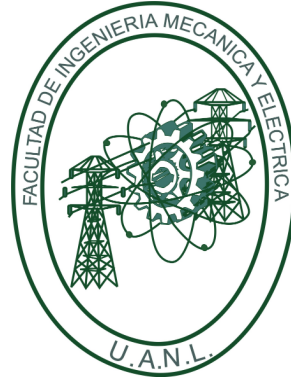
ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

MAYO 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



MODELO HÍBRIDO DE ANÁLISIS DE DATOS Y
OPTIMIZACIÓN PARA LA PLANEACIÓN DE
ENERGÍA EÓLICA

POR

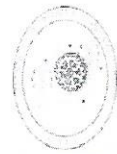
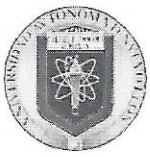
MAURICIO ALEJANDRO RÍOS PALACIO

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN INGENIERÍA

ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

MAYO 2022



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Modelo Híbrido de Análisis de Datos y Optimización para la Planeación de Energía Eólica», realizada por el alumno Mauricio Alejandro Ríos Palacios, con número de matrícula 1935060, sea aceptada para su defensa como requisito para obtener el grado de Doctor en Ingeniería con Especialidad en Ingeniería de Sistemas.

El Comité de Tesis

Dr. José Arturo Berrones Santos
Director

Dra. Paola Andrea Sánchez Sánchez
Co-Director

Dr. Javier Almaguer Martínez
Revisor

Dr. César Emilio Villarreal Rodríguez
Revisor

Dra. Leticia Amalia Neira Tovar
Revisor

Dr. Romeo Sánchez Nigenda
Revisor

Vo/Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado



San Nicolás de los Garza, Nuevo León, octubre de 2022



*Dedicado a mis padres Rodrigo De Jesus Ríos Del Río, Luz Dary Palacio Londoño
y mi hermana Diana Patricia Ríos Palacio.*

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	xvi
Resumen	xvii
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Descripción del problema	3
1.3. Justificación	5
1.4. Objetivos	9
1.4.1. Objetivo general	9
1.4.2. Objetivos específicos	9
1.4.3. Hipótesis	10
1.5. Metodología	10
1.6. Estructura de la tesis	12
2. Marco Teórico	14
2.1. Energía Eólica	14

2.1.1. Aerogenerador	17
2.1.2. Onshore VS Offshore	18
2.1.3. Tipos de aerogeneradores	23
2.1.4. La energía en el viento.	35
2.2. Métodos de optimización	47
2.2.1. Fundamentos preliminares.	49
2.2.2. Programación matemática u optimización.	50
2.2.3. Programación Lineal.	52
2.3. Big Data	54
2.3.1. El fenómeno Big Data	56
2.4. Estado del arte	60
3. Desarrollo de la Metodología	63
3.1. Exploración y preprocesamiento de los datos	67
3.1.1. Descripción del dataset.	67
3.1.2. Preparación del dataset.	68
3.1.3. Agrupación de datos por estaciones.	74
3.1.4. Completar datos faltantes.	78
3.2. Modelos de predicción de la velocidad del viento.	82
3.3. Modelo de optimización.	86
3.3.1. Área ocupada por un generador.	87

3.3.2. Costo de un aerogenerador.	89
3.3.3. Presupuesto en la producción de energía renovable.	90
3.3.4. Primer modelo de optimización.	93
3.3.5. Segundo modelo de optimización.	96
3.3.6. Tercer modelo de optimización.	102
4. Conclusiones	111
A. Apéndice	114
A.1. Histogramas y diagramas de cajas y bigotes a datos no agrupados. . .	114
A.2. Histogramas y diagramas de cajas y bigotes de velocidad en cada estación.	122
A.3. Histogramas y diagramas de cajas y bigotes de velocidad en cada estación con los datos completos	128
A.4. Segundo modelo de optimización implementando PuLP	134
A.5. Tercer modelo de optimización implementando PuLP - Matriz binaria	150

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Fuentes de energía.	4
2.1. Molino de aspas de tela.	15
2.2. Molino multipala tipo americano.	16
2.3. Góndola de un aerogenerador.	17
2.4. Conversión de energía eólica en electricidad.	18
2.5. Comparación de Energía generada OnShore vs OffShore	19
2.6. Producción de energía OnShore y OffShore	22
2.7. Clasificación de los aerogeneradores	23
2.8. Aerogenerador con rotor Savonius.	26
2.9. Aerogenerador con rotor Darrieus	27
2.10. Aerogenerador con rotor Giromill	28
2.11. Aerogenerador con rotor Windside	28
2.12. Aerogenerador tripala	29
2.13. Aerogenerador bipala	30
2.14. Aerogenerador monopala	30

2.15. Orientación a barlovento	31
2.16. Orientación a sotavento	32
2.17. Torres de celosía	33
2.18. Torres de acero tubulares	34
2.19. Torres de hormigón	34
2.20. Potencias según los diferentes diámetros	36
2.21. Captura de energía cinética que posee el viento	36
2.22. Potencia del viento en función de la velocidad	39
2.23. potencia de viento VS potencia de viento con Ley de Betz	40
2.24. Anemómetros	41
2.25. Función de máximo y mínimos.	49
3.1. Resumen de las fases del desarrollo metodológico.	63
3.2. Sensores en el área de Monterrey.	71
3.3. Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica velocity. .	74
3.4. Diccionario de estaciones - Estructura de datos.	75
3.5. Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Centro.	77
3.6. Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Noreste.	77
3.7. Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Centro - completado.	81
3.8. Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Noreste - completado.	81

3.9. Proceso para seleccionar el modelo de cada estación.	83
3.10. Diccionario de los modelos para la predicción de la velocidad del viento de cada zona.	85
3.11. Modelo de optimización sin delimitación de zonas.	95
3.12. Modelo de optimización con delimitación de zonas.	98
3.13. Velocidad max y min del aerogenerador SG2.1-114	104
3.14. Simplificación de variables de decisión.	105
3.15. Modelo de optimización con delimitación de zonas.	110
A.1. Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica CO. . . .	114
A.2. Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica direction. .	115
A.3. Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica humidity. .	115
A.4. Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica NO. . . .	116
A.5. Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica NO2. . . .	116
A.6. Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica NOX. . . .	117
A.7. Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica O3. . . .	117
A.8. Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica PM10. . . .	118
A.9. Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica PM2.5. . . .	118
A.10. Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica Pressure. .	119
A.11. Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica Rainfall. .	119
A.12. Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica SO2. . . .	120

A.13.Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica Solar. . . 120

A.14.Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica Temperature. 121

A.15.Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Noreste2.122

A.16.Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Noroeste.123

A.17.Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Noroeste2.123

A.18.Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Norte. . 124

A.19.Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Norte2. 124

A.20.Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Sur. . . 125

A.21.Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Sureste. 125

A.22.Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Sureste2.126

A.23.Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Sureste3.126

A.24.Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Suroeste.127

A.25.Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Suroeste2.127

A.26.Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Noreste2
- completado. 128

A.27.Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Noroeste
- completado. 129

A.28.Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Noroeste2 - Completado. 129

A.29.Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Norte -
Completado. 130

A.30.Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Norte2	
- Completado.	130
A.31.Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Sur -	
Completado.	131
A.32.Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Sureste	
- Completado.	131
A.33.Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Sureste2	
- Completado.	132
A.34.Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Sureste3	
- Completado.	132
A.35.Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Suroeste	
- Completado.	133
A.36.Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Suroeste2	
- Completado.	133

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Diferencia offshore vs Onshore.	21
2.2. Valores de la ecuación de potencia del viento.	38
2.3. Escala de Beaufort.	42
2.4. Escala Saffir-Simpson	43
2.5. Clasificación de vientos.	44
2.6. Características de los aerogeneradores	46
2.7. Aplicación de la investigación de operaciones.	48
2.8. Datos necesarios para elaborar un modelo de programación lineal. . .	53
3.1. Características del Dataset original.	68
3.2. Características del Dataset ajustado a sus tipos de datos.	70
3.3. Cantidad y porcentaje de valores nulos vs no nulos.	72
3.4. Resumen de datos estadísticos.	73
3.5. Estadística básica de la característica velocidad agrupado por estación. .	76
3.6. Tabla estadística con los datos completados.	80
3.7. Modelos de regresión ejecutados	82

3.8. Modelos para predecir la velocidad del viento de cada estación.	84
3.9. Estaciones con sus velocidades predichas por los modelos..	86
3.10. Presupuesto destinado a energía limpia.	93
3.11. Estaciones con sus velocidades y área disponible.	99
3.12. Datos de los aerogeneradores para el modelo de optimización.	100
3.13. Solución del segundo modelo optimización.	102
3.14. Solución del tercer modelo optimización	109

LISTA DE CÓDIGOS

3.1. Método para completar datos faltantes	79
3.2. Método para predecir las velocidades en cada estación	85
3.3. Implementación del modelo.	101
3.4. Implementación del tercer modelo.	108

AGRADECIMIENTOS

A **Dios** por darme ánimo, por consolar mi corazón y llenarme de fuerza para vencer los obstáculos de la vida con su mensaje a través del Don de la profecía, por asignarme ayudadores en lo espiritual e intelectual, en especial a *Erika Varelo*, *Sandra Ceballos*, *Alan Alcanta*, *Paola Andrea Sanchez* y *José Arturo Berrones*.

RESUMEN

Mauricio Alejandro Ríos Palacio.

Candidato para obtener el grado de Doctor en ingeniería especialidad en ingeniería de sistemas.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: MODELO HÍBRIDO DE ANÁLISIS DE DATOS Y OPTIMIZACIÓN PARA LA PLANEACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA.

Número de páginas: 160.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: Proponer un modelo para la planeación de energía eólica en las áreas metropolitanas de Monterrey mediante el uso de técnicas de análisis de datos y optimización.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: Identificación de aerogenerados que permitan la maximización en la generación de electricidad mediante el uso de técnicas de análisis de datos y optimización.

Firma del asesor: _____
Dr. José Arturo Berrones Santos

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El agotamiento de los combustibles fósiles¹ Asimismo, la emisión de gases de efecto invernadero, hacen que el mercado energético esté apuntado hacia un abastecimiento basado en recursos renovables. Con esta premisa, la energía eólica ha alcanzado un grado de implementación elevado en el sistema eléctrico de los países desarrollados. La energía eólica, al igual que el resto de las energías renovables, no se acopla perfectamente a la producción de energía eléctrica versus la demanda generada por parte del sistema eléctrico, debido a que depende de un recurso renovable y variable con el tiempo. Por tanto, se hace necesario la implantación de sistemas de almacenamiento de energía que permitan mejorar la gestión de estos recursos renovables.

La generación de energía a través de combustibles fósiles trae consigo una serie de problemas (Lokhande *et al.*, 2016) tales como agotamiento de los combustibles fósiles, el cambio climático, la lluvia ácida, el ser humano consume en un año lo que la naturaleza ha tardado un millón de años en producir (Chuvienco y Martín, 2015). Las reservas de combustible fósiles no son ilimitadas, pero están siendo consumidas en

¹Energías no renovables, como el carbón, el gasóleo o el gas natural.

mayores proporciones de las que se producen, de acuerdo con lo señalado, producirlo tarda millones de años.

En el contexto del cambio climático tenemos el efecto invernadero, este fenómeno natural es el que permite a nuestro planeta mantener las condiciones necesarias para albergar vida. La atmósfera captura algunos de los rayos del sol que llegan a la corteza terrestre, conservándolos dentro con el fin de obtener una temperatura media de 15°C.; de no ser atrapados estos rayos que rebotan en la superficie, la temperatura media de la Tierra sería de -18°C. La atmósfera está compuesta por diversos gases naturales, siendo el nitrógeno, el oxígeno y el argón los que constituyen el 99,93 % del total; aunque otros gases como el vapor de agua, el dióxido de carbono CO_2 , el metano, el óxido de nitrógeno y ozono, tienen una considerable incidencia en el efecto invernadero y la quema de combustibles fósiles generando una mayor emisión de dióxido de carbono, exceso de temperatura o calentamiento global, ocasionando el deshielo de los polos, la desertificación, incendios, tormentas e inundaciones. Desde principio del siglo XX y hasta nuestros días, se ha duplicado su concentración del CO_2 y cada año que pasa las consecuencias anteriormente mencionadas se acrecentarán considerablemente.

El efecto de invernadero no solo se relaciona con el calentamiento, puesto que la combustión de fósiles al liberar gran cantidad de óxidos de azufre y nitrógeno que reaccionan con gases de la atmósfera, se precipitan en forma de ácidos (sulfúrico y nítrico) incrementando la acidificación del agua en general. Esta precipitación, denominada lluvia ácida, causa daños en la vegetación, acelera la contaminación de la tierra, el agua y ocasiona la corrosión de las estructuras metálicas.

El daño ecológico generado por la utilización de recursos no renovables implica inconvenientes en las tensiones sociales con escala internacional; debido a que los principales yacimientos de combustibles fósiles están concentrados en lugares determinados del planeta. El control y explotación de estos, es causa de conflictos, guerras y tensiones sociales; de los cuales podemos tener información continua a través de

los medios de comunicación. Muchas de las guerras en los últimos años han sido causadas por el control de esos recursos energéticos, de los que dependen muchos países, algunos ejemplos; la guerra del Pacífico (1937-1945), la guerra Irán-Irak (1980-1988), invasión de Kuwait- guerra del Golfo (1990-1991), las guerras de EE.UU. en Irak, etc.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La vida moderna tal como la conocemos, se sustenta principalmente en la energía eléctrica, teniendo en cuenta esta premisa, este es un recurso natural entendido a modo de un bien intermedio que utilizamos para producir o usar bienes y servicios. La manera más habitual de generar electricidad se basa en transformar en mecánica, la energía contenida en la primaria, esto se logra por medio de la ignición de combustibles fósiles; el calor generado hace que aumente la presión ocasionando el movimiento de una turbina que está conectada a un generador eléctrico donde se obtiene la electricidad. (Blaschke *et al.*, 2013)

La utilización de combustibles fósiles para generar la electricidad exhibe dos problemas para la humanidad. Para empezar, es el principal causante del cambio climático; y así mismo, estos no son renovables y se agotarán con el tiempo. Con esta premisa, el desarrollo de las Energías Renovables No Convencionales (ERNC), sumo una forma de solución a la dificultad en el manejo de los combustibles fósiles; por una parte, estos casi no emiten Gases de Efecto Invernadero (GEI) y, además son renovables y asegurarían un abastecimiento sostenido de energía.

Aunque se plantean soluciones alternas para crear energía (1.1), así también surgen nuevas dudas; por ejemplo, si la cantidad de las nuevas fuentes alcanzará para cubrir las necesidades actuales, la posibilidad de mejorar el consumo de los dispositivos que se conectan en la red eléctrica, la viabilidad en la optimización de nuevas fuentes de energía, entre otras. Razón para ello, miles de científicos en el mundo

trabajan para solucionar dos problemas claves para la humanidad: bajar la contaminación y tener energía. Los parques eólicos son planteados como una alternativa para solventar esta situación, estos generan energía eléctrica a través del viento por medio del movimiento de un molino.

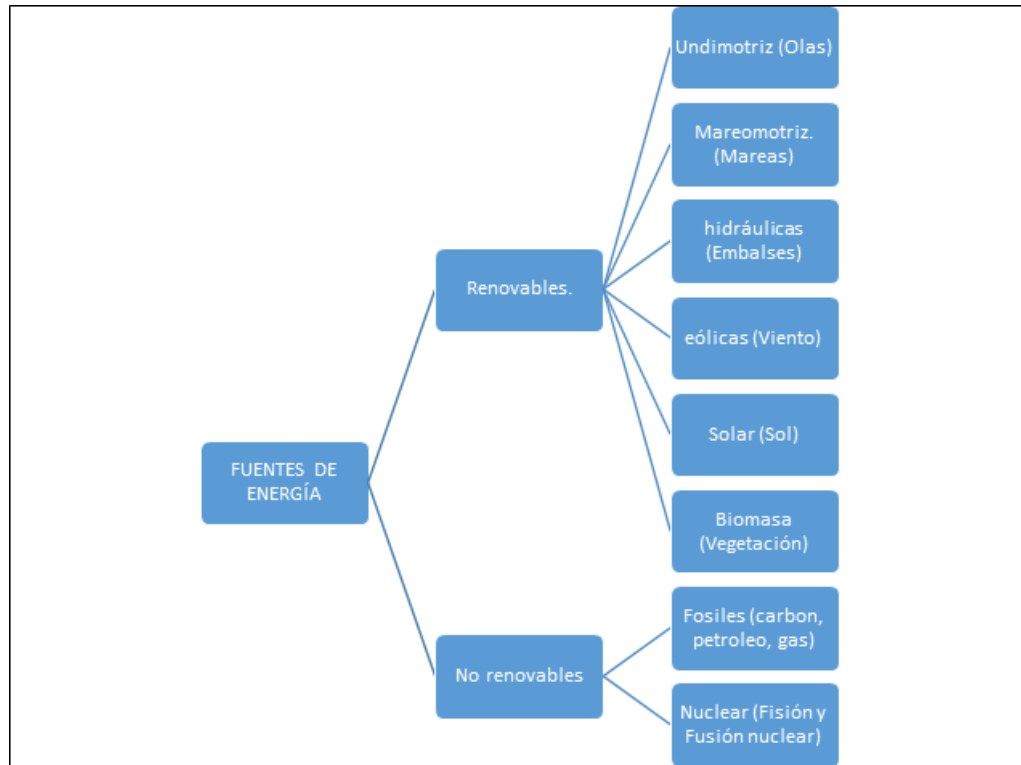


FIGURA 1.1: Fuentes de energía.

La eólica plantea sus propios retos para las empresas generadoras al momento de escoger un aerogenerador, tales como; la accesibilidad al área geográfica donde serán instalados, de acuerdo con las características de sus hélices, seleccionar los aerogeneradores con las características adecuadas en consideración al costo vs beneficio, aprovechar las zonas geográficas según la velocidad del viento registrada, conforme a las características de los aerogeneradores disponibles. Sin embargo; referente a la velocidad de viento, implica un nuevo cuestionamiento respecto a la veracidad en la predicción de esta.

La fiabilidad en la predicción se ha visto fortalecida por la aplicación de tecnologías Big Data, consideradas las más punteras. Con su implementación se obtiene

una eminente capacidad de procesamiento a conjuntos de información masiva; generalmente muy complejo de analizar con los sistemas y algoritmos tradicionales. Por ese motivo, las energías renovables son un recurso menos gestionable que las de origen tradicional, sin embargo, al incorporar estas tecnologías predictivas permitirán ganar un lugar junto a las mismas.

En relación con esto surge un cuestionamiento trascendental, impulsando a la ejecución del presente proyecto de investigación. ¿Como maximizar la generación de energía eléctrica considerando la reducción del costo y aprovechamiento del espacio geográfico por medio de aerogeneradores?

1.3 JUSTIFICACIÓN

El avance de un país no se puede concebir sin el uso de la energía eléctrica, en la actualidad la generación de esta se basa principalmente en combustibles fósiles como fuente primaria, como utilizamos el petróleo más rápido de lo que puede ser reemplazado por el proceso natural de descomposición realizado en millones de años, este se podría acabar. Sin embargo, desconocemos los datos específicos y se dispone de estimaciones desarrolladas desde los organismos gubernamentales más grandes; hasta pequeños especialistas independientes en monitoreo de suministro de petróleo. Todas las proyecciones respecto a cuánto petróleo queda, se hacen con base en las “reservas probadas”, es decir, aquel petróleo que los países tienen la certeza que se encuentra bajo sus territorios, pues ya han sido detectados, cuantificados y saben que es posible de extraer a partir de tecnología existente. Según BP (antes llamada BritishPetroleum (2019)) quedarían aproximadamente 1.707 billones de barriles, lo que da para seguir explotándolo 50,6 años más, aunque la cantidad de petróleo que existe en el planeta es muchísimo mayor que esta cifra, el punto es que por ahora no es extraíble, a causa de dos razones: es costoso realizarlo o no existe aún la tecnología adecuada. Por lo anterior, aparentemente el problema de cuanto petróleo queda en el mundo, no es la más crucial; el mayor problema radica esencialmente en la alteración

del medio ambiente, en el proceso de obtener la energía de este, debido a la emisión de gases de efecto invernadero a tasas monumentales para enfrentar la demanda energética.

Las emisiones de dióxido de carbono por combustibles fósiles, una vez más, es el centro de discusión sobre el cambio climático durante el último encuentro de la conferencia del clima de la ONU, en Madrid el 2 y 15 de diciembre de 2019. COP25 (2019)

En la conferencia se propuso un compromiso a 200 países para establecer metas más rígidas para la reducción de emisiones de dióxido de carbono, el principal causante del efecto invernadero. México y Brasil son los únicos países de América Latina en el ranking de los 15 países que más emiten dióxido de carbono (CO_2) en el mundo, según datos del GlobalCarbonAtlas (2019), una colaboración entre la red internacional de científicos Future Earth y la ONU.

Los datos de Global Carbon Atlas muestran que, en 2007, China superó a Estados Unidos y se convirtió en el mayor emisor de dióxido de carbono del planeta, una posición que mantiene hasta la fecha. El salto ocurrió en medio de un período de fuerte crecimiento económico e industrialización del país, impulsada principalmente por la quema de combustibles fósiles como el carbón. Por lo demás, en 2010, China pasó a ser la segunda mayor economía del mundo, superando a Japón. En la conferencia del clima de 2009 en Copenhague, el país asiático se comprometió que para 2020 habría reducido sus emisiones hasta un 45 % en comparación a los niveles del 2005, no obstante, los datos recopilados por el Global Carbon Atlas muestran que el país no alcanzó ese objetivo. Estados Unidos tampoco logró reducir sus emisiones, a pesar de haber cerrado un número récord de plantas de carbón durante 2018. El segundo mayor emisor de CO_2 ratificó su salida del Acuerdo de París en noviembre de 2019, simultáneamente, el presidente Donald Trump relajó las normas de regulación de los límites de emisión de los gases de efecto invernadero.

En 2018, toda América Latina emitió cerca de 17 % del total de China, el mayor

emisor del planeta. México y Brasil, las dos mayores economías de América Latina, fueron los principales responsables de esas emisiones. Cada uno de los países emitió casi un 5% de lo que China lanzó a la atmósfera el año pasado. En el Acuerdo de París, firmado en 2015, México se comprometió que en 2030 sus emisiones de gases de efecto invernadero serían un 22% menores a lo que se esperaría sin planes de reducción. Otro compromiso fue reducir las emisiones del sector industrial, generando cerca de 35% de energía limpia hasta 2024. Aun así, expertos dicen que un reciente desafío por la industria petrolera en el país, puede hacer que sea más severo cumplir la meta. Es similar el caso de Brasil, el cual se comprometido en la reducción de sus emisiones en un 43% hasta 2030, en comparación a 2005.

Desde la era preindustrial, cuando los niveles de CO₂ eran de 228 partes por millón (o ppm), las concentraciones promedio alcanzaron en 2018 un nivel de 407,8 ppm. En el mes de mayo del 2019, según científicos, los niveles atmosféricos de dióxido de carbono, pasaron a 415 ppm por primera vez en toda la historia de los seres humanos. ^{.Es} significativo porque la última vez que la Tierra experimentó concentraciones de CO₂ de este nivel fue probablemente hace 2,6 o incluso 3 millones de años. Es decir, antes de la evolución de la especie humana”, James Dyke, profesor de Sistemas Globales del Departamento de Geografía de la Universidad de Exeter, en Reino Unido. Según el informe más reciente (2019) de la ONU sobre el Medio Ambiente, los países deben quintuplicar sus compromisos de reducción de emisiones de CO₂ si se quiere evitar un calentamiento mayor de 1,5 grados respecto a la era preindustrial. BBCNews (2019)

Además de la concientización a nivel internacional en mejorar el medio ambiente disminuyendo los índices de emisión; también se suman aquellas naciones las cuales no disponen de los recursos de combustibles fósiles, encaminados en la búsqueda de nuevas fuentes de generación de energía, destacando entre ellas la eólica y solar, siendo hoy en día la eólica la energía renovable no convencional (ERNV) proponiendo una mejor relación costo-beneficio.

Por consiguiente, se evidencia un incremento en la creación de plantas de generación eléctrica basados en fuentes renovables; esta necesidad abre las puertas para realizar investigaciones de nuevos espacios geográficos que generen un potencial aprovechable para extraer la energía e interconectarla a la red eléctrica existente.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

- Proponer un modelo para la planeación de energía eólica en las áreas metropolitanas de Monterrey mediante el uso de técnicas de análisis de datos y optimización.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar los elementos teóricos y metodológicos fundamentales de la generación de energía eléctrica por medio de aerogeneradores.
- Diseñar un modelo híbrido de análisis de datos y optimización para la planeación de energía eólica.
- Validar el modelo híbrido con los datos recolectados por los sensores instalados en las áreas metropolitanas de Monterrey.

1.4.3 HIPÓTESIS

El inminente colapso de la generación de energía a través de los combustibles fósiles; ha propiciado visualizar nuevas fuentes generadoras de energías limpias y renovables; tales como los vientos, las mareas, los propios rayos del sol, entre otras, con el objetivo de suplir la demanda energética de las ciudades. Pese a esto, al tratarse de elementos que varían con el tiempo por su propia naturaleza, conlleva implícitamente un problema de predicción en su comportamiento, esto con el fin de maximizar la generación eléctrica posible en cada tecnología generadora de energía.

Obstante lo anterior, se quiere determinar si es posible realizar un modelo híbrido de análisis de datos y optimización para la planeación de energía eólica.

1.5 METODOLOGÍA

El proyecto está direccionado en la línea de investigación del Big Data aplicado en el eje temático de la generación de energía eléctrica por medio de aerogeneradores, en el cual se analizará un Dataset suministrado por el Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA) el cual contiene registros desde el año de 1993 hasta el año 2019, los cuales a través de 13 sensores distribuidos en el territorio de Monterrey han recolectado diferentes datos, entre ellos, el dióxido de carbono, dióxido de nitrógeno, ozono, presión, lluvia, humedad, dióxido de azufre, temperatura, velocidad del viento, entre otros parámetros.

Los sensores compilan información las 24 horas los 7 días de la semana, teniendo un total de 1.542.696 registros en nuestro dataset, cabe precisar que ciertos lapsos de tiempo presentan pérdida de información en algunos sensores por motivos de mantenimiento o avería de algún componente, para estos casos, se examinará en lo posible para garantizar el almacenamiento completo de la información.

La metodología propuesta para esta tesis se encuentra apoyada en el documento

realizado por el doctor (John B, 2015) el cual propone los siguientes puntos:

1. **Entendimiento del negocio:** En esta etapa es primordial tener una definición clara, debido que este brindará la orientación al enfoque analítico que se abordará en la solución del problema. Con ello se estudiará el campo en el cual se aplicará el análisis, para facilitar la comprensión del tema; ofreciendo una ventaja considerable al momento de decidir cómo se abordará la temática.
2. **Enfoque analítico:** en este se elegirá el enfoque analítico según la problemática estudiada ya sea:
 - Descriptivo: Estado actual del negocio.
 - Diagnóstico: ¿Por qué está pasando esto?
 - Predictivo: ¿Qué pasara después?
 - Prescriptivo: ¿Cómo podemos resolverlo?
3. **Requerimiento de datos y Recolección de datos:** En esta etapa, como se expresó anteriormente se cuenta con el dataset suministrado por el Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA); además se buscará información de las características de los diferentes aerogeneradores de energía.
4. **Comprensión de datos y reparación de datos:** Se aplicará un análisis usando diferentes técnicas estadísticas y visualización de datos al dataset; de este modo poder determinar la naturaleza y estructura de los mismos, considerando que se podría identificar pequeños detalles que guiaran nuestro proyecto. Así mismo se depurará la información del dataset, aplicando filtros y completándose preferiblemente la información faltante.
5. **Modelado:** Se realizarán procesos fundamentados en la estadística a nuestro dataset, con el fin aplicar un modelo matemático que nos permita resolver; y se logre acoplar a nuestros datos de la manera más óptima.

6. **Evaluación y Feedback:** En esta fase realizaremos pruebas, usando información de nuestro dataset para determinar si el modelo brinda solución al problema planteado; además la metodología de ciencia de datos se considera iterativa, se podría proponer mejoras para optimizar nuestro modelo.

1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS

El documento se encuentra desarrollado en capítulos, los cuales se encuentran de la siguiente forma:

- **Capítulo 1:** Comprende la introducción y las generalidades propias del escenario en el cual se desarrolla el trabajo investigativo. Se esboza los antecedentes que perfilan el objeto de estudio de la investigación y se cimienta el problema susceptible de ser atendido por el proyecto. Por otra parte, condensa el objetivo general y los objetivos específicos, conducentes de éste y la pertinencia en su ejecución; acorde al alcance y delimitación aplicada al proyecto de estudio planteado.
- **Capítulo 2:** Despliega el marco histórico y teórico sobre la generación de la energía eléctrica por medio de aerogeneradores, el procesamiento de grandes volúmenes de datos y los procesos de optimización para maximizar la producción de energía.
- **Capítulo 3:** Se plantea el desarrollo metodológico aplicado al proyecto, en el cual se evidencia el uso de las técnicas de análisis de los datos de las estaciones meteorológicas. En cada paso se observa la pertinencia en la modalidad de investigación estipulada, las alternativas de fuentes de información empleadas y el despliegue del modelo integrador de las diversas facetas de la problemática bajo análisis. De tal manera que se logra llegar a un modelo híbrido el cual la primera parte se predice el comportamiento del viento y la segunda

se enfoca en optimizar la generación de energía eléctrica teniendo en cuenta interdependencia de factores y su valoración relativa entre ellos.

- **Capítulo 4:** Las conclusiones competen a inferencias finales generadas por el proyecto relativo a la temática de estudio, además se evidencian las recomendaciones orientadas en sugerencias válidas de implementación posterior, con el objetivo de fortalecer la potencial puesta en marcha del proyecto, como a su vez las líneas de futuras investigaciones.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 ENERGÍA EÓLICA

La energía eólica ¹ es aquella que se obtiene del viento, esta proviene de la energía cinética de las masas de aire; la cual puede convertirse en energía mecánica y posteriormente en electricidad u otras formas útiles de energía para las actividades humanas.

La energía del viento ha sido utilizada por la humanidad desde hace más de 3.000 años; fundamentalmente para moler grano, bombear agua y como fuerza motora en los barcos. A mediados del siglo VIII aparecen en Europa, procedentes del este, los primeros grandes molinos de eje horizontal con cuatro aspas (2.1). Fue en Holanda donde se instalaron y fue desarrollada la tecnología de las aspas de tela, sin embargo, solo a partir de los siglos XII-XIII surge la diversificación del uso de los molinos de viento para la elevación de agua y la molienda de grano.

Esta tecnología se mantuvo entrado el siglo XIX, durante el desarrollo de los molinos de viento y fue interrumpido debido a la llegada de la revolución industrial y la utilización masiva de vapor, la electricidad y los combustibles fósiles como fuentes de energía motriz. Sin embargo, en la segunda mitad del siglo XIX cuando tiene lugar

¹Proviene del dios de los vientos en la mitología griega llamado Eolo.

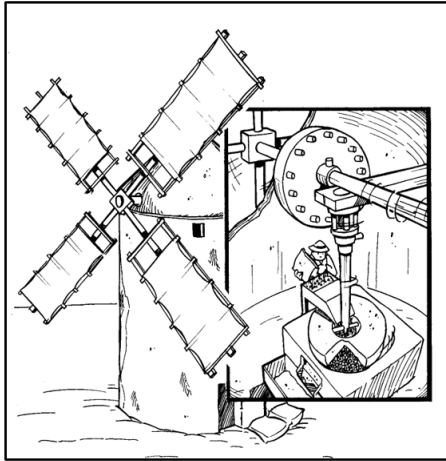


FIGURA 2.1: Molino de aspas de tela.

uno de los más importantes avances en la tecnología del aprovechamiento del viento, surge la aparición del popular molino multipala tipo americano(2.2); utilizado para bombeo de agua prácticamente en todo el mundo, y cuyas características habrían de crear las bases para el diseño de los modernos generadores eólicos. Fue en el año 1891 cuando el ingeniero danés Poul LaCour fabricó el primer aerogenerador destinado a la producción de energía eléctrica.

El primer aerogenerador comercial fue construido por la empresa americana Brush basándose en las investigaciones de LaCour, ofreciendo una potencia nominal de 12 kW en corriente continua. No obstante, la compañía danesa F.L. Smidth que construyó en el año 1941 lo que se puede considerar el primer modelo de turbina eólica de la era moderna; pues los ingenieros daneses mejoraron la tecnología de este primer aerogenerador durante la primera y la segunda guerra mundial, incorporando mejoras aerodinámicas en las palas, debido al gran avance en los conocimientos en aerodinámica que se produjeron en esa época.

A comienzos de los años 70 cuando se produjo la primera crisis energética mundial², el interés por obtener energía a través de otros medios emergió de nuevo,

²A causa del embargo de la exportación de petróleo por parte de los países productores árabes (OPEP) a los principales países industrializados, en respuesta al apoyo occidental a Israel en el conflicto árabe-israelí.

y desde finales de los años 70, la energía eólica es considerada como una de las fuentes de energía de tipo renovable más importante durante la última década del siglo XX. En el transcurrir de estos años, además del aumento de aerogeneradores instalados, también se han incrementado sus dimensiones y su potencia generada. A finales del año 1989, el aerogenerador más moderno era de 300 kW con un rotor de 30 metros de diámetro. Diez años después, el avance tecnológico hizo posible construir turbinas eólicas capaces de generar 1500 kW con un diámetro de rotor de 70 metros. A principios del siglo XXI, se crearon aerogeneradores comerciales de 4 MW y estando en fase de desarrollo y experimentación con unidades de una potencia eléctrica de 5 y 6 MW. (Ackermann y Söder, 2002).

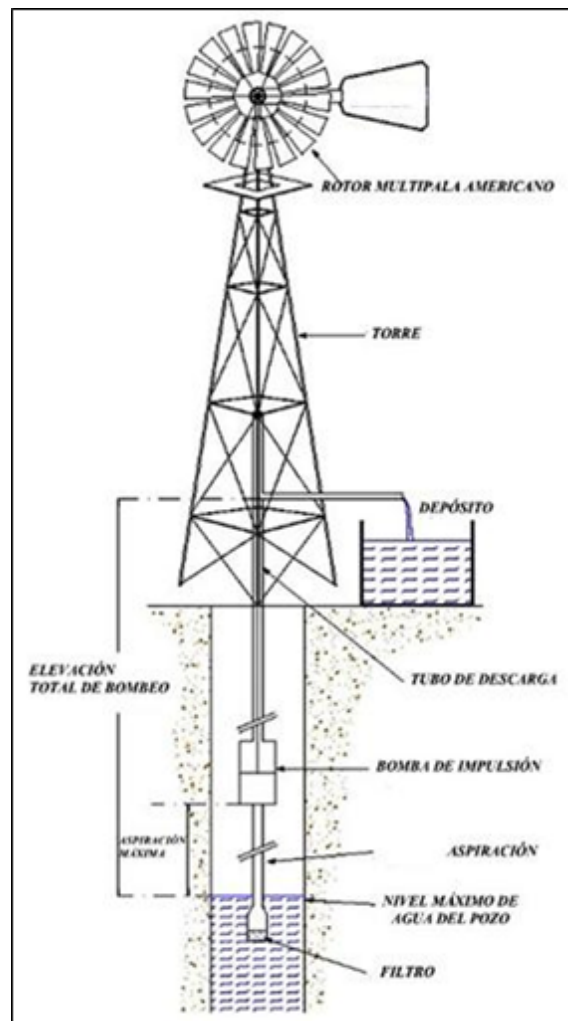


FIGURA 2.2: Molino multipala tipo americano.

2.1.1 AEROGENERADOR

Un aerogenerador es un dispositivo electro-mecánico capaz de transformar la energía cinética del viento en energía eléctrica. La potencia aerodinámica del viento es convertida en potencia mecánica en el eje, por medio del rotor eólico; compuesto generalmente por dos o tres aspas unidas al buje. Sobre el mismo buje, se coloca la caja multiplicadora.³ Asimismo, el generador eléctrico convierte la energía mecánica en eléctrica y el transformador la inyecta a la red; tanto el alternador como el multiplicador de velocidad se alojan en la llamada góndola, ubicada en el extremo de una torre de sujeción. (López, 2012) El aerogenerador puede incluir un anemómetro por si la velocidad del viento es excesiva, lo cual nos proporcionara información al sistema de control; que actúa para evitar esfuerzos mecánicos excesivos y una veleta para orientar la góndola en la dirección del viento.

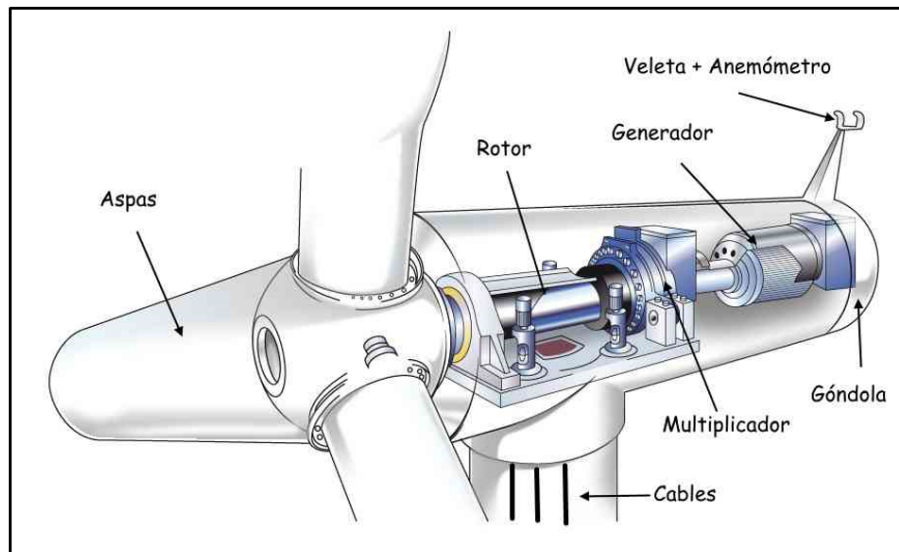


FIGURA 2.3: Góndola de un aerogenerador.

Dependiendo de las condiciones de viento y de las necesidades energéticas de la red eléctrica, los aerogeneradores disponen de varios sistemas de control de potencia. Éstos, pueden actuar sobre la energía cinética captada al viento o sobre la energía

³Este dispositivo es opcional y su utilización influirá en la elección del generador eléctrico, pues si se decide eliminar se deberá usar un generador múltipolos.

eléctrica cedida a la red a través del control del generador eléctrico (Burton *et al.*, 2011).

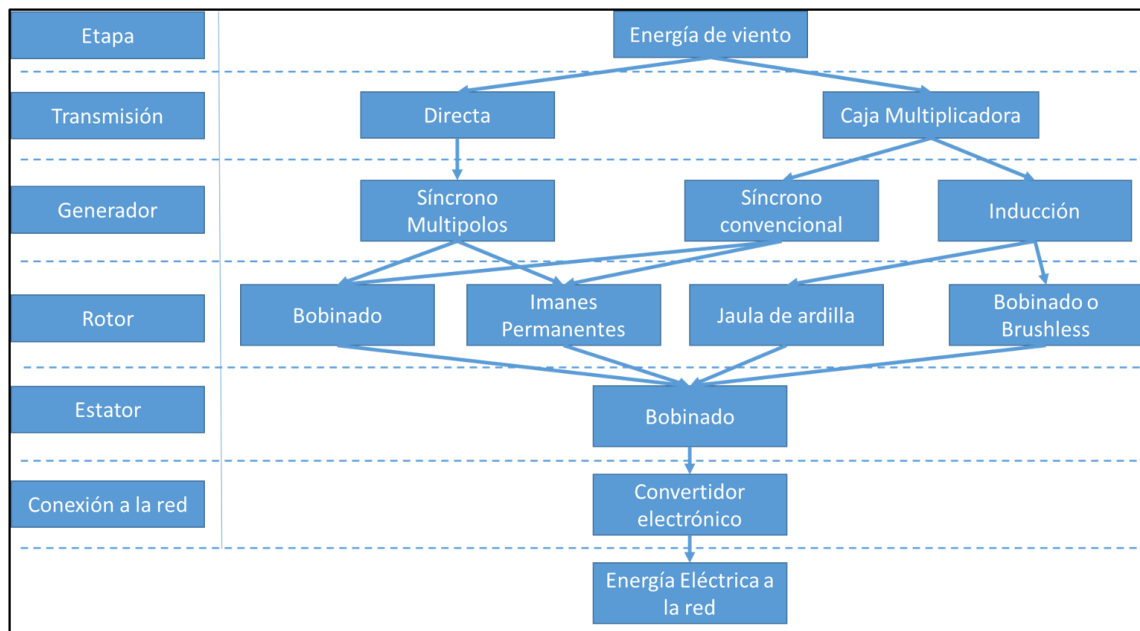


FIGURA 2.4: Conversión de energía eólica en electricidad.

2.1.2 ONSHORE VS OFFSHORE

Existen dos tipos de generadores en función de cómo y dónde se genera la electricidad. Para empezar, encontramos el modelo de producción de eólica en tierra, también llamado Onshore, por otro lado, existen los aerogeneradores instalados en el mar que producen energía eólica llamados Offshore.

Aunque son dos formas de producción de energías limpias; a partir del viento que presentan amplias similitudes, así también muestran notables diferencias. La primera y más apreciable; su desigual incursión en el mercado, en tanto que la eólica terrestre (Onshore) se encuentra extendida por el globo terráqueo y las marinas (Offshore) empezando a revelar su gran potencial. Diferencia que se evidencia en sus cifras de producción.

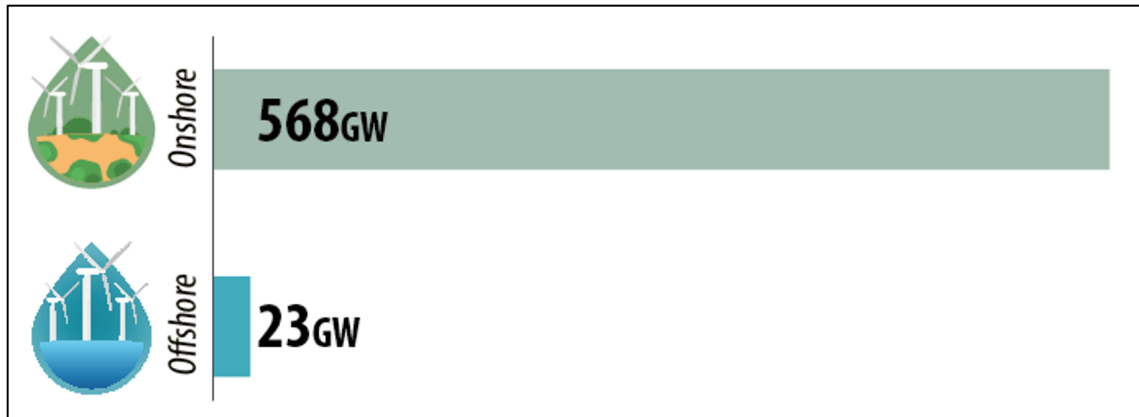


FIGURA 2.5: Comparación de Energía generada OnShore vs OffShore a nivel mundial.(eolivertical, 2019)

Según el portal Global Wind Report⁴, en 2018 se alcanzaron 568GW de capacidad total instalada de eólica terrestre (Onshore) en el mundo; instalándose 46,8 nuevos GW de este tipo de energía. Mientras que la capacidad total instalada en eólica marina (Offshore) se situó en los 23,1GW ese mismo año, con un incremento de 4,5GW de nuevas instalaciones. Esto evidencia el monumental despliegue del Onshore versus al tímido desarrollo del Offshore, a pesar de que ésta última, cuenta con parques eólicos con mayor capacidad instalada.

En 2018 las turbinas de alta mar (Offshore) alcanzaron una potencia unitaria media de 6,8 MW en Europa (un 15 % más que en 2017). Una cifra que se prevé aumente en el corto plazo, dado que, según el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), ya existen prototipos de aerogeneradores marinos que superan los 10 MW de potencia unitaria, sin embargo, las cifras de las turbinas terrestres (onshore) cuentan con potencias unitarias mucho menor a su contraparte. Una enorme diferencia que viene también influida por el propio tamaño de la turbina (inferior en tierra), la orografía, el transporte e incluso las limitaciones que se encuentran en los parques eólicos terrestres en cuanto al impacto visual o acústico que generan las turbinas en tierra.

⁴<https://gwec.net/>

La razón por la cual unos aerogeneradores producen más energía que otros; reside en el propio entorno donde se ubican estos, la velocidad del viento en alta mar es mucho más que la percibida en tierra firme, debido a que no encuentra barreras que frenen su fuerza; lo que permite generar una potencia muy por encima a la producida por un aerogenerador en tierra, donde el viento sí encuentra barreras y cuya fuerza es mucho menor.

Por lo anterior se pensaría, en transferir todos los esfuerzos a la generación de energía por aerogeneradores Offshore, sin embargo; una de las principales razones son los elevados costes de instalación y mantenimiento de los parques marinos. Se trata de megaestructuras asentadas a una profundidad máxima; que en Europa ronda la media los 27,5 metros, y a una distancia aproximada de 41 kilómetros de la costa según datos de WindEurope⁵.

Estas megaestructuras traen consigo una serie de desventajas que limitan su instauración:

- Requieren de complejas cimentaciones marinas que suponen grandes inversiones.
- Su mantenimiento conlleva altos gastos de explotación.
- Su zona de instalación es limitada (sólo pueden colocarse en aguas de una determinada profundidad y a una distancia mínima de la costa).
- Los aerogeneradores marinos están expuestos a condiciones especialmente severas como el ambiente salino, que provoca una corrosión acelerada.

Del mismo modo, existen estructuras flotantes que pueden ubicarse a mayor profundidad; pero todavía están en un incipiente proceso de desarrollo por lo que resultan poco rentables.

⁵<https://windeurope.org/>



 <p style="text-align: center;">Offshore</p>	 <p style="text-align: center;">Onshore</p>
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mayor potencia unitaria. ✓ Menor impacto visual y acústico. ✓ Mayor capacidad instalada. ✗ Costosa infraestructura. ✗ Condiciones ambientes severas. ✗ Altos gastos de explotación. ✗ Tecnología menos desarrollada. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Instalación más económica. ✓ Mayor accesibilidad. ✓ Bajos costes de mantenimiento. ✗ Tecnología más desarrollada. ✗ Mayor impacto visual y acústico. ✗ Menor potencia unitaria. ✗ Menor capacidad instalada.

TABLA 2.1: Diferencia offshore vs Onshore.

El mercado de la producción de energía eólica terrestre (Onshore), está liderado desde 2008 por China; un país que actualmente produce el 36 % de la eólica terrestre del mundo y que, sólo en 2018, instaló 21,2 nuevos GW de potencia Onshore alcanzando así los 206 GW de capacidad total instalada. Le sigue Estados Unidos con una capacidad instalada de 96 GW representando el 17 % de la eólica terrestre mundial y que en 2018 sumó a su red eléctrica 7,6 nuevos GW de energía eólica terrestre, en último lugar, Alemania encargada de aportar el 9 % de la producción mundial y que también contribuyó a aumentar la capacidad instalada del planeta con la instalación de 2,5 nuevos GW a la red, a continuación, le sigue India (6 %), España (4 %), Francia (3 %), Brasil (3 %), Canadá (2 %), Reino Unido (2 %), Italia (2 %) y otros países con producciones menores que representan el 16 % restante.

A diferencia de la producción de eólica terrestre que se distribuye de manera uniforme por el globo terráqueo, la eólica marina concentra casi toda su producción en tres países que producen el 82 % de la energía eólica Offshore del mundo siendo

estos:

1. Reino Unido que genera el 34% de la energía eólica marina mundial y en el último año añadió a su red eléctrica 1,3 nuevos GW de eólica Offshore.
2. China que produce el 28% de energía eólica marina y que en 2018 instaló 1,8 GW.
3. Alemania que es responsable del 20% de la generación de eólica Offshore del planeta, con un incremento en el último año en su capacidad instalada de 0,9 GW.

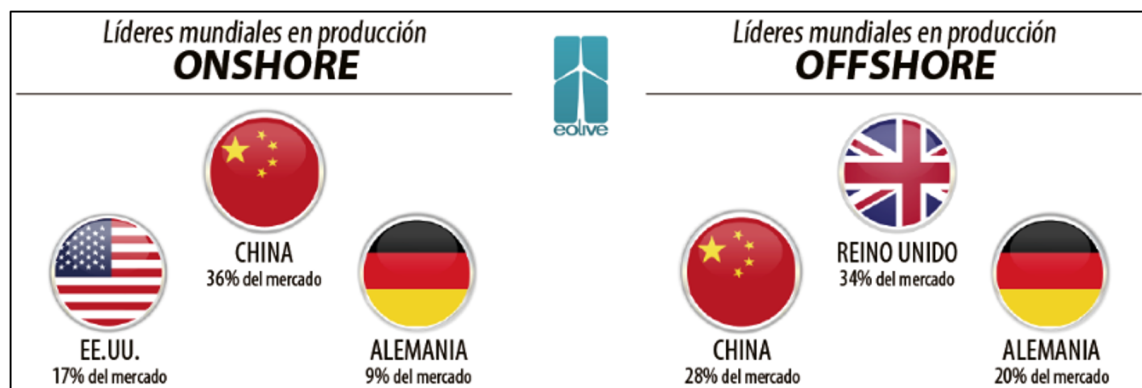


FIGURA 2.6: Productores de energía OnShore y OffShore a nivel mundial. (eoliver-tical, 2019)

2.1.3 TIPOS DE AEROGENERADORES

Los aerogeneradores pueden clasificarse según varios criterios y al mismo tiempo generar una nueva clasificación (García Garrido, 2018).

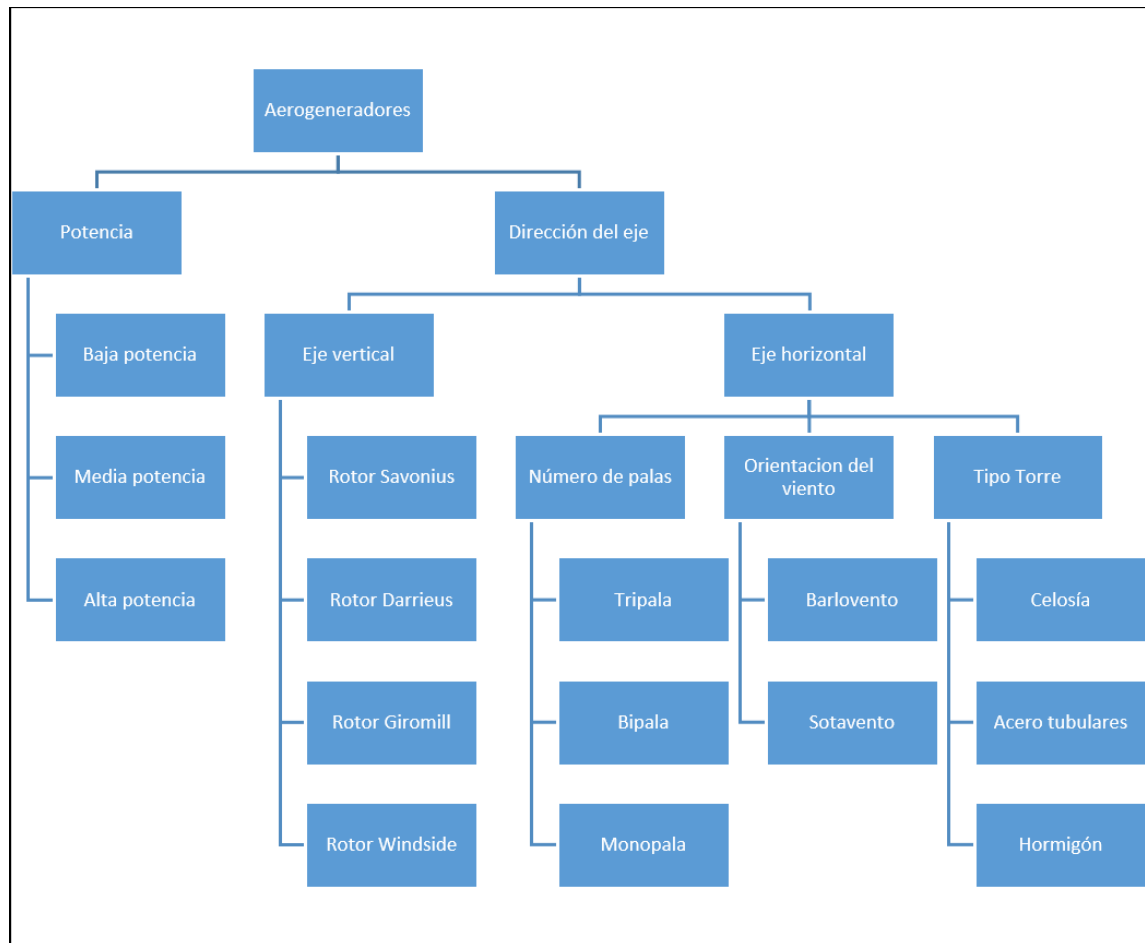


FIGURA 2.7: Clasificación de los aerogeneradores.

2.1.3.1 AEROGENERADORES SEGÚN LA POTENCIA GENERADA.

De acuerdo con el criterio de potencia, se pueden distinguir los siguientes tres tipos de aerogeneradores o turbinas eólicas:

- **Turbinas de baja potencia:** Históricamente son los asociados a la utilización mecánica como bombeo del agua; proporcionan potencias alrededor del rango de $50KW$, aunque pueden utilizarse varios equipos adyacentes para aumentar la potencia total suministrada. Hoy en día siguen utilizándose como fuente de energía para sistemas mecánicos o como suministro de energía en equipos aislados. También se utilizan en grupo y junto con sistemas de respaldo como motores de gasolina para suministro de energía de zonas rurales o edificios, ya sea conectándose a la red o con bacterias para almacenar la energía producida y garantizar la continuidad de la cobertura energética.
- **Turbinas de media potencia:** Son los que se encuentran en el rango de producción de energía de $150KW$. Son utilizados de forma similar a los equipos de baja potencia, pero para mayores requerimientos energéticos. No suelen estar conectados a baterías de almacenamiento, por lo que se utilizan conectados a red o junto con sistemas de respaldo.
- **Turbinas de alta potencia:** Son las utilizadas para producción de energía de forma comercial, aparecen conectados a red y en grupos conformando centrales Eolo eléctrica, ya sea en tierra (onshore) como en entorno marino (offshore). Su producción llega hasta el orden del gigavatio. El diseño elegido mayoritariamente para estos equipos son los aerogeneradores de eje horizontal *tripalas*, orientados a *barlovento* y con *torre tubular*.

2.1.3.2 AEROGENERADORES SEGÚN LA DIRECCIÓN DEL EJE

Los aerogeneradores se pueden clasificar en dos grandes grupos, dependiendo de la dirección del eje de giro respecto a la dirección del viento:

- **Aerogeneradores de eje vertical:** Sus principales ventajas son; que no necesita un sistema de orientación al ser omnidireccional y que el generador, multiplicador, etc., son instalados a ras de suelo, lo que facilita su mantenimiento y disminuyen sus costes de montaje. Sus desventajas frente a otro tipo de aerogeneradores son su bajo rendimiento, la necesidad de sistemas exteriores de arranque en algunos modelos, y que el desmontaje del rotor por tareas de mantenimiento hace necesario que toda la maquinaria del aerogenerador sea desmontada.

1. **Aerogenerador con rotor Savonius:** Es el modelo más simple de rotor, consiste en cilindros huecos desplazados respecto su eje; de forma que ofrecen la parte cóncava al empuje del viento, ofreciendo a su parte convexa una menor resistencia al giro. Se suele mejorar su diseño dejando un espacio entre ambas caras para evitar la sobre presión en el interior de la parte cóncava. Pueden construirse superponiendo varios elementos sobre el eje de giro. No son útiles para la generación de electricidad debido a su elevada resistencia al aire. Su bajo coste y fácil construcción les hace útiles para aplicaciones mecánicas.

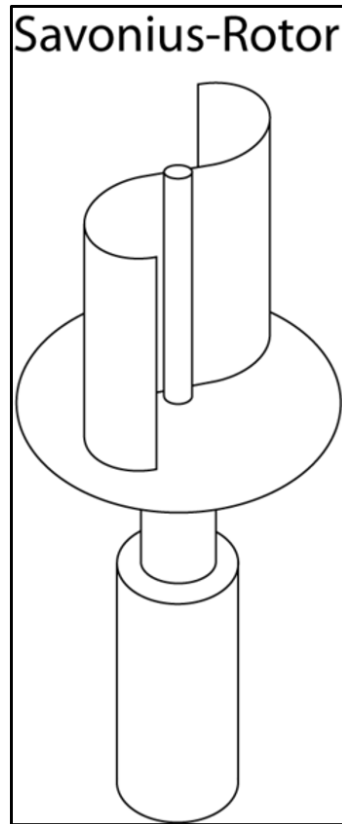


FIGURA 2.8: Aerogenerador con rotor Savonius.

2. **Aerogenerador con rotor Darrieus:** Patentado por G.J.M. Darrieus en 1931, es el modelo de los aerogeneradores de eje vertical de más éxito comercial. Consiste en un eje vertical asentado sobre el rotor, con dos o más finas palas en curva unidas al eje por los dos extremos; el diseño de las palas es simétrico y similar a las alas de un avión, el modelo de curva utilizado para la unión de las palas entre los extremos del rotor es el de Troposkien, aunque puede utilizarse también catenarias. Evita la necesidad de diseños complejos en las palas como los necesarios en los generadores de eje horizontal, permite mayores velocidades que las del rotor Savonius, aunque sin alcanzar las generadas por los modelos de eje horizontal, pero necesita de un sistema externo de arranque.

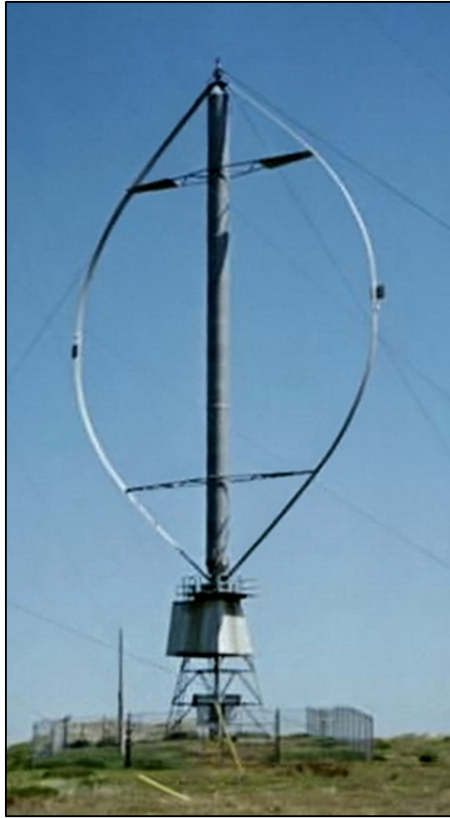


FIGURA 2.9: Aerogenerador con rotor Darrieus.

3. **Aerogenerador con rotor Giromill:** Este tipo de generadores también fueron patentados por G.J.M. Darrieus. Consisten en palas verticales unidas al eje por unos brazos horizontales, que pueden salir por los extremos del aspa e incluso desde su parte central. Las palas verticales cambian su orientación a medida que se produce el giro del rotor para un mayor aprovechamiento de la fuerza del viento.



FIGURA 2.10: Aerogenerador con rotor Giromill.

4. **Aerogenerador con rotor Windside:** Es un sistema similar al rotor Savonius, en vez de la estructura cilíndrica para aprovechamiento del viento, consiste en un perfil alabeado con torsión que asciende por el eje vertical. La principal diferencia frente a otros sistemas de eje vertical es el aprovechamiento del concepto aerodinámico, que le acerca a las eficiencias de los aerogeneradores de eje horizontal.



FIGURA 2.11: Aerogenerador con rotor Windside.

- **Aerogeneradores de eje horizontal:** En la actualidad, la gran mayoría de los aerogeneradores que se construyen conectados a red son tripalas de eje horizontal. Los aerogeneradores horizontales tienen una mayor eficiencia energética y alcanzan mayores velocidades de rotación; por lo que necesitan caja de engranajes con menor relación de multiplicación de giro, además debido a la construcción elevada sobre torre aprovechan en mayor medida el aumento de la velocidad del viento con la altura, los modelos de eje horizontal pueden subdividirse a su vez por el número de palas empleado, por la orientación respecto a la dirección dominante del viento y por el tipo de torre utilizada.

1. **Tripala:** Es el más empleado en la actualidad, consta de 3 palas colocadas formando 120° entre sí. Un mayor número de palas aumenta el peso y coste del aerogenerador, por lo que no se emplean diseños de mayor número de palas para fines generadores de energía de forma comercial, aunque si para fines mecánicos como bombeo de agua etc.



FIGURA 2.12: Aerogenerador tripala.

2. **Bipala:** Ahorra el peso y coste de una de las palas respecto a los aerogeneradores tripala, pero necesitan mayores velocidades de giro para producir la misma energía que aquellos. Para evitar el efecto desestabilizador necesitan de un diseño mucho más complejo, con un rotor basculante y

amortiguadores que eviten el choque de las palas contra la torre.



FIGURA 2.13: Aerogenerador bipala.

3. **Monopala:** Tienen, en mayor medida, los mismos inconvenientes que los bipala, necesitan un contrapeso en el lado opuesto de la pala, por lo que el ahorro en peso no es tan significativo.



FIGURA 2.14: Aerogenerador monopala.

Además de la clasificación anterior de acuerdo al número de palas los aerogeneradores de eje horizontal también se pueden clasificar de acuerdo con la

orientación al viento.

1. **Orientación a barlovento (cara al viento):** Cuando el rotor se encuentra enfocado de frente a la dirección del viento dominante, consigue un mayor aprovechamiento de la fuerza del viento que en la opción contraria o sotavento, pero necesita un mecanismo de orientación hacia el viento. Es el caso inmensamente preferido para el diseño actual de aerogeneradores.

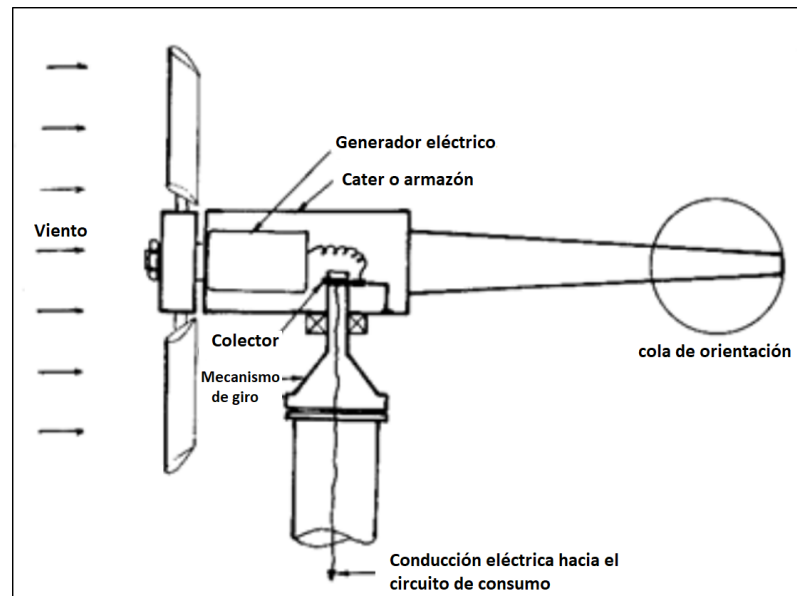


FIGURA 2.15: Orientación a barlovento.

2. **Orientación a sotavento (de espaldas al viento):** Cuando el rotor se encuentra enfocado en sentido contrario a la dirección del viento dominante, la estructura de la torre y la góndola disminuye el aprovechamiento del viento por el rotor; en este caso el viento es el que orienta con su propia fuerza a la góndola, por lo que no son necesarios elementos de reorientación automatizada en la teoría, aunque si suelen utilizarse como elemento de seguridad. Las palas y la góndola son construidos con una mayor flexibilidad que en el caso de orientadas a barlovento.

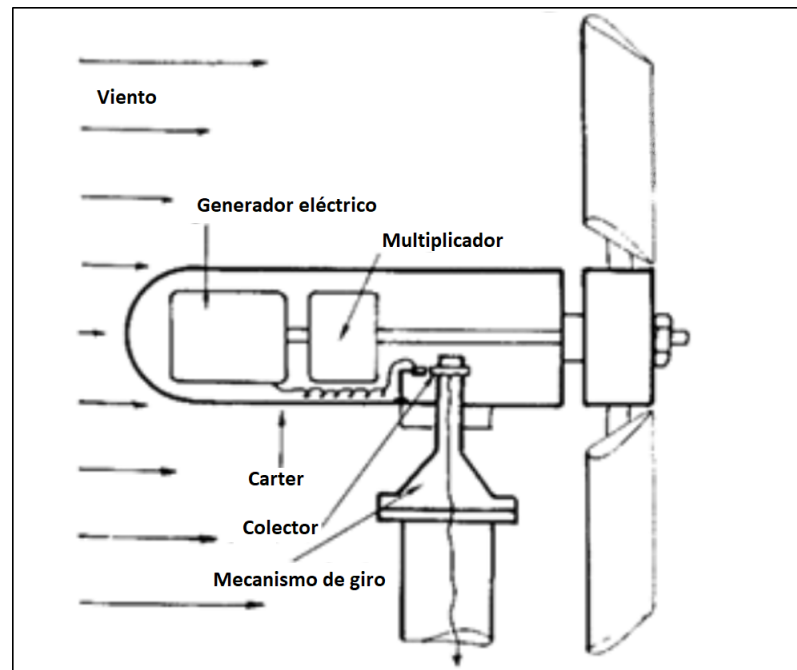


FIGURA 2.16: Orientación a sotavento.

Por último, tenemos la clasificación de acuerdo al tipo de torre dentro de la categoría del eje horizontal:

1. **Torres de celosía:** Son las construidas mediante perfiles de acero unidos por tornillería. Son asequibles y fáciles de construir, pero necesitan de verificaciones periódicas de la correcta sujeción de los segmentos de acero entre sí. Necesitan un emplazamiento extra para la instalación de los equipos de suelo como sistemas de control o equipos eléctricos, el acceso a

la góndola se realiza por escalerillas exteriores de baja protección frente a fuertes vientos y condiciones climáticas adversas. No se utilizan en zonas geográficas septentrionales o para aerogeneradores de gran potencia.

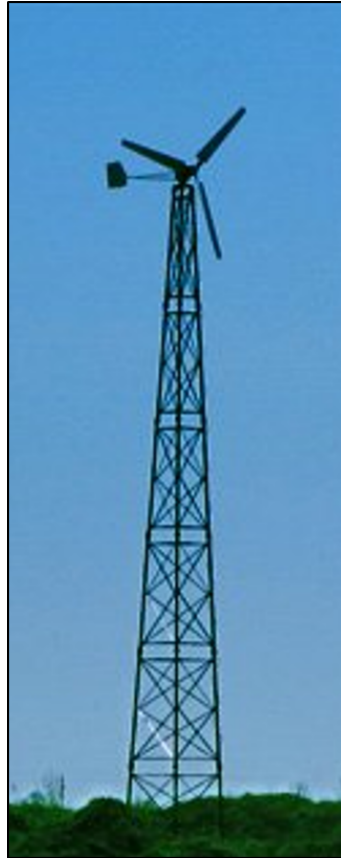


FIGURA 2.17: Torres de celosía.

2. **Torres acero tubulares:** Consisten en grandes tubos de acero de forma tubular o cónica que ofrecen en su interior espacio para los equipos de suelo y para el acceso a resguardo hacia la góndola. Necesitan de una instalación más laboriosa y costosa, pero ofrecen una mayor resistencia y menos mantenimiento necesario que las torres de celosía. Son las más empleadas en equipos de generación de energía.



FIGURA 2.18: Torres de acero tubulares.

3. **Torres de hormigón:** Las torres eólicas de hormigón (concreto) son una solución alternativa a las torres convencionales de acero que permite acceder a emplazamientos con mayores alturas, ahorrar costes en la construcción del parque y generar más empleo local durante su fabricación cerca del emplazamiento de la instalación eólica.



FIGURA 2.19: Torres de hormigón.

2.1.4 LA ENERGÍA EN EL VIENTO.

Un aerogenerador consigue su potencia de entrada convirtiendo la fuerza de la corriente del viento (fuerza de giro); actuando sobre las aspas del rotor. La cantidad de energía transferida al rotor por el viento depende de la densidad del aire, del área de barrido del rotor y de la velocidad del viento.

2.1.4.1 DENSIDAD DEL AIRE.

La energía cinética de un cuerpo en movimiento es proporcional a su masa. Así, la energía cinética del viento depende de la densidad del aire, es decir, de su masa por unidad de volumen. En otras palabras, cuanto "más pesado" sea el aire más energía recibirá la turbina.

La presión atmosférica normal y a 15°C el aire pesa unos 1,225 kilogramos por metro cúbico ($1,225\text{kg}/\text{m}^3$), aunque la densidad disminuye ligeramente con el aumento de la humedad. Además, el aire es más denso cuando hace frío, a diferencia de cuando hace calor. A grandes altitudes (en las montañas) la presión del aire es más baja y el aire es menos denso.

2.1.4.2 ÁREA DE BARRIDO DEL ROTOR.

Un aerogenerador típico de 600kW tiene un diámetro del rotor de 43-44 metros, lo que supone un área del rotor de unos 1,500 metros cuadrados. El área del rotor determina cuánta energía del viento es capaz de captar una turbina eólica. Dado que el área del rotor aumenta con el cuadrado del diámetro de rotor, una turbina que sea dos veces más grande recibirá cuatro veces más energía.

En realidad, un aerogenerador desviará el viento antes incluso de que el viento llegue al plano del rotor. Esto significa que nunca seremos capaces de capturar toda

la energía que hay en el viento utilizando un aerogenerador.

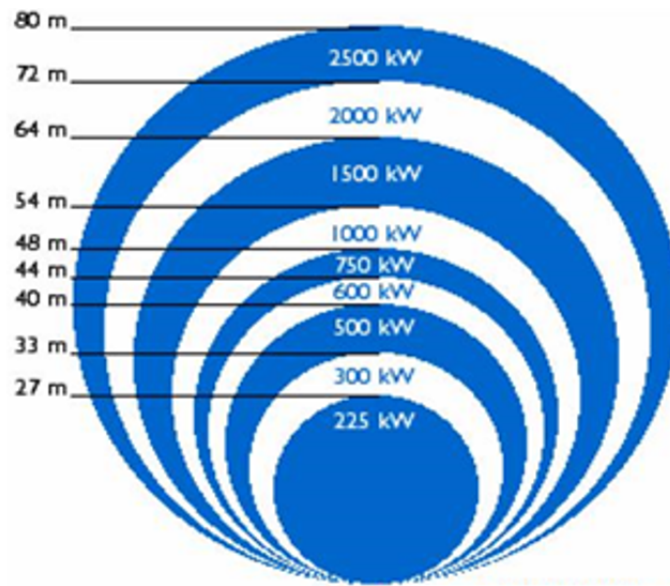


FIGURA 2.20: Potencias según los diferentes diámetros. (www.windpower.org)

2.1.4.3 EL TUBO DE CORRIENTE.

El rotor de la turbina eólica frena el viento cuando captura su energía cinética y la convierte en energía rotacional. Esto implica que el viento se moverá más lentamente en la parte izquierda del rotor que en la parte derecha.

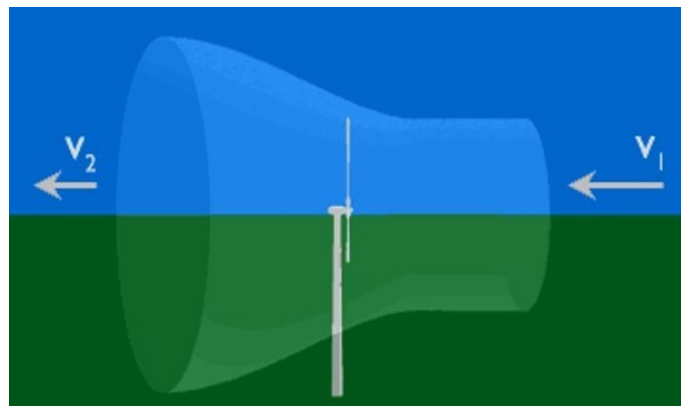


FIGURA 2.21: Captura de energía cinética que posee el viento. (www.windpower.org)

Dado que la cantidad de aire que pasa a través del área barrida por el rotor desde la derecha (por segundo); debe ser igual a la que abandona el área del rotor por la izquierda, el aire ocupará una mayor sección transversal (diámetro) detrás del plano del rotor.

Este efecto puede, apreciarse en la imagen superior, donde se muestra un tubo imaginario, el llamado tubo de corriente, alrededor del rotor de la turbina eólica. El tubo de corriente muestra cómo el viento moviéndose lentamente hacia la izquierda ocupará un gran volumen en la parte posterior del rotor. La ralentización de la velocidad del viento se producirá gradualmente en la parte posterior del rotor hasta que llegue a ser prácticamente constante.

2.1.4.4 LA POTENCIA DEL VIENTO.

La velocidad del viento es muy importante para la cantidad de energía que un aerogenerador puede transformar en electricidad: la cantidad de energía que posee el viento varía con el cubo de la velocidad del viento media; p.ej., si la velocidad del viento se duplica la cantidad de energía que contenga será $2^3 = 8$ veces mayor.

La energía cinética de una masa de aire m moviéndose a una velocidad v responde a la ecuación (2.1):

$$E_c = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (2.1)$$

Si el *volumen* de aire que se mueve es V y tiene una densidad D , entonces su masa será $m = VD$, con lo que su energía cinética será (2.2):

$$E_c = \frac{V \cdot D \cdot v^2}{2} \quad (2.2)$$

La cantidad de aire que llegará al rotor de un aerogenerador en un tiempo t

dependerá del área de barrido del rotor A y de la velocidad del viento. El volumen del aire que llega al rotor será (2.3):

$$V = A \cdot v \cdot t \quad (2.3)$$

La energía cinética que aporta el aire al rotor en un tiempo t será (2.4):

$$E_c = \frac{A \cdot D \cdot v^3 \cdot t}{2} \quad (2.4)$$

La cantidad de aire que pasa es elevada, no se trabaja con energía (tendríamos cifras enormes), sino con la potencia, y los cálculos se realizan por unidad de tiempo, así que la potencia por unidad de tiempo aportada al rotor será:(2.5):

$$P = \frac{E_c}{t} = \frac{\frac{A \cdot D \cdot v^3 \cdot t}{2}}{t} = \frac{A \cdot D \cdot v^3 \cdot t}{2 \cdot t} = \frac{A \cdot D \cdot v^3}{2} \quad (2.5)$$

Al graficar $P = \frac{A \cdot D \cdot v^3}{2}$, dándole un valor de $A = 1m^2$ y $D = 1,225kg/m^3$ y hacemos variar a v obtenemos la siguiente tabla con su respectiva gráfica.

v	$P = \frac{1 \cdot 1,225 \cdot v^3}{2}$
0	0
8	313.6
16	2508.8
30	16537.5
80	313600
120	1.0584×10^6

TABLA 2.2: Valores de la ecuación de potencia del viento.

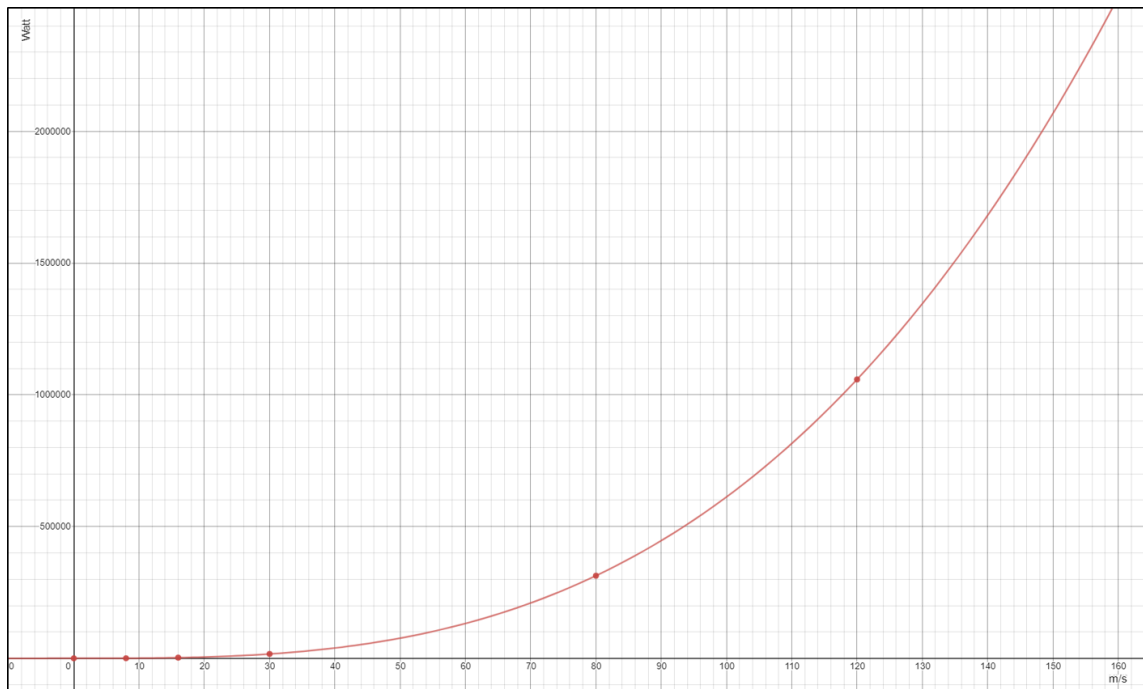


FIGURA 2.22: Potencia del viento en función de la velocidad.

La figura (2.22) muestra que con una velocidad del viento de 8 metros por segundo obtenemos una potencia (cantidad de energía por segundo) de $314W$ por cada metro cuadrado expuesto al viento (viento incidiendo perpendicularmente al área barrida por el rotor). A 16 m/s obtendremos una potencia ocho veces mayor, esto es, $2509W$.

Anteriormente se ha manifestado que el aerogenerador ralentiza el viento al pasar por el rotor, lo que significa que no se aprovecha toda la energía cinética que el viento aporta al rotor. La Ley de Betz ⁶. afirma que sólo puede convertirse menos de $16/27$ (el 59.25 %) de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenera-

⁶La ley de Betz indica la potencia máxima que puede extraída del viento, independientemente del diseño de una turbina eólica en flujo abierto. Esta ley fue publicada en 1919 por el físico alemán Albert Betz. La ley se deriva de los principios de conservación de la masa y el impulso de la corriente de aire que fluye a través de un disco actuador idealizado que extrae energía de la corriente del viento. Según la ley de Betz, ninguna turbina puede capturar más del $16/27$ (59,25 %) de la energía cinética en el viento.

dor, aunque en la práctica la potencia máxima alcanzada por los aerogeneradores ha sobrepasado el 60 % o 70 % de la potencia máxima calculada según esta ley, así que replanteando la Ecuación 2.5. con la ley de Betz tendríamos la siguiente ecuación.

$$P = \frac{16}{27} \cdot \left(\frac{A \cdot D \cdot v^3}{2} \right) = \frac{8 \cdot A \cdot D \cdot v^3}{27} \quad (2.6)$$

Al realizar una gráfica 2.23 de la Ecuación 2.5 y la Ecuación 2.6 en un mismo plano cartesiano obtenemos lo siguiente:

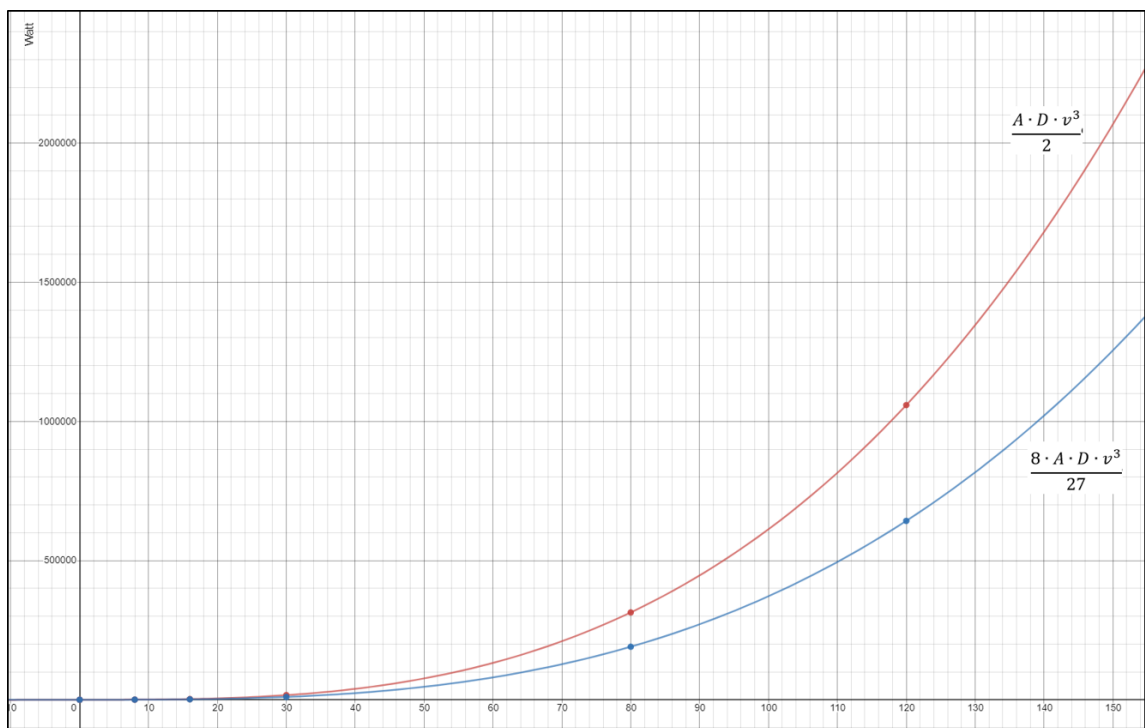


FIGURA 2.23: potencia de viento VS potencia de viento con Ley de Betz.

2.1.4.5 MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO: ANEMÓMETROS.

Las mediciones de las velocidades del viento se realizan normalmente usando un anemómetro de cazoletas. Este cuenta con un eje vertical y tres cazoletas que

capturan el viento; el número de revoluciones por segundo es registrado electrónicamente.

Los datos de las velocidades y direcciones del viento obtenidos por el anemómetro son recogidos en un chip electrónico en una pequeña computadora, el registrador de datos ('data logger'), que puede funcionar con batería durante un largo período de tiempo. Se calculan las velocidades medias del viento para intervalos de 10 minutos de modo que la medición sea compatible con la mayoría de programas estándar; los resultados en las velocidades del viento son diferentes si se utilizan en diferentes periodos de tiempo para calcular las medias.



FIGURA 2.24: Anemómetros.

La escala Beaufort, también llamada, escala de Beaufort ⁷ de la fuerza de los vientos, es una escala empírica. Está relacionada con el estado del mar, respecto a la altura de sus olas y a la fuerza del viento. La razón de que es empírica, por la experiencia, es que en un principio no contó con las velocidades de los vientos. Sino que detallaba en una escala de 0 a 12. A partir de 1850, fue adaptada para un uso no sólo naval. Junto a las rotaciones de un anemómetro para medir la velocidad del viento, se trasladaron estas mediciones respecto a lo descrito en la escala. En 1906,

⁷Su nombre deriva de su inventor, Sir Francis Beaufort.

el meteorólogo George Simpson, agrego además descripciones para sus efectos en tierra. Fue propiciado en cierto modo con la llegada de las máquinas de vapor.⁸

Escala	Fuerza	Velocidad del viento		Nudos (millas náuticas/h)	Aspecto del mar	Efectos en la Tierra
		(m/s)	(Km/h)			
0	Calma	0 a 0.2	0 a 1	menos de 1	Calmado.	Total calma, no se mueven hojas de árboles, el humo asciende de forma vertical.
1	Aire ligero (ventolina)	0,3 a 1,5	2 a 5	1 a 3	Olas pequeñas, no se genera espuma.	Ligero movimiento de hojas, el humo indica la dirección que lleva el viento.
2	Brisa Ligera (flojito)	1,6 a 3,3	6 a 11	4 a 6	Crestas de las olas un poco más altas, pero sin llegar a romper.	Hojas de los árboles pueden caerse, los molinos de los campos empiezan a moverse.
3	Brisa suave (flojo)	3,4 a 5,4	12 a 19	7 a 10	Olas pequeñas y crestas que ya se rompen.	Hojas agitándose, las banderas ondulan.
4	Brisa moderada (bonancible)	5.5 a 7.9	20 a 28	11 a 16	Olas más largas con crestas, numerosos borreguillos.	banderas totalmente extendidas. Suave movimiento de las ramas de los árboles y agitación de sus copas.
5	Brisa moderada (fresquito)	8 a 10.7	29 a 38	17 a 21	Olas medianas y alargadas moderadas. Borreguillos muy abundantes.	La superficie de los lagos se ondula, pequeños movimientos de los árboles. Banderas extendidas y con sacudidas.
6	Brisa fuerte (fresco)	10.8 a 13.8	39 a 49	22 a 27	Se empiezan a formar olas grandes, con crestas rompientes y espuma.	Movimientos más bruscos de las ramas de los árboles. Podemos encontrar dificultad en mantener abierto el paraguas.
7	Viento fuerte (frescachón)	13.9 a 17.1	50 a 61	28 a 33	Mar gruesa, picada, con espuma arrastrada en dirección del viento.	Los árboles grandes se mueven y ladean, dificultad para caminar contra el viento.
8	Viento duro (temporal)	17.2 a 20.7	62 a 74	34 a 40	Grandes olas rompientes, espuma sobre la superficie.	Ramas y copas de los árboles se rompen, se dificulta mucho caminar, los vehículos menos pesados pueden moverse por sí mismos.
9	Viento muy duro (temporal fuerte)	20.8 a 24.4	75 a 88	41 a 47	Olas muy grandes y rompientes, visualización dificultosa.	Las ramas de los árboles se desprenden de ellos, tejados de construcciones débiles pueden ser desprendidos. Vehículos pueden ser arrastrados y es imposible caminar con normalidad.
10	Temporal duro (temporal)	24.5 a 28.4	89 a 102	48 a 55	La superficie del mar ya es blanca. El oleaje es muy grueso.	Árboles arrancados de raíz, daños en estructuras de edificios, y grandes daños en cosas que están en la intemperie.
11	Temporal muy muro (Borrasca)	28.5 a 32.6	103 a 117	56 a 63	Olas excepcionalmente grandes, mar completamente blanco, visibilidad casi nula.	Daños por todas partes, lluvias muy intensas, grandes inundaciones. Pueden salir arrastradas por el viento las personas y muchos otros objetos volando.
12	Temporal huracanado (Huracán)	32.8 a más	118 a más	64 a más	Olas excepcionalmente gigantescas, visibilidad completamente nula.	Personas pueden salir volado, vehículos, árboles, casas más débiles, techos, destrucción total.

TABLA 2.3: Escala de Beaufort.

Sin embargo, en 1996 el ingeniero civil Herbert Saffir y el director del centro nacional de huracanes desarrolla Robert Simpson, desarrollaron una escala que clasifica los ciclones tropicales según la intensidad del viento, conocida como la escala Saffir-Simpson.(huracanes.fiu.edu)

⁸<https://www.meteorologiaenred.com/escala-beaufort.html>

Categoría	Velocidad del viento		Marea	Presión atmosférica	Nivel de daños
	(m/s)	(Km/h)			
Depresión tropical	0 a 17	0 a 62	0 m	>980 hPa	Lluvias que pueden llegar a causar graves daños e incluso inundaciones.
Tormenta tropical	18 a 32	63 a 118	0 a 3 m	>980 hPa	Lluvias abundantes que pueden provocar inundaciones devastadoras. Vientos fuertes que pueden generar tornados.
Cuando la intensidad de un ciclón tropical supera la clasificación de Tormenta tropical, se convierte en un huracán.					
Categoría 1	33 a 42	119 a 153	1.2 a 1.5 m	980-994 hPa	Sin daños en las estructuras de los edificios. Daños básicamente en casas flotantes no amarradas, arbustos y árboles. Inundaciones en zonas costeras y daños de poco alcance en puertos.
Categoría 2	43 a 49	154 a 177	1.8 a 2.4 m	965 – 979 hPa	Daños en tejados, puertas y ventanas. Importantes daños en la vegetación, casas móviles, etc. Inundaciones en puertos, así como ruptura de pequeños amarres.
Categoría 3	50 a 58	178 a 209	2.7 a 3.7 m	945 – 964 hPa	Daños estructurales en edificios pequeños. Destrucción de casas móviles. Las inundaciones destruyen edificaciones pequeñas en zonas costeras y objetos a la deriva pueden causar daños en edificios mayores. Posibilidad de inundaciones tierra adentro.
Categoría 4	59 a 69	210 a 251	4 a 5.5 m	920 – 944 hPa	Daños generalizados en estructuras protectoras, desplome de tejados en edificios pequeños. Alta erosión de bancales y playas. Inundaciones en terrenos interiores.
Categoría 5	70 o más	252 o más	5.5 m o más	<920 hPa	Destrucción completa de tejados en algunos edificios. Las inundaciones pueden llegar a las plantas bajas de los edificios cercanos a la costa. Puede ser requerida la evacuación masiva de áreas residenciales. Los vientos de 300km/h pueden arrancar árboles y hasta casas de sus cimientos, huracán muy poderoso.

TABLA 2.4: Escala Saffir-Simpson

2.1.4.6 IEC 61400

La Comisión Internacional de Electrotecnia (IEC por sus siglas en inglés) es una organización a nivel global cuyo objetivo es la estandarización en materia concerniente a la electrónica y la electricidad. A través de publicaciones se encarga de transmitir recomendaciones para uso internacional, las cuales son aceptadas por los Comités Nacionales de la IEC, pero esta no se hace responsable de material defectuoso o dañado que haya estado conforme con dichas publicaciones; ni si alguno de los elementos de la publicación está protegido por patentes. Esta norma remarca los requerimientos mínimos de diseño para asegurar la integridad ingenieril de los aerogeneradores durante su vida útil planificada, no debiéndose aplicar como un manual de instrucciones, por lo que deja en manos de los fabricantes la posibilidad de alterarlos si se puede demostrar que la seguridad no se vea comprometida. Las turbinas

eólicas están diseñadas para condiciones específicas; durante la fase de construcción y diseño, se hacen suposiciones sobre el clima eólico al que estarán expuestas las turbinas. La clase de viento de turbina es solo uno de los factores que deben considerarse durante el complejo proceso de planificación de una planta de energía eólica. Las diferentes clases son definidas de acuerdo a la velocidad del viento o a los parámetros de turbulencia, siendo por tanto dependientes de la localización del aerogenerador. Cada clase abarca un amplio rango de posibles lugares en los que se pueda instalar; la tabla muestra dicha clasificación, de acuerdo con los parámetros básicos especificados, que son de aplicación a la altura del buje⁹. En ningún caso las categorías I, II y III están destinadas a cubrir condiciones extremas como huracanes, tifones o ciclones. (Internacional, 2019)

Clase de viento	I	II	III	S
$V_{ref}(m/s)$	50	42,5	37,5	Valores especificados por el diseñador.
A I_{ref}	0,16			
B I_{ref}	0,14			
C I_{ref}	0,12			

TABLA 2.5: Clasificación de vientos.

Los parámetros vistos en la Tabla 2.5 son:

- V_{ref} es la velocidad de referencia del viento a la altura del buje promediado en un periodo de 10 minutos.
- I_{ref} es el valor esperado de intensidad de turbulencia a la altura del buje en un periodo de 10 minutos para una velocidad promedio del viento de 15m/s.
- A es la categoría para características de turbulencia alta.
- B es la categoría para características de turbulencia media.

⁹Altura del centro del rotor de la turbina eólica con relación al suelo. Para las turbinas eólicas de eje vertical la altura del buje es la altura del plano ecuatorial.

- C es la categoría para características de turbulencia baja.
- Las clases desde la I hasta la III; la vida útil de diseño debe ser de al menos 20 años.

2.1.4.7 AEROGENERADORES OFFSHORE

Las empresas que ofrecen sus aerogeneradores; deben brindar información mínima sobre sus características y prestaciones ya sea a través de folletos o en sus páginas web, sin embargo, no todos los datos son publicados, dejando otros más específicos fuera del alcance de cualquier competidor, puesto que algunos de ellos son de carácter privado y muy valiosos para algunas empresas.

En la Tabla 2.6 se muestran los datos recogidos de diversas empresas acerca de los aerogeneradores de diferentes potencias.

Compañía	Referencia	Potencia Nominal (MW)	Clases de viento	Velocidad (m/s)		Rotor		Longitud de la hélice (m)	Generador Frecuencia
				Min	Max	Diámetro (m)	Área de barrido (m ²)		
Siemens Gamesa	SG 2.1-114	2.1	IIA / IIIA / S	8.2	22	114	10207	57	50 Hz/60 Hz
	SG 2.2-122	2.2	III/S	8	22	122	11690	61	50 Hz/60 Hz
	SG 2.6-114	2.625	IA / IIA / S	8.8	22	114	10207	57	50 Hz/60 Hz
	SG 2.9-129	2.9	S	8.4	23	130	13273	65	60 Hz
	SG 3.4-132	3.465	IA / IIA	8.8	22	132	13685	66	50 Hz/60 Hz
	SG 5.0-132	5	IA	9.9	23	132	13685	66	50 Hz/60 Hz
	SG 5.0-145	5	IIIB	9.3	23	146	16742	73	50 Hz/60 Hz
	SG 5.8-155	5.8	Medios y altos	9.3	22	156	19113	78	50 Hz/60 Hz
	SG 5.8-170	5.8	Bajos y Medios	8.8	22	170	22698	85	50 Hz/60 Hz
	SWT-DD-120	3.9	IA / S / T	9.8	20	120	11310	60	50 Hz/60 Hz
	SWT-DD-130	3.9	IB / S / T	9.2	18	130	13273	65	50 Hz/60 Hz
	SWT-DD-142	3.5	IIIB	8.4	10	142	15837	71	50 Hz/60 Hz
	1.7-100	1.7	III	8.3	12	100	7854	50	50 Hz/60 Hz
	1.7-103	1.7	S	8.1	11	104	8495	52	50 Hz/60 Hz
General electric	1.85-82.5	1.85	II	9.8	14	82	5281	41	50 Hz/60 Hz
	1.85-87	1.85	S	9.4	13	88	6082	44	50 Hz/60 Hz
	2MW-116	2.7	IIS / IIIS	8.8	38	116	10568	58	50 Hz/60 Hz
	2MW-127	2.8	IIS / IIIS	8.4	40	128	12868	64	60 Hz
	2MW-132	2.7	S	8.1	35	132	13685	66	50 Hz
	4MW-158	4.8	S	8.7	37	158	19607	79	50 Hz/60 Hz
	5MW-158	5.3	S	9	37	158	19607	79	50 Hz/60 Hz
	S111	2.1	IIIA / S	8.3	30	112	9852	56	50 Hz/60 Hz
	S120	2.1	S	7.9	30	120	11310	60	50 Hz
	S128	2.7	S	8.2	30	130	13273	65	50 Hz/60 Hz
	V150-5.6MW	5.6	S	9.5	25	150	17671	75	50 Hz/60 Hz
	V162-5.6MW	5.6	S	9	25	162	20612	81	50 Hz/60 Hz
	V138-3.0MW	3	S	8.1	24	138	14957	69	50 Hz/60 Hz
	V90-2.0MW	2	IIA / S	9.5	23	90	6362	45	50 Hz/60 Hz
V100-2.0MW	2	IIIB	8.8	20	100	7854	50	50 Hz/60 Hz	
V100.1-2.0MW	2	IIIA	8.3	18	110	9503	55	50 Hz/60 Hz	
V116-2.1MW	2.1	IIIB	8.1	18	116	10568	58	50 Hz/60 Hz	
V120-2.2MW	2.2	IIIB / S	8.1	18	120	11310	60	50 Hz/60 Hz	
V105-3.45MW	3.45	IA	10.2	23	106	8825	53	50 Hz/60 Hz	
v112-3.45MW	3.45	IA	9.8	23	112	9852	56	50 Hz/60 Hz	
v117-3.45MW	3.45	IB / IIA	9.5	23	118	10936	59	50 Hz/60 Hz	
v117-4.2MW	4.2	IB / IIA / S	9.9	25	118	10936	59	50 Hz/60 Hz	
v126-3.45MW	3.45	IIIB / IIA	9.1	22.5	126	12469	63	50 Hz/60 Hz	
v136-3.45MW	3.45	IIIB / IIIA	8.6	22.5	136	14527	68	50 Hz/60 Hz	
v136-4.2MW	4.2	IIIB / S	9.2	25	136	14527	68	50 Hz/60 Hz	
v150-4.2MW	4.2	IIIB / S	8.6	22.5	150	17671	75	50 Hz/60 Hz	

TABLA 2.6: Características de los aerogeneradores

2.2 MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN

Desde el inicio de la revolución industrial, se ha manifestado un crecimiento del tamaño físico y su complejidad de las organizaciones en la parte administrativa, tales talleres artesanales que con el tiempo se convirtieron poco a poco en las corporaciones valoradas en millones de dólares, que sin duda alguna, a medida que estas empresas crecían implicaba una serie de retos para alcanzar sus metas, en algunos casos las empresas se diversificaban en un producto secundario al inicial, lo cual en muchas ocasiones lo que es mejor para un componente va en detrimento de otro, de forma que sus acciones pueden encaminar hacia objetivos opuestos. Un problema relacionado es que, en la medida que aumentan en la complejidad y la especialización, es más difícil asignar los recursos disponibles a las diversas actividades de la manera más eficaz para la organización, la necesidad de encontrar la forma adecuada de resolver este problema propició el surgimiento de la investigación de operaciones.

La raíz de la investigación de operaciones se encuentra rastreada aproximadamente desde el año 1564 cuando se hicieron los primeros intentos por emplear el método científico para administrar una empresa, en las publicaciones de (Gass Saul, 2005), (Assad Arjang A, 2011), (Saul, 2011) donde se describen una cantidad considerable de contribuciones que influyeron en el desarrollo subsiguiente de la investigación de operaciones. Sin embargo, se empieza hablar de investigación de operaciones a ciertos servicios militares que se prestaron al inicio de la Segunda Guerra Mundial; esto debido a que existía la urgente necesidad de asignar los limitados recursos que se disponían a las distintas maniobras militares y a las actividades que componían cada operación de la manera más eficaz. Por esta razón, los altos mandos militares estadounidenses y británicos llamaron a un gran número de científicos para que aplicaran el método científico a este y a otros problemas estratégicos y tácticos, en realidad se les solicitó que hicieran investigación de operaciones militares, estos grupos de científicos fueron los primeros equipos de investigación de operaciones. (Hillier Frederick, 2015)

Se identifica como el primer factor que propició el desarrollo de la investigación de operaciones; fue el ser aplicado en otros campos diferentes al bélico, en este caso en la explosión industrial posterior a la guerra. Muchas de las personas que trabajaron con o para los equipos de investigación de operaciones; notaron que muchos de los problemas eran en esencia los mismos que se enfrentaron en el ámbito militar, pero en un contexto diferente. Es así pues que en la década de los 50 se introdujo su uso en las organizaciones industriales, negocios y gobierno, desde aquel momento se han desarrollado diferentes métodos más rápidos y eficaces para resolver los problemas presentados en diferentes áreas, en la Tabla 2.7 (Hillier Frederick, 2015) se puede apreciar algunas de las compañías que han aplicado la investigación de operaciones.

Organización	Área de aplicación	Ahorros anuales
Continental Airlines	Reasignación de tripulaciones a vuelos cuando ocurren interrupciones en el itinerario.	\$ 40 millones
Swift & Company	Mejora del desempeño en ventas y manufactura.	\$12 millones
INDEVAL	Instauración de todas las transacciones de valores en México.	\$150 Millones
Samsung Electronics	Reducción de tiempos de manufactura y niveles de inventario.	Ganancias adicionales de \$200 millones
Hewlett-Packard	Gestión del portafolio de productos.	\$180 millones
Sears	Rutas y optimización de vehículos para servicios y entregas a domicilio.	\$42 millones
Deere & Company	Administración de canales de distribución de revistas.	Reducción de \$1000 millones en inventario.

TABLA 2.7: Aplicación de la investigación de operaciones.

Un segundo factor que dio un gran impulso al desarrollo de este campo; fue la revolución de las computadoras. El manejo eficaz de los complejos problemas inherentes a la investigación de operaciones; casi siempre requiere un gran número de cálculos, en la década de los 80; con el desarrollo de computadores personales cada vez más veloces y con software adecuados para resolver problemas de este tipo; estuvieron al alcance de muchas más personas, teniendo un avance continuo hasta la fecha.

2.2.1 FUNDAMENTOS PRELIMINARES.

La localización de raíces y la optimización están relacionadas; en el sentido de que ambas involucran valores iniciales y la búsqueda de un punto en una función, la localización de raíces es la búsqueda de los ceros de una función o funciones. Por el contrario, la optimización es la búsqueda ya sea de un mínimo o del máximo.

El óptimo es el punto donde la curva es plana. En términos matemáticos, esto corresponde al valor de x donde la derivada de $f'(x)$ es igual a cero. Además, la segunda derivada, $f''(x)$, indica si es óptimo en un mínimo o un máximo:

- Si $f''(x) < 0$ es un punto máximo.
- Si $f''(x) > 0$ es un punto mínimo.

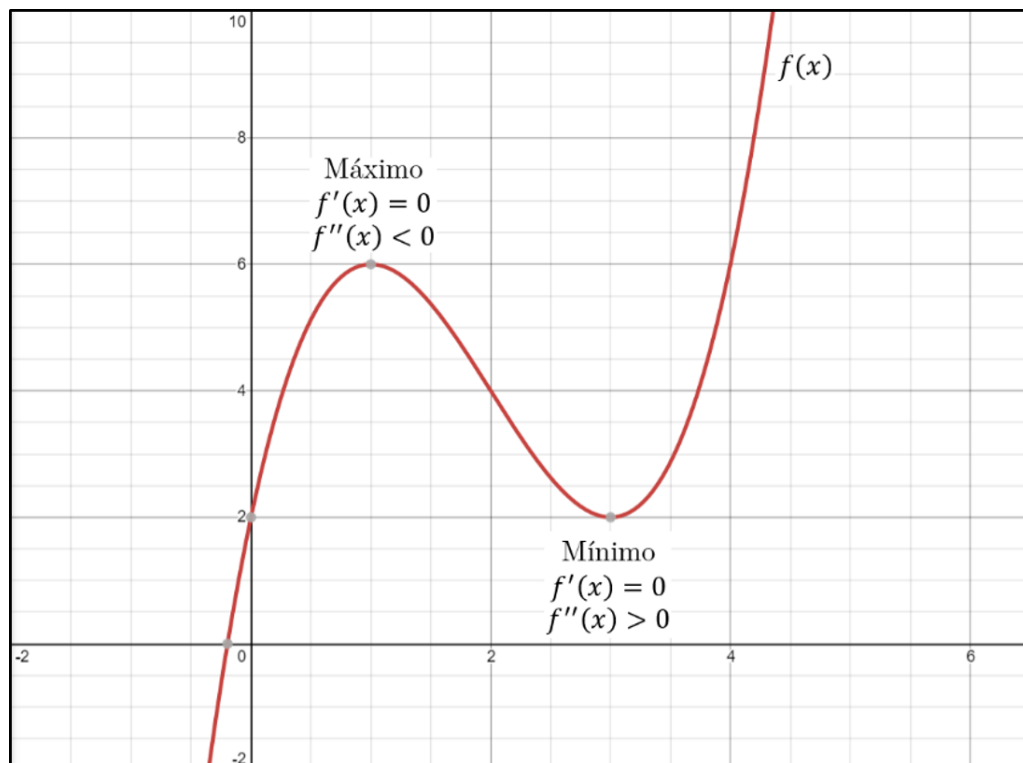


FIGURA 2.25: Función de máximo y mínimos.

Si comprendemos la relación entre las raíces y el óptimo; es posible sugerir

una estrategia para determinar este último, derivar a la función y localizar la raíz (el cero) de la nueva función. En efecto, algunos métodos de optimización tratan de encontrar un óptimo resolviendo el problema de encontrar la raíz $f'(x) = 0$, pero en algunas ocasiones tales búsquedas se complican debido a que no se puede obtener de manera analítica, por lo tanto, es necesario usar aproximaciones por diferencias infinitas para estimar la derivada.

Los métodos de cálculo diferencial aún se utilizan para determinar soluciones óptimas, Bernoulli, Euler, Lagrange y otros establecieron los fundamentos del cálculo de variaciones; el cual trata con la minimización de funciones, el primer gran avance de importancia en los procedimientos numéricos que sucedió con el desarrollo de las computadoras digitales, Koopmans. En el reino unido y Kantorovich, en la ex Unión Soviética, trabajaron en forma independiente sobre el problema general de distribución a bajo costo de artículos y productos. En 1947, un ex alumno de Koopman, Dantzig, inventó el **método simplex** para resolver **problemas de programación lineal**, este método abrió el camino a otros investigadores en la creación de otros métodos de optimización con restricciones. (Chapra Steven, 2015)

2.2.2 PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA U OPTIMIZACIÓN.

Un problema de programación matemática y optimización generalmente se puede establecer como:

Determine x , que minimiza o maximiza $f(x)$

sujeito a:

$$d_i(x) \leq a_i \quad i=1,2,\dots,n$$

$$e_i(x) = b_i \quad i=1,2,\dots,m$$

Donde:

- x es un vector de diseño n -dimensional.
- $f(x)$ es la función objetivo.
- $d_i(x)$ son las restricciones de desigualdad.
- $e_i(x)$ son las restricciones de igualdad.
- a_i y b_i son constantes.

Los problemas de optimización se clasifican según la forma de $f(x)$:

- Si $f(x)$ y las restricciones son lineales, tenemos un problema de programación lineal.
- Si $f(x)$ es cuadrática y las restricciones son lineales, tenemos un problema de programación cuadrática.
- Si $f(x)$ no es lineal ni cuadrática y/o las restricciones no son lineales, tenemos un problema de programación no lineal.

Cuando se incluye las restricciones; se tiene un problema de optimización con restricciones, de otra forma se trataría de un problema de optimización sin restricciones. Otra forma de clasificar los problemas de optimización es según su dimensionalidad. En general se dividen en:

1. **Unidimensional:** involucran funciones que dependen de una sola variable independiente.
2. **Multidimensional:** involucran funciones que dependen de dos o más variables independientes.

2.2.3 PROGRAMACIÓN LINEAL.

La programación lineal o PL por simplicidad, es un método de optimización que se ocupa del cumplimiento de un determinado objetivo; como maximizar las utilidades o minimizar el costo, en presencia de restricciones como recursos limitados. El termino lineal denota que las funciones matemáticas que representan el objetivo y las restricciones son lineales. El termino programación, en este caso no se refiere a términos computacionales; en esencia es sinónimo de planeación. Por lo tanto, la programación lineal involucra la planeación de actividades para obtener un resultado óptimo; esto es, el óptimo resultado con el mejor alcance de la meta especificada; teniendo en cuenta el modelo matemático entre todas las alternativas posibles. (Revelle Charles, 1997)

Aunque la asignación de recursos a las actividades es la aplicación más frecuente, la programación lineal tiene muchas otras posibilidades como las que se muestra en la Tabla 2.7; para la solución de este modelo se dispone de un método gráfico que no es muy recomendado cuando el número de variables es elevado, así como se dispone de un método muy eficiente llamado **método simplex** para problemas de gran tamaño, aun así, si se tiene un problema considerablemente grande; el cual no es soportado por el método simplex, se puede emplear el **algoritmo de punto interior**.

El problema básico de la programación lineal consiste en dos partes principales: la función objetivo y un conjunto de restricciones, la función objetivo puede ser maximizada o minimizada según la naturaleza del programa.

$$\text{Maximizar } Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots + c_nx_n \quad (2.7)$$

Donde c_j es la contribución de cada unidad de la j -ésima actividad realizada y x_j es la magnitud de la j -ésima actividad. Así, el valor de la función objetivo, z , es la contribución total debida al número total de actividades, z .

Las restricciones se presentan, en forma general como:

$$a_{j1}x_1 + a_{j2}x_2 + \cdots + a_{jn}x_n \leq b_i \quad (2.8)$$

Donde a_{ij} es la cantidad del i -ésimo recurso que se consume por cada unidad de la j -ésima actividad y b_i es la cantidad del i -ésimo recurso que está disponible. Es decir, los recursos son limitados.

El segundo tipo de general de restricción, especifica que todas las actividades deben de tener un valor positivo:

$$x_i \geq 0 \quad (2.9)$$

Esto es debido a que en algunos problemas valores negativos son físicamente imposibles, por ejemplo, no se puede producir de manera negativa 5 sillas.

Al juntar la función objetivo y las restricciones; forman el modelo de programación lineal, para nuestro contexto estas indican que se trata de maximizar la contribución de varias actividades, bajo la restricción de que estas actividades se utilizan cantidades finitas de recursos.

Este modelo puede ser visto de forma de tabla como se muestra a continuación:

Recursos	Consumo de recursos por unidad de actividad				Cantidad de recursos disponibles
	Actividad				
	1	2	...	n	
1	a_{11}	a_{12}	...	a_{1n}	b_1
2	a_{21}	a_{22}	...	a_{2n}	b_2
...
m	a_{m1}	a_{m2}	...	a_{mn}	b_m
Contribución a Z por unidad de actividad	c_1	c_2	...	c_n	

TABLA 2.8: Datos necesarios para elaborar un modelo de programación lineal.

2.3 BIG DATA

El término “Big Data” nace en el año 2000 por el profesor Francis Diebold de la Universidad de Pensilvania al ser enunciado en su artículo publicado en el 2003 titulado “Big Data Dynamic Factor Models for Macroeconomic Measurement and Forecasting”, no obstante, el concepto es claramente anterior Diebold (2012) desde las psichistorias del Profesor Hari Seldon en la Saga de Fundación de Isaac Assimov; basadas en la predicción del futuro a través del uso de grandes volúmenes de datos del pasado, a las propuestas que sobre el uso masivo de datos se realizaban en los años 50 en distintas administraciones y que con la expansión de las tecnologías tienen su primera expresión como tal en los desarrollos de John Mashe un científico de computadores que trabajaba para una agencia grafica de Syllicon Valley en los años 90 y el cual utiliza el concepto similar al “big data” para referir por primera vez a los volúmenes de información que guardaba en sus computadores; término con el que expresaba su preocupación por que cada vez llegaba más información digital que no sabía cómo se iba a guardar, y sobre todo, de qué iba a servir, así mismo del amplio grupo de desarrollo de bases de datos, gestión de los mismo, funcionamiento de algoritmos, etc. Lohr (2013b)

Si hay un consenso aceptable en la literatura sobre el origen del concepto y del nombre, no lo hay sobre una definición sobre qué es Big Data, su pertenencia al Data Science se está constituido por diferentes terminologías como Cloud computing, datawarehouse, machine learning, sin embargo apoyándonos en los autores como a Chalmers *et al.* (2013) MacAfee (2012) Morabito (2015)Pospiech y Felden (2012) podemos sintetizar una definición derivada de sus características, que son las denominadas cuatro Vs: **Volumen**, **Velocidad**, **Variedad** y **Veracidad** que podemos caracterizar de la siguiente forma:

1. **Volumen**: se refiere fundamentalmente al uso masivo de datos que se almacenan y que se utilizan en las bases de datos, con la nueva aparición de tecnologías

emergentes como lo es el Cloud computing, el denominado IoT¹⁰ permitiendo que se vaya generando una creciente cantidad de datos relativos al comportamiento de los individuos lo que permite ofrecer servicios hasta ahora impensables para los ciudadanos. Otras tecnologías necesarias como MapReduce¹¹ o los lenguajes o sistemas de programación como Hadoop¹², R, SPSS¹³ que son empleados en estos ámbitos han florecido por la necesidad de utilizar recursos que permitan su análisis de forma sostenible y económicamente viable Dong y Srivastava (2013), como es de esperarse, esta primera característica es sin duda la parte más relevante del Data Science Amir y Murtaza (2015).

2. **Variabilidad:** Consiste en la forma de obtener los datos a través de diferentes fuentes de datos. Por lo tanto, conviven las bases de datos estructuradas, es decir, aquellos datos que se conforman tradicionalmente con formatos claros que responden a una visión clásica de la estructura de datos, con las no estructuradas, que al contrario de las anteriores no tienen formatos bien definidos hasta que no se vinculen con otros datos. Este es el caso, por ejemplo, de los datos extraídos de las opiniones y recomendaciones de internet, de la información que almacenan nuestros móviles sobre desplazamientos, etc. Demchenko *et al.* (2014)
3. **Velocidad:** teniendo en cuenta que los usuarios que estamos acostumbrados a obtener resultados de casi que de manera instantánea o en un tiempo prudente, si manejamos las herramientas tradicionales con los grandes volúmenes de datos

¹⁰Internet of Things: internet de las cosas.

¹¹MapReduce es un modelo de programación para dar soporte a la computación paralela sobre grandes colecciones de datos en grupos de computadoras.

¹²Apache Hadoop es un framework de software que soporta aplicaciones distribuidas bajo una licencia libre, permite a las aplicaciones trabajar con miles de nodos y petabytes de datos. Hadoop se inspiró en los documentos Google para MapReduce y Google File System (GFS).

¹³Statistical Package for the Social Sciences: programa estadístico informático muy usado en las ciencias sociales y aplicadas, además de las empresas de investigación de mercado teniendo en cuenta su capacidad para trabajar con grandes bases de datos y una sencilla interfaz para la mayoría de los análisis.

estas simplemente quedarían cortas ante nuestras peticiones, los usuarios cada vez aprecian más la comodidad de disponer de los efectos del Big Data y los servicios que pueden obtener instantáneamente de los mismos, es decir, para que los análisis y/o resultados nos sean relevantes deben realizarse lo más rápido o en lo posible en tiempo real para situaciones donde el tiempo es crucial.

4. **Veracidad:** los datos deben ser creíbles, de fácil acceso y verificables, como lo indica Jin *et al.* (2014). Sin embargo, con un mayor volumen de datos es también más difícil separar los datos verdaderos de los falsos. A esto se añaden los problemas derivados del uso de los datos, su almacenamiento y la posibilidad del control del individuo al que se refieren los mismos, conviene señalar que, aunque no sea objeto de nuestro estudio en esta tesis, este control de los datos del individuo actualmente tiene un importante reflejo en las preocupaciones de la sociedad, lo cual los datos recolectados deben ser por la vía legal según las leyes que haya en cada país Chatterjee (2013) y Lohr (2013a).

Además de las características anteriores, una de las definiciones más citadas en la literatura es la de Microsoft (2012) que define Big Data como “...el término cada vez más empleado para describir el proceso de utilizar una elevada capacidad de procesamiento -lo último en aprendizaje automático (machine learning) e inteligencia artificial – a conjuntos de información masiva generalmente muy compleja”.

2.3.1 EL FENÓMENO BIG DATA

El fenómeno Big Data consiste en la extraordinaria expansión del flujo de datos por todo el mundo, lo cual surge gracias al desarrollo de tecnologías capaces de capturar, procesar y distribuir información digital generada de manera descentralizada. Vivimos ya en un mundo en el que se emiten más de doscientos millones de emails, trescientos mil tweets, doscientas mil fotos o ciento veinte horas de vídeo

Marr (2015) al minuto. Esta rápida expansión de los datos y de nuestra capacidad para explotarlos mediante algoritmos de aprendizaje automático está propiciando el desarrollo acelerado de la Inteligencia Artificial, situación que está desembocando en el aumento de agentes generadores de datos y, con ello, del Big Data.

En las redes sociales entre las que destacan actualmente LinkedIn, Facebook, Twitter, Instagram, etc., además del hoy popular sistema de mensajería WhatsApp, aportan nuevos canales de comunicación interpersonal, permitiéndonos establecer puntos de contacto (touchpoints); tanto con personas de nuestro entorno como con otras que desaparecieron de él o incluso generar nuevas conexiones con otras personas que no conocíamos previamente. De este modo, los Social Media abren nuevas vías para la evolución de las relaciones sociales, pudiendo servir para facilitar el acercamiento y mejorar la comprensión mutua entre seres humanos.

Actualmente los Big Data pueden ayudar a responder cuestiones clave acerca de cómo se comportan los clientes, cómo van a funcionar los nuevos lanzamientos, las futuras campañas o las posibles promociones. Esto contribuye a realizar mejoras en los negocios mediante el marketing personalizado (one-to-one), las estrategias de competencia, etc. Por este motivo, Schmarzo (2013) manifiesta que los Big Data, más que tratar sobre datos, tratan “sobre la transformación empresarial, sobre pasar del planteamiento retrospectivo de la monitorización y el procesamiento de datos por lotes a la obtención de conocimientos empresariales en tiempo real”.

El Internet de las Cosas (IoT) abre la posibilidad de que todo tipo de dispositivos puedan estar interconectados en red, compartiendo señales e instrucciones de operación (M2M – Machine to Machine). Esta comunicación entre dispositivos es crucial para construir sistemas inteligentes, ya que todo el flujo de Big Data transferido entre ellos en tiempo real posibilita el desarrollo de algoritmos de Machine Learning que, partiendo de datos captados por algunos de ellos (sensores), infieren patrones de comportamiento y optimizan coordinadamente la operativa del sistema. Gartner (2017)

La Era del Big Data permite que múltiples dispositivos equipados con sensores/emisores se conecten a Internet u otras redes digitales para verter datos en tiempo real. Estos datos resultarán posteriormente muy valiosos para desarrollar mecanismos interconectados reactivos e inteligentes. Por ejemplo:

- **Smart Buildings / Spaces:** existen un conjunto de dispositivos inteligentes con los que se trata de mejorar el confort y los servicios de un hogar, punto de venta o espacio público en general. A través de estos sistemas se generan Big Data que hacen posible controlar mediante algoritmos desde la climatización hasta la seguridad, identificando a los individuos mediante identificación cognitiva y biométrica. Se trata de algoritmos capaces no sólo de interactuar por la voz o de reconocer textos, sino también de identificar rasgos faciales, el timbre de voz, el modo de caminar, la dinámica de tecleo, etc.
- **Smart (Connected) Health/Care,** que permite tomar datos sobre el estado de un paciente que requiere de continua supervisión para asegurar que no se presenten anomalías en los latidos de su corazón, en su presión sanguínea, en su respiración, en sus patrones de sueño, etc. Este tipo de dispositivos, generalmente “wearables” (o “embeddables” insertos en el cuerpo), permiten controlar de forma eficiente la evolución en tiempo real de la salud del paciente y enviar en tiempo real anomalías en su estado que pudieran requerir de análisis profesional inmediato.
- **Vehículos inteligentes,** sirviendo de asistencia a la conducción, realizando un continuo mantenimiento preventivo, incentivando la conducción prudente mediante seguros basados en uso o ayudando a reaccionar en milisegundos a potenciales accidentes, todo ello en base al aprendizaje automático a partir de datos de conducción procedentes de señales IoT del vehículo.
- **Smart Grids** para el caso de las líneas eléctricas: lo que permite optimizar el funcionamiento del sistema y que sean los propios usuarios quienes, a través de incentivos de mercado, se coordinen para estabilizar el sistema.

- **Las Smart Cities**, soportadas por arquitecturas “cloud” o “fog” (de ámbito más local), se están convirtiendo en una auténtica revolución, haciendo posibles multitud de proyectos orientados a mejorar el bienestar de los ciudadanos de forma coordinada: sistemas de parking inteligente para encontrar más fácilmente las plazas de aparcamiento, sistemas de gestión energética en edificios mediante sensores de luminosidad o flujos de temperatura, sistemas de control de las tareas de limpieza en función al tráfico, etc.
- **Smart Agriculture:** para sustituir el duro y tedioso trabajo en el campo por sistemas predictivos que supervisen la evolución de los cultivos combinando predicciones meteorológicas con la gestión del riego (combinándose también con sistemas de Smart Water), etc.

La combinación entre la potencia que se puede obtener con el Big Data y los diferentes problemas que se presentan en la vida cotidiana, en grandes negocios o problemas científicos es lo que la hace tan llamativa la aplicación para encontrar posibles soluciones en cualquier ámbito, al combinar las técnicas que implementa un Data Scientist y la problemática de la generación de energía actual nos da a suponer que se puede implementar el Big Data en la generación de energía por medio de fuentes eólicas.

En un parque eólico, se podrían procesar de manera automática las señales emitidas por cada aerogenerador en un lapso de tiempo de unos cuantos minutos, contrastándola con las señales de velocidad de rotación de las aspas, temperatura o presión de algún otro mecanismo, etc. gracias a estos sensores, podremos obtener un Big Data útiles para optimizar la operativa del sistema, por ejemplo:

- Orientar las palas en función a la dirección del viento (captada por otro sensor).
- Variar la potencia generada en caso de saturación mecánica.
- Anticipar potenciales averías mecánicas a través de la detección de anomalías en las señales emitidas en tiempo real por los sensores.

2.4 ESTADO DEL ARTE

Al realizar una revisión de los autores que han hecho estudios entorno a la generación de energía por medio del viento, se han encontrado diferentes modelos que abordan una problemática específica, tenemos como por ejemplo, el estudio que realizó Banuelos (2011) el cual desarrolla un proyecto de investigación en México de las fuentes de energía eólica para producir energía eléctrica en sitios que se consideran potencialmente aprovechables, en este estudio el autor utiliza una rosa de los vientos, el cual es un diagrama que muestra la distribución temporal de la dirección del viento y una distribución azimutal ¹⁴ de velocidad del viento en un lugar dado, su solución solo encuentra el sitio adecuado y la orientación en que se debe de instalar el aerogenerador, pero no logra responder detalles de cuantos tipos de aerogeneradores instalar teniendo en cuenta los recursos o condiciones que implican la construcción de un parque eólico.

En la investigación realizada por Ruiz (2011) el autor identifica, implementa y documenta los diferentes modelos de los componentes que conforman un sistema de generación eólico, con el propósito de realizar estudios dinámicos de redes eléctricas hacia los sistemas eléctricos de potencia (SEP), además investigó los diferentes tipos de turbinas eólicas existentes hasta el momento de su estudio, así como sus características, ventajas y desventajas decidiéndose trabajar con las turbinas eólicas de velocidad variable con generador de inducción doblemente alimentado (GIDA). El interés en estas turbinas se debe a sus atractivas características, dadas por la presencia del convertidor de potencia y de los controladores de velocidad, ángulo y voltaje, a diferencia de las turbinas de velocidad fija, que no cuentan con estos dispositivos, por lo tanto no son tan versátiles, aunque tienen otras ventajas como simplicidad y bajo costo, desarrolló un modelo dinámico en MATLAB/SIMULINK de una turbina eólica de velocidad variable con GIDA para realizar simulaciones dinámicas de sistemas de potencia.

¹⁴ángulo formado por una dirección y el norte magnético

En la tesis doctoral desarrollada por García (2015) que contiene algunas técnicas empleadas por Ruiz (2011), tal como la rosa del viento y la probabilidad de Weibull, amplía el estudio con la utilización de un análisis económico para la implementación de un parque eólico, en el cual realiza un estudio financiero junto con el costo-beneficio, rentabilidad, amortización, entre otros, sin embargo con todos estos análisis no se contempla un criterio formalizado para la selección de los diferentes aerogeneradores que se disponen en el mercado, ni tiene en cuenta las limitantes en los recursos que se tienen, otro estudio similar es el presentado por Leon (2013), este último emplea un simulador (Homer) de generación de energía eléctrica mediante un sistema eólico, al igual que Martín (2011) el cual efectúa dos análisis de los distintos modelos de evaluación riesgo, principalmente los estadísticos, considerando los pros y los contras de cada uno y como segundo, un análisis de la rentabilidad de una inversión típica de energía eólica, es decir, de un modo tradicional, según las conclusiones del autor, la simulación de Montecarlo se puede considerar la herramienta más interesante y es el que ha sido utilizado en su trabajo para estudiar la aplicabilidad de los modelos de evaluación riesgo al análisis de rentabilidad de centrales eólicas.

Un estudio muy interesante es presentado por Mora (2008) el cual utiliza técnicas de algoritmos genéticos para el diseño de un parque eólico teniendo como objetivo maximizar la rentabilidad económica de la inversión en el parque, para el diseño y desarrollo de los algoritmos evolutivos (AE) empleó el lenguaje de programación de MatLab (MATrix LABoratory), a pesar de que la solución planteada contiene una serie de restricciones tales como el costo del aerogenerador y sus características técnicas carece del criterio de cuanto espacio físico ocupa un aerogenerador, puesto que el autor plantea una cuadrícula en el cual determina o no la instalación de un aerogenerador, este esquema plantea una dificultad y es su tamaño, lo cual atribuye a la reducción del número de turbinas a colocar en el espacio real disponible, el autor sustenta que con la utilización de criterios heurísticos puede dimensionar la cuadrícula en base al diámetro de las turbinas, haciendo que estas limitaciones carezcan de relevancia práctica para así ganar una reducción importante del esfuerzo

computacional.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

Para tener un panorama general de este capítulo se expone la figura 3.1 el cual indica de manera general el proceso llevado a cabo para cumplir con el objetivo del proyecto.

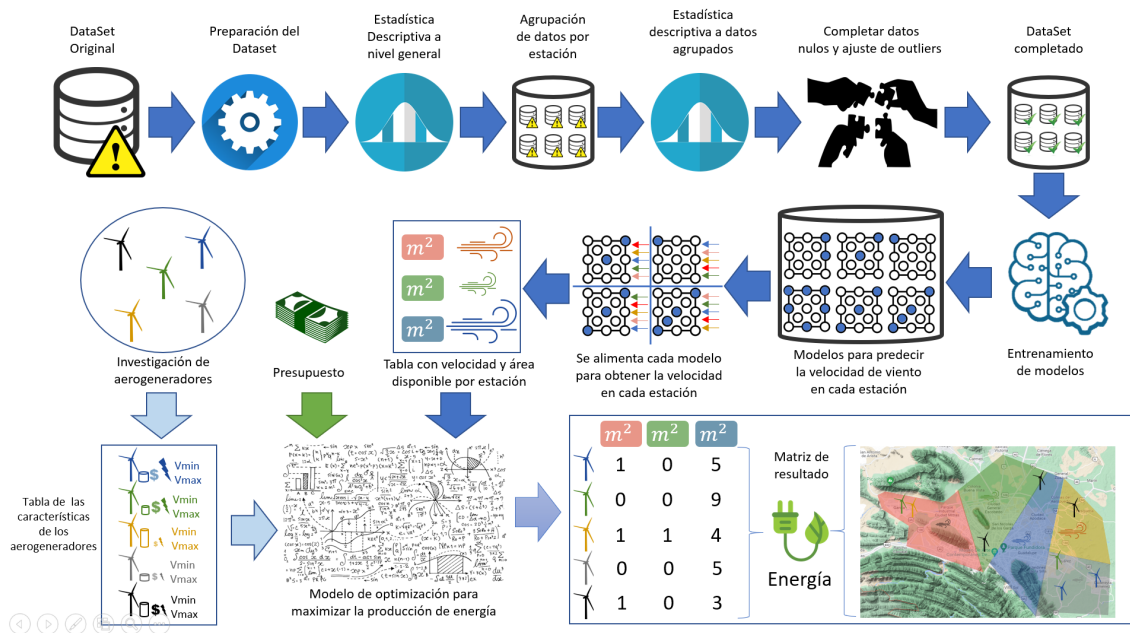


FIGURA 3.1: Resumen de las fases del desarrollo metodológico.

La imagen 3.1 esta compuesta por los elementos que serán explicados a groso modo y como se relacionan entre ellos:



Simboliza el dataset original de los datos suministrados por el Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA)¹, estos se encuentran en su estado bruto.



Proceso que permite ajustar la información del dataset original según la naturaleza de los datos para luego poder realizar el análisis de los datos y posteriormente el modelo híbrido.



Representa el proceso que describe los datos del dataset de manera estadística para entender su comportamiento de manera global, este mismo proceso se realiza cuando los datos se encuentran agrupados por la categoría de las zonas.



Proceso que permite agrupar la información del dataset original por la categoría zona, a este nuevo dataset también se le aplica la estadística descriptiva para entender el comportamiento de los datos de manera agrupada.



Realiza el proceso de completar los datos faltantes y el ajuste de los outliers según los datos estadísticos recolectados hasta el momento, este proceso se aplica al dataset que tiene los datos agrupados por la categoría zona.

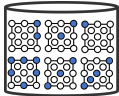
¹http://aire.nl.gob.mx/map_calidad.html



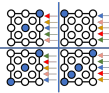
Representa el dataset completado y ajustado de los elementos agrupados por la categoría zona.



Simboliza el proceso de entrenar y encontrar el mejor modelo que prediga la velocidad del viento de cada zona, este se apoya del dataset anterior.



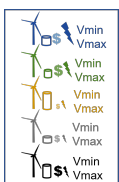
Representa el set de modelos para predecir la velocidad del viento de cada zona, este es el resultado del proceso anterior.



Proceso que permite predecir la velocidad del viento al ingresar los parámetros al set de modelos descrito anteriormente.




Simboliza la tabla con la información de las zonas que contiene la velocidad del viento predicha por el set de modelos junto con los datos de los metros cuadrados disponibles para la instalación de los aerogeneradores, esta tabla sera insumo del modelo de optimización.



Representa la tabla que contiene las características de los aerogeneradores encontrados en la investigación, esta tabla sera insumo del modelo de optimización.



Simboliza el modelo de optimización el cual permite encontrar los tipos y la cantidad de aerogenerados junto al sitio de instalación con el fin de maximizar la producción de energía eléctrica.



	W1	W2	W3
1	0	5	
0	0	9	
1	1	4	
0	0	5	
1	0	3	

Indica la solución del modelo de optimización en la cual indica los tipos y la cantidad de aerogenerados junto al sitio de instalación y el total de energía eléctrica producida.

A continuación en lo restante del capítulo se describe cada uno de los elementos presentados en la figura con mayor profundidad.

3.1 EXPLORACIÓN Y PREPROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Haciendo uso de la información suministrada por el Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA) realizaremos un análisis usando diferentes técnicas estadísticas y visualización de datos al dataset para así poder determinar la naturaleza y estructura de los mismos, ya que en este se podrá identificar cada detalle que guiará nuestro proyecto. Además, en la cual se ajustará la información del dataset, aplicando filtros y completando en lo posible la información faltante para así posteriormente formular el modelo de predicción del viento como a su vez seleccionar los aerogeneradores adecuados por medio del modelo de optimización para maximizar la generación de energía eléctrica en cada una de las regiones (estaciones).

3.1.1 DESCRIPCIÓN DEL DATASET.

El dataset cuenta con 19 características, las cuales se muestran en la Tabla 3.1 junto con su respectiva descripción de la información que se guarda en cada característica.

Características	Tipo de dato	Descripción
timestamp	object	Fecha y hora del registro
station	object	Estación de monitoreo
CO	object	Monóxido de carbono
NO	object	óxido nítrico
NO2	object	Dióxido de nitrógeno NO ₂
NOX	object	Óxidos de nitrógeno
O3	object	Ozono
PM ^a 10	object	igual o inferior a los 10 µm
PM2.5	object	igual o inferior a los 2,5 µm
pressure	object	Presión
rainfall	object	Lluvia
humidity	object	Humedad
SO2	object	Dióxido de azufre SO ₂
solar	object	Radiación solar
temperature	object	Temperatura
velocity	object	Velocidad (m/s)
direction	object	Dirección del viento
valid	object	Datos de control
notes	object	

^aCaracterísticas PM: Partículas sólidas o líquidas de polvo, cenizas, hollín, metálicas, cemento o polen, dispersas en la atmósfera.

TABLA 3.1: Características del Dataset original.

3.1.2 PREPARACIÓN DEL DATASET.

Al dataset se le aplican unas funciones con el fin de unificar y ajustar los valores según el tipo de dato que corresponda a la naturaleza de la información, por ejemplo:

- Se unifica el campo **station** el cual guarda letras (String, en Python el equivalente es object), debido a que este lenguaje de programación es **case sensitive**, para él no es lo mismo «**Centro**» que «**centro**», el no realizar este proceso conllevaría a tener inconvenientes al momento de filtrar o agrupar la información basada en la característica **station**.
- Se convierte a un formato de fecha-hora (datetime64) la columna timestamp, el tipo de dato **datetime64** permite realizar operaciones de aritmética de fecha-hora, con la cual se puede sumar, restar y agrupar intervalos de años, meses, días, horas, minutos y segundos en valores de fecha-hora, con este formato podemos calcular cual es la temperatura promedio por cada mes, trimestre, año, etc.
- Se ajusta a un tipo de dato numérico (float64) las columnas tales CO, NO, NO2, NO2, etc., debido a que algunos registros poseen el símbolo «.» y otros él «,» como separador decimal, sino se realiza este ajuste teniendo en cuenta la configuración regional del sistema operativo se genera incompatibilidad con el tipo de dato numérico manejado por Python.
- Las columnas **valid** y **notes** son eliminadas puesto que son datos de control utilizado por el software de cada estación el cual no aporta ninguna información relevante en nuestros futuros análisis.

Al realizar estos cambios mencionados el nuevo dataset quedaría con sus respectivos tipos de datos como se muestra en la Tabla 3.2

Características	Tipo de dato	Descripción
timestamp	datetime64[ns]	Fecha y hora del registro
station	object	Estación de monitoreo
CO	float64	Monóxido de carbono
NO	float64	óxido nítrico
NO2	float64	Dióxido de nitrógeno NO ₂
NOX	float64	Óxidos de nitrógeno
O3	float64	Ozono
PM10	float64	igual o inferior a los 10 µm
PM2.5	float64	igual o inferior a los 2,5 µm
pressure	float64	Presión
rainfall	float64	Lluvia
humidity	float64	Humedad
SO2	float64	Dióxido de azufre SO ₂
solar	float64	Radiación solar
temperature	float64	Temperatura
velocity	float64	Velocidad (m/s)
direction	float64	Dirección del viento

TABLA 3.2: Características del Dataset ajustado a sus tipos de datos.

Una vez realizado los cambios del dataset, podemos identificar que en su característica **station** cuenta con 13 valores diferentes, los cuales corresponden a las estaciones que se encuentran ubicadas geográficamente en Monterrey, tal cual como se puede apreciar en la Figura 3.2.

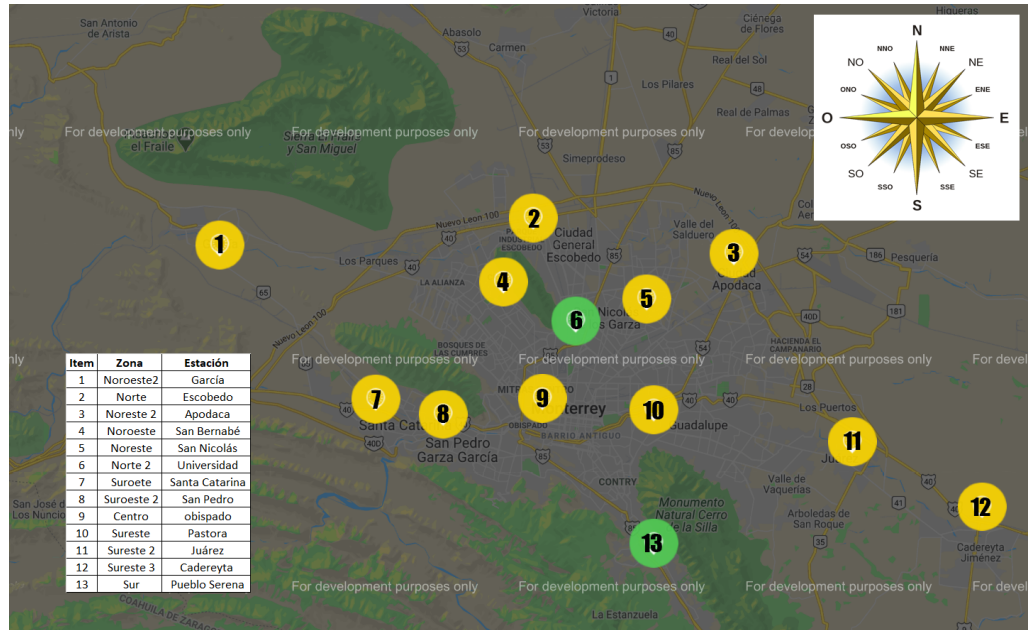


FIGURA 3.2: Sensores en el área de Monterrey.

El dataset cuenta con 1.542.696 registros, al realizar un primer sondeo de los datos a nivel general del dataset podemos notar la cantidad y el porcentaje de datos **nulos** vs **no nulos** en cada una de las características, este resultado se puede ver en la siguiente tabla 3.3

Características	Nulos		No nulos	
	Conteo	%	Conteo	%
timestamp	0	0.00	1542696	100.00
station	0	0.00	1542696	100.00
CO	253474	16.43	1289222	83.57
NO	410737	26.62	1131959	73.38
NO2	412339	26.73	1130357	73.27
NOX	413766	26.82	1128930	73.18
O3	305185	19.78	1237511	80.22
PM10	159985	10.37	1382711	89.63
PM2_5	1014253	65.75	528443	34.25
pressure	610362	39.56	932334	60.44
rainfall	489331	31.72	1053365	68.28
humidity	550968	35.71	991728	64.29
SO2	343180	22.25	1199516	77.75
solar	675701	43.80	866995	56.20
temperature	109143	7.07	1433553	92.93
velocity	109590	7.10	1433106	92.90
direction	178126	11.55	1364570	88.45

TABLA 3.3: Cantidad y porcentaje de valores nulos vs no nulos.

En la Tabla 3.3 podemos percibir que las características que presentan una pérdida de datos superior al 30 % son PM2.5 (65.75 %), solar (43.8 %), pressure (39.56 %), humidity (35.71 %) y rainfall (31.72 %), sin embargo, como estamos enfocados en la generación de energía con aerogeneradores podemos ver que la característica de **velocity** que corresponde a la velocidad del viento, presenta un muy bajo porcentaje de pérdida (7.1 %) lo cual es un buen indicador para nuestro caso, y aunque en este primer análisis preliminar hemos encontrado datos faltantes se aplicara una estrategia para completar los datos faltantes.

Además de tener en cuenta los datos que se encuentran nulos descritos anteriormente, también nos interesa saber los datos estadísticos básicos de nuestro dataset

a nivel general, el cual lo podemos ver en la tabla 3.4.

Características	Count	Mean ^a	Std ^b	Min	25 % ^c	50 % ^d	75 % ^e	Max
CO	1289222	1.199	0.961	-13.75	0.59	0.93	1.5	49.8
NO	1131959	13.506	28.460	-484.5	2.4	5.1	12.4	1027
NO2	1130357	15.623	13.039	-43.25	6.6	11.9	21	281.25
NOX	1128930	28.713	35.883	-464.5	10	18	33.5	1025
O3	1237511	23.620	19.160	-24.5	9	19	34	223.5
PM10	1382711	68.736	53.482	-482.5	35.5	56.5	87	1290
PM2.5	528443	26.056	20.373	0	13	21	34	998
pressure	932334	718.751	21.687	0	709.1	715.1	721.5	788.34
rainfall	1053365	0.020	0.521	0	0	0	0	119.38
humidity	991728	62.333	21.139	0	47	65	80	2134
SO2	1199516	7.053	10.038	-135.75	2.9	4.7	8	544.5
solar	866995	0.186	0.278	0	0	0.01	0.311	1.667
temperature	1433553	22.294	7.076	-5.44	17.65	23.05	27.25	45.45
velocity	1433106	8.494	5.336	-12	4.4	7.4	11.6	143.12
direction	1364570	139.509	91.812	-368.64	81.9	108	181	360

^aMedia

^bDesviación estándar

^cPrimer Cuartil. (Q1)

^dSegundo Cuartil. (Q2)

^eTercer Cuartil. (Q3)

TABLA 3.4: Resumen de datos estadísticos.

Con los datos anteriores podemos realizar el histograma y su diagrama de caja y bigotes (boxplot) de cada una de los campos del dataset a excepción del campo timestamps y station, de esta manera podremos entender un poco más rápido el comportamiento de cada uno de ellos, para así identificar valores atípicos dentro del conjunto de datos. Para modo de ejemplo nos centraremos en la gráfica de la **velocity**, las demás gráficas de las características restantes están en la sesión del apéndice. A.1

Con la Figura 3.3 podemos ver que la característica de velocity presenta unos datos atípicos, estos datos se pudieron registrar por varios factores, una de estas causas podría ser porque el sensor de la estación presentó fallas en su funcionamien-

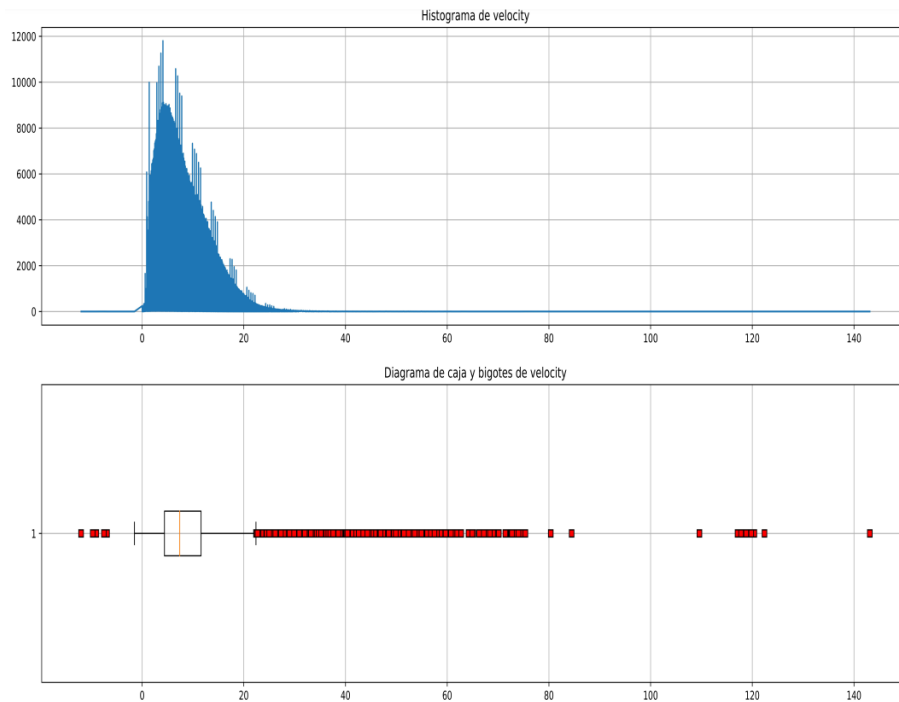


FIGURA 3.3: Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica velocity.

to, estos datos atípicos serán tratados más adelante con el fin de tener mediciones ajustadas a la realidad.

3.1.3 AGRUPACIÓN DE DATOS POR ESTACIONES.

Hasta este punto hemos visto de manera general el comportamiento de las características sin tener en cuenta alguna agrupación determinada, sin embargo, si agrupamos los datos bajo la característica de **station** podremos entender el comportamiento de manera más específica para cada uno de las características del dataset según la ubicación del sensor que registró los datos, recordemos que tenemos 13 estaciones y que cada una se encuentra geográficamente en lugares diferentes lo que hace que los datos cambien según la topología del terreno.

Para realizar esta agrupación se creará un **diccionario de datos** el cual contendrá un dataframe por cada estación existente, esto con el fin de poder manipular

el conjunto de datos a través de referencia de memoria lo que da un mejor rendimiento comparado a tener toda la información junta en un solo dataframe, esto debido a que con el diccionario de datos se puede manejar todo un bloque de información ya agrupada con solo hacer referencia por medio de su clave, mientras que el tener todos los datos con un solo Dataframe, requeriría agrupar y/o filtrar la información cada vez que se quiera ejecutar algún proceso de una estación específica. En la figura 3.4 se muestra la estructura de datos de nuestro diccionario de datos.

The figure illustrates the data structure of a dictionary of stations. On the left, a table lists the keys and their corresponding DataFrame objects. On the right, two windows show the data for 'Centro' and 'Suroeste' stations.

Clave/Tecla	Tipo	Tamaño	Valor
Centro	DataFrame	(227904, 17)	Column names: timestamp, statio...
Noreste	DataFrame	(227904, 17)	Column names: timestamp, statio...
Noreste2	DataFrame	(70128, 17)	Column names: timestamp, statio...
Noroeste	DataFrame	(227904, 17)	Column names: timestamp, statio...
Noroeste2	DataFrame	(87648, 17)	Column names: timestamp, statio...
Norte	DataFrame	(87648, 17)	Column names: timestamp, statio...
Norte2	DataFrame	(17520, 17)	Column names: timestamp, statio...
Sur	DataFrame	(17520, 17)	Column names: timestamp, statio...
Sureste	DataFrame	(227904, 17)	Column names: timestamp, statio...
Sureste2	DataFrame	(61368, 17)	Column names: timestamp, statio...
Sureste3	DataFrame	(17520, 17)	Column names: timestamp, statio...
Suroeste	DataFrame	(227904, 17)	Column names: timestamp, statio...
Suroeste2	DataFrame	(43824, 17)	Column names: timestamp, statio...

Índice	timestamp	station	CO	NO	NO2	NO
0	1993-01-01 00:00:00	Centro	2.58	1.25	11	8.5
1	1993-01-01 01:00:00	Centro	2.6	1.25	10.5	8.25
2	1993-01-01 02:00:00	Centro	2.58	1.25	10.75	8.5
3	1993-01-01 03:00:00	Centro	nan	nan	nan	nan
4	1993-01-01 04:00:00	Centro	2.45	0.75	8.25	6.75
5	1993-01-01 05:00:00	Centro	2.33	0.75	7.25	5.5
6	1993-01-01 06:00:00	Centro	2.3	1	7.75	5.5
	1993-01-01 07:00:00	Centro	2.35	1	9.5	7

Índice	timestamp	station	CO	NO	NO2	NC
0	1993-01-01 00:00:00	Suroeste	1.65	3	14.25	17.5
1	1993-01-01 01:00:00	Suroeste	1.78	2.5	11.5	14
2	1993-01-01 02:00:00	Suroeste	1.7	2	10.5	12.75
3	1993-01-01 03:00:00	Suroeste	nan	nan	nan	nan
4	1993-01-01 04:00:00	Suroeste	1.5	0.25	7.75	8.5
5	1993-01-01 05:00:00	Suroeste	1.35	0	6	6
6	1993-01-01 06:00:00	Suroeste	1.4	0.25	7.25	7.75
	1993-01-01 07:00:00	Suroeste	1.35	0	5.75	6

FIGURA 3.4: Diccionario de estaciones - Estructura de datos

Una vez agrupado los datos en nuestro diccionario de datos, generamos los cálculos estadísticos (Media, Desviación estándar, etc.) por cada estación a cada una de las características, a manera de ejemplo en la tabla 3.5 se muestran los datos estadísticos de cada estación en la característica **velocity**.

	Característica: velocity							
Station	Count	Mean	Std	Min	25 %	50 %	75 %	Max
Centro	214810	6.8	3.7	0	4	6.4	9.1	143.1
Noreste	218597	8.3	4.6	0	4.7	7.6	11.3	58.7
Noreste2	64828	8.4	4.4	0	5.1	7.9	11.2	34.7
Noroeste	218710	10.3	6.7	0	5.2	8.8	14.3	84.5
Noroeste2	79459	10.4	6	0.4	5	9.9	15.1	42.8
Norte	75383	7.7	4.5	0	4.1	6.8	10.5	34.2
Norte2	10776	7.4	3.1	1.4	5.3	7.1	9.2	27.4
Sur	7100	2.4	0.4	1.7	2.1	2.4	2.7	4.5
Sureste	217265	9.5	5.8	-12	5	8.3	13	53.6
Sureste2	51086	7.5	4.2	0	4.3	6.9	10.1	30.2
Sureste3	11395	2.8	1.4	0.5	1.7	2.6	3.6	11
Suroeste	223108	8.7	5.2	0	4.2	8	12.5	57.5
Suroeste2	40589	4.6	2.3	0.1	2.7	4.7	6.3	16.10

TABLA 3.5: Estadística básica de la característica velocidad agrupado por estación.

Con la tabla anterior 3.5, podemos generar el histograma y el diagrama de caja y bigotes (boxplot) en cada estación para cada una de sus características, sin embargo, enfocaremos la explicación con la característica **velocity**, pues el mismo procedimiento se realiza para las características restantes (CO, NO, NO₂, NO_X, ...). Por consiguiente, se muestra el histograma y el diagrama de caja y bigotes de las estaciones Centro (figura 3.5) y Noreste (figura 3.6), las imágenes restantes de las estaciones están disponibles en el apéndice A.2

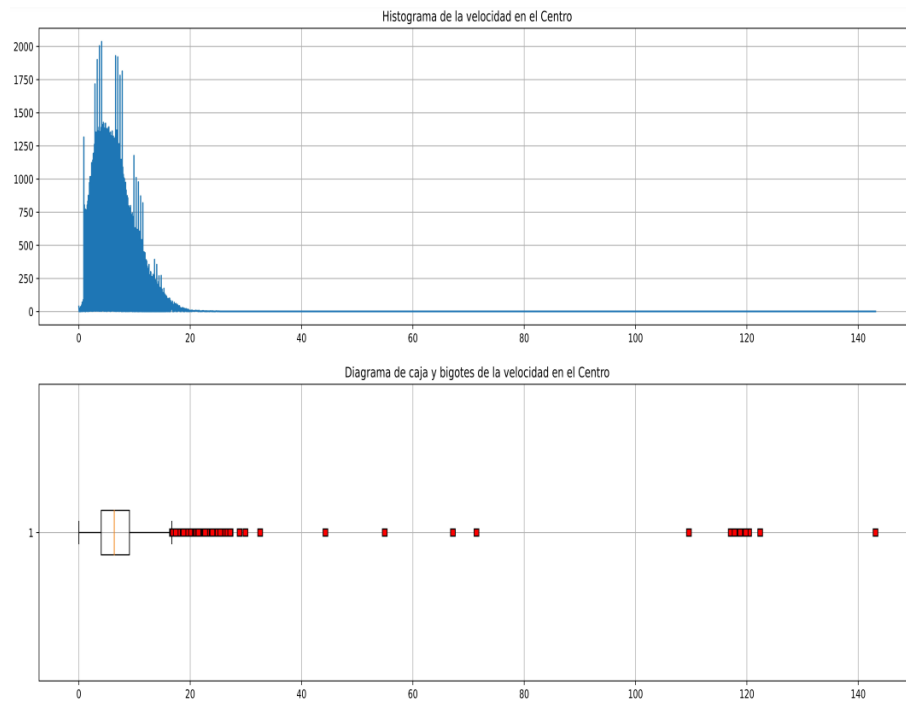


FIGURA 3.5: Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Centro.

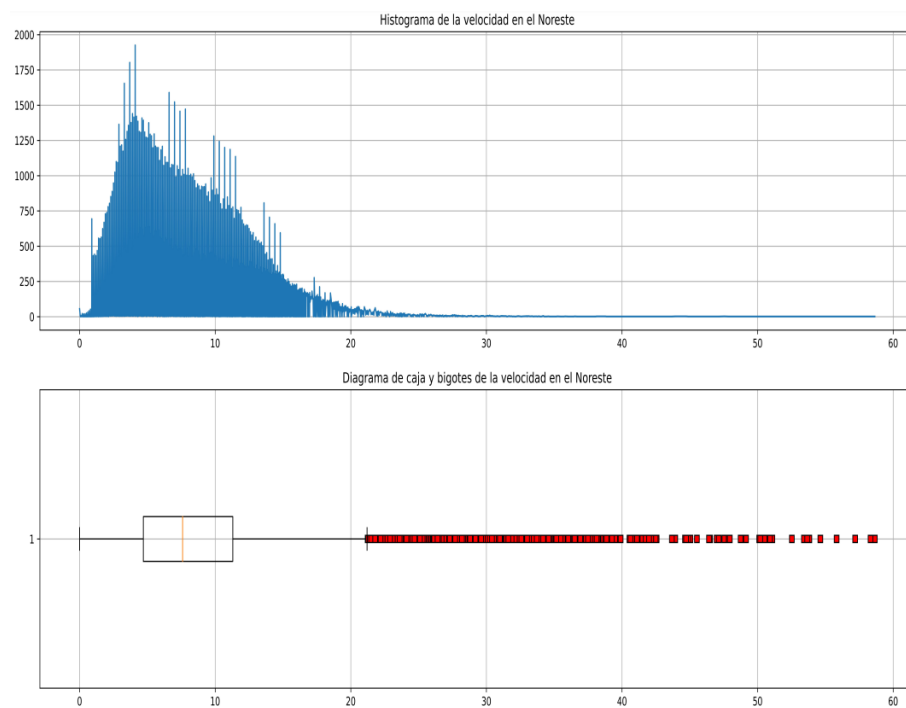


FIGURA 3.6: Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Noreste.

Con los histograma y diagramas de cajas y bigotes agrupados por estaciones, podemos observar el comportamiento de los datos de cada característica, como ya se mencionó, nos hemos enfocado en la característica **velocity**, de esta manera podemos identificar rápidamente cuales son los datos atípicos que existen con relación a los cuartiles. Esta información es útil puesto que con ella nos podemos apoyar para completar los datos faltantes y a su vez comparar el antes y el después, cabe reafirmar que el proceso de generar los datos estadísticos con sus respectivos histogramas y diagrama de cajas y bigotes también son generados para las características restantes (CO, NO, NO₂, NO_X, ...).

3.1.4 COMPLETAR DATOS FALTANTES.

En esta sección nos centraremos en completar los datos faltantes de las características de nuestro dataset, como es bien sabido dentro de nuestro dataset existen datos que se encuentran nulos, en la tabla 3.3 se mostró la cantidad total de registros nulos de cada una de las características pero sin haber realizado el proceso de agrupación por estación, esta tabla fue útil para darnos una idea de la cantidad y porcentaje de datos nulos vs no nulos a nivel global. Sin embargo, para realizar el proceso de completar los datos nos apoyaremos en el diccionario de datos el cual contiene los Dataframe ya agrupados por estación y con los cuales se calcularon los datos estadísticos para cada una de las características, tal es el caso de la tabla 3.5 en la cual se muestra la media, desviación estándar, etc, de la característica velocidad en las diferentes estaciones, esto se realiza de esta manera pues el comportamiento de cada característica no es el mismo en las 13 estaciones, pues cada estación se encuentra ubicado geográficamente en distintos lugares, por lo tanto la topología en la cual se encuentra el sensor de la estación va a generar comportamientos diferentes en sus datos, por ejemplo, si la estación se encuentra en medio de unas montañas es muy posible que la velocidad del viento sea menor que una estación que se no se encuentre entre montañas, lo mismo sucede con las otras características que registran

los sensores con respecto a su posición geográfica.

El proceso para completar los datos faltantes en cada una de las estaciones y sus características se describe a continuación:

Para el proceso de completar los datos faltantes nos apoyaremos en la técnica de **imputación de valores**, idealmente esta imputación no debería cambiar la distribución de nuestros datos. Por ejemplo, si originalmente teníamos una distribución normal (con forma de campana), entonces después de la imputación se debería mantener esta distribución original, lo mismo sucede con sus datos estadísticos que deben de mantener un valor cercano a los iniciales.

```
1 def imputacion_de_datos(diccionario_estaciones):
2     for estacion in diccionario_estaciones:
3         for columna in diccionario_estaciones[estacion]:
4             Calcular desviacion estandar
5             Calcular cuartiles
6             Calcular bigotes(whiskers)
7             for registro in columna
8                 if (registro es vacio) or (registro es outlier) then
9                     registro = q2 + random.uniform(-std, std)
10                end if
11            end for
12        end for
13    end for
```

Código 3.1: Método para completar datos faltantes

Al ejecutar la función del código 3.1 para completar los datos faltantes y ajustar los outlier en cada una de las características de nuestras estaciones, pasamos a calcular nuevamente los datos estadísticos para así comparar que tanto cambio existe entre el antes y el después, para modo de ejemplo, tomaremos la característica **velocity**, la tabla 3.5 contiene los datos estadísticos antes de la imputación de valores y la tabla 3.6 de los datos estadísticos con los datos completados.

	Característica: velocity							
station	count	mean	std	min	25 %	50 %	75 %	max
Centro	227904	6.7	3.3	0.0	4.2	6.3	8.8	16.7
Noreste	227904	8.1	4.2	0.0	4.8	7.5	10.9	21.2
Noreste2	70128	8.2	4.0	0.0	5.4	7.8	10.7	20.3
Noroeste	227904	9.9	5.9	0.0	5.3	8.7	13.7	27.9
Noroeste2	87648	10.3	5.7	0.4	5.4	9.9	14.6	30.2
Norte	87648	7.4	4.0	0.0	4.4	6.8	9.7	20.1
Norte2	17520	7.2	2.2	1.4	5.9	7.1	8.3	15.0
Sur	17520	2.4	0.3	1.7	2.2	2.4	2.5	3.6
Sureste	227904	9.2	5.3	0.0	5.1	8.2	12.5	25.0
Sureste2	61368	7.2	3.6	0.0	4.8	6.8	9.2	18.7
Sureste3	17520	2.7	1.0	0.5	2.0	2.6	3.2	6.4
Suroeste	227904	8.6	5.1	0.0	4.3	8.0	12.3	24.9
Suroeste2	43824	4.6	2.2	0.1	2.9	4.7	6.2	11.7

TABLA 3.6: Tabla estadística con los datos completados.

Al realizar la comparación de la tabla 3.5 vs la tabla 3.6, podemos ver que los valores tales como la media, desviación estándar y sus cuartiles se han mantenido muy cerca a los valores iniciales, esta misma información también la podemos observar de manera gráfica al comparar los histogramas y diagramas de cajas y bigotes de la figura 3.7 vs figura 3.5 el cual se evidencia que se ha respetado la distribución original de los datos.

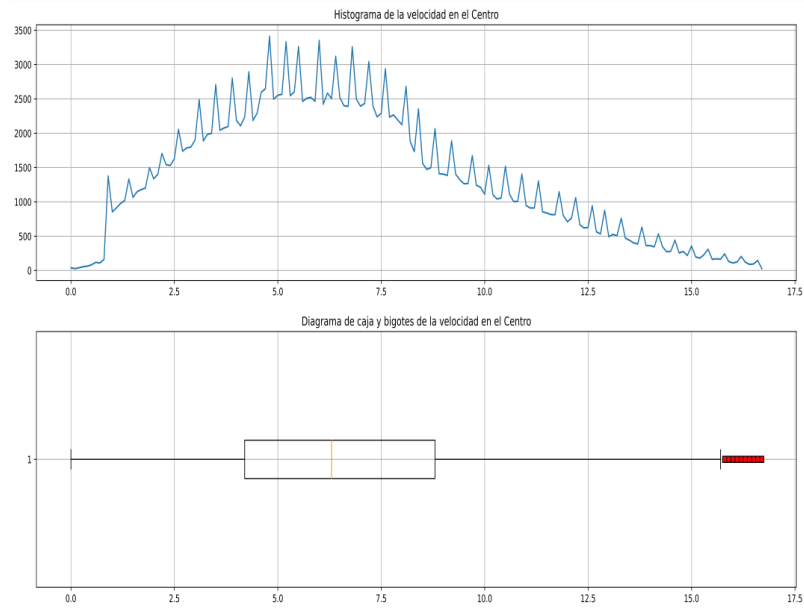


FIGURA 3.7: Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Centro - completado.

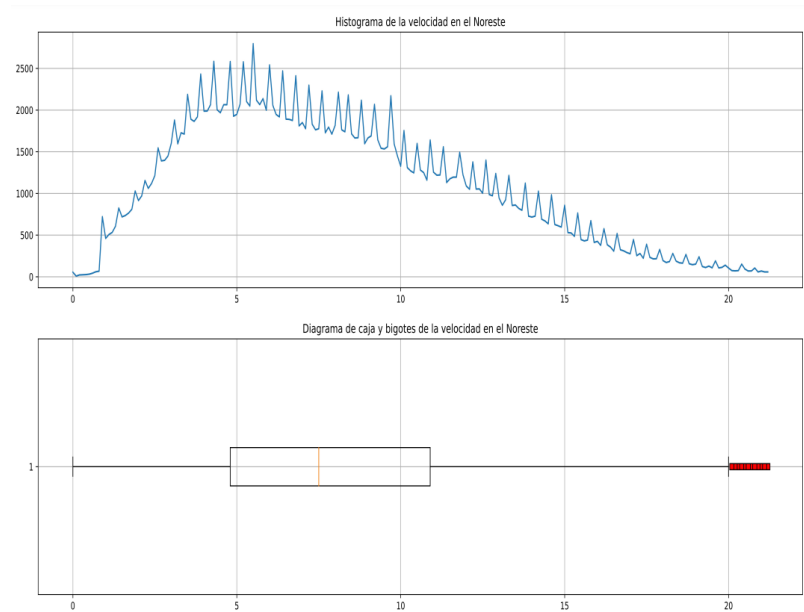


FIGURA 3.8: Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Noreste - completado.

3.2 MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO.

En este punto utilizaremos modelos de regresión con el fin de poder encontrar una forma de predecir el comportamiento de la velocidad del viento, para esto nos apoyaremos en los datos históricos, enfáticamente en las mediciones de las características (CO, NO, NO₂, NOX, etc.) generadas por las 13 estaciones, puesto que ya en este punto tenemos toda la información completada, pusimos a prueba 10 diferentes modelos de regresión por cada estación, los cuales los mencionamos a continuación:

Modelos de regresión
Decision Tree Regressor
Elastic Net
Elastic Net Regressor
Gradient Boosting Regressor
KNeighbors Regressor
LASSO
MLPR
Regresión Lineal Múltiple
Ridge Regressor
XGB Regressor

TABLA 3.7: Modelos de regresión ejecutados

Para seleccionar el mejor modelo de predicción de cada estación, se realizaron 5 ejecuciones por cada uno de los modelos, en la cual en cada ejecución se cambiaba el conjunto de datos de entrenamiento; para luego seleccionar entre todos ellos el modelo que tuviese el mejor puntaje en su precisión.

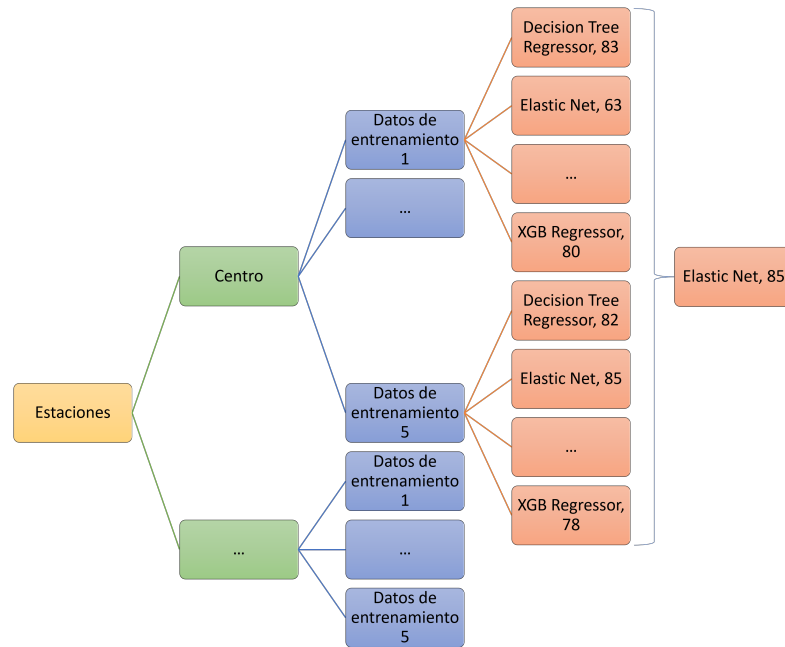


FIGURA 3.9: Proceso para seleccionar el modelo de cada estación

En la figura 3.9 se muestra a manera de ejemplo el proceso para seleccionar el mejor modelo para cada estación, para esta gráfica el proceso indica que la estación Centro le conviene utilizar el modelo Elastic Net, pues es el modelo con mayor puntaje obtenido, luego se pasa a la siguiente estación y se realiza el mismo procedimiento para obtener el mejor modelo de dicha estación, todo esto hasta concluir con las 13 estaciones. Se ha propuesto la ejecución de 5 veces, pues en cada iteración el conjunto de entrenamiento aplicado a todos los modelos va variando, lo que conlleva a que algún conjunto de entrenamiento pueda favorecer un resultado comparado con el anterior, así evitamos el sesgarnos con un único resultado y permitimos una variabilidad entre ellos.

Al aplicar el proceso descrito, obtenemos el resultado que se muestra en la tabla 3.8, el cual indica el modelo a aplicar y la precisión que se obtuvo.

Modelo de predicción	Estación	Precisión
CART	Norte2	0,95
Elastic Net	Norte	0,83
Gradient Boosting Regressor	Noroeste	0,76
	Noreste	0,79
	Sureste	0,81
LGB	Suroeste2	0,76
	Sureste2	0,82
Regresión Lineal Múltiple	Centro	0,86
Ridge Regressor	Sur	0,91
XGB Regressor	Noreste2	0,74
	Noroeste2	0,83
	Suroeste	0,86
	Sureste3	0,98

TABLA 3.8: Modelos para predecir la velocidad del viento de cada estación.

En este punto tenemos entonces 13 modelos que predicen el comportamiento de la velocidad del viento en cada estación, debemos tener en cuenta que cada estación se encuentra geográficamente en lugares distintos y no sería razonable tener un solo modelo de predicción que generalice las 13 estaciones, por lo anterior para mantener todos los modelos organizados y guardados en una sola estructura se crea un diccionario de datos el cual es mostrada en la figura 3.10, en ellos se crea una clave para cada estación junto con su respectivo modelo de predicción.

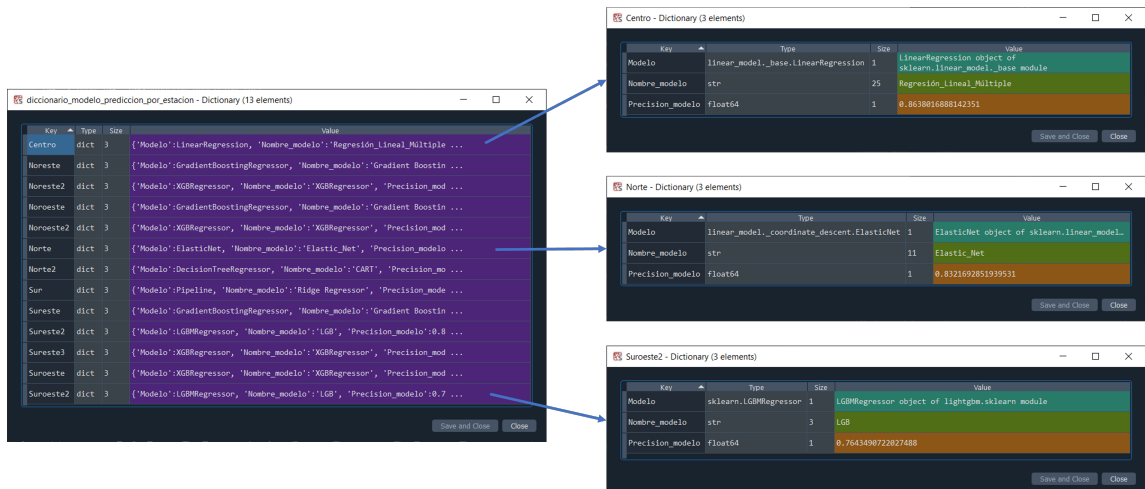


FIGURA 3.10: Diccionario de los modelos para la predicción de la velocidad del viento de cada zona.

Teniendo estos modelos organizados en una sola estructura de datos (diccionario) se prosigue entonces con la predicción de las velocidades en cada zona, siendo estas velocidades guardadas en una tabla (Dataframe), el pseudocódigo 3.2 muestra cómo se realiza esta tarea.

```

1 def predecir_viento(diccionario_modelos_prediccion):
2     for estacion in diccionario_modelos_prediccion:
3         Cargar en memoria el modelo de la estacion.
4         Asignar valores a las variables predictoras
5         Alimentar el modelo cargado con las variables predictoras
6         velocidad=Ejecutar el modelo
7         Agregar la velocidad predicha a la tabla
8     end for
9     Guardar la tabla generada

```

Código 3.2: Método para predecir las velocidades en cada estación

Al finalizar el proceso de predecir las velocidades en cada estación obtenemos la tabla 3.9, la cual nos será útil para nuestro modelo de optimización en la maximización de la generación de energía.

id	Estación	Velocidad
1	Centro	6,7
2	Noreste	8,18
3	Noreste2	8,48
4	Noroeste	9,32
5	Noroeste2	9,99
6	Norte	7,41
7	Norte2	7,8
8	Sur	2,41
9	Sureste	8,82
10	Sureste2	6,8
11	Sureste3	2,61
12	Suroeste	8,46
13	Suroeste2	4,13

TABLA 3.9: Estaciones con sus velocidades predichas por los modelos..

3.3 MODELO DE OPTIMIZACIÓN.

Los modelos de optimización hacen parte de las matemáticas con gran número de aplicaciones, el cual consistente en el uso de modelos matemáticos, estadísticos y algoritmos con objeto de realizar un proceso en la toma de decisiones, generalmente consiste en el estudio reales de sistemas complejos, con la finalidad de mejorar su funcionamiento teniendo en cuenta recursos que son limitados, esto puede ser como la maximización de los beneficios o la minimización de costos.

En esta sección plantearemos un modelo de optimización el cual nos ayude a encontrar una solución factible teniendo en cuenta las restricciones que son intrínseca al problema de la generación de energía eólica, para esto primero desarrollaremos un

modelo sencillo el cual iremos aplicándole mejoras hasta llegar a un modelo estable, por último, nos apoyaremos en las librerías de **Python** para implementar el modelo y así ejecutarlo para obtener una solución.

Nuestro objetivo es maximizar la producción de energía a través de la utilización de turbinas eólicas teniendo en cuenta que contamos con recursos limitados como lo son los metros cuadrados disponibles para construir los aerogeneradores, un presupuesto destinado en la compra de los mismos entre otros factores que pueden ser agregados al modelo.

3.3.1 ÁREA OCUPADA POR UN GENERADOR.

Sabemos que cada aerogenerador ocupa un área de tierra para su instalación, por lo tanto, un espacio de terreno es un recurso finito que debemos de tener en cuenta, realizando una búsqueda se ha encontrado que no hay un consenso para este criterio, así que por lo tanto se mencionarán varias formas de estimar el área ocupada por un aerogenerador.

1. La distancia entre aerogeneradores se mide teniendo en cuenta la altura del aerogenerador que corresponde a la distancia entre la base de la torre y el punto medio de la góndola, por lo tanto, la distancia entre los aerogeneradores al menos es 1,5 veces la altura del aerogenerador. Renovetec (2010)
2. Marc Calaf, Charles Meneveau y Johan Meyers estudiosos de la dinámica de los fluidos, desarrollaron un modelo para calcular el espacio óptimo entre turbinas para así poder sacar el mayor rendimiento a los inmensos parques eólicos del futuro, han determinado que el espacio óptimo entre las turbinas eólicas debe ser aproximadamente 15 veces el diámetro del rotor en lugar de la separación actualmente aceptada de 7 veces el diámetro de las palas (aspas). Calaf *et al.* (2010)

3. La empresa ABB² indica que los aerogeneradores deben ubicarse a una distancia adecuada entre ellos para evitar interferencias aerodinámicas y, con ellas, sus dos consecuencias más graves: el aumento de las turbulencias y la pérdida de potencia, la separación óptima se sitúa entre 8 y 12 veces el diámetro del rotor en la dirección del viento, y entre 2 y 4 veces en la dirección perpendicular al viento. Consultora-Ambientales (2015)
4. Los aerogeneradores se sitúan linealmente, siguiendo el perfil de la cima, y se orientan según las condiciones del viento. La distancia entre aerogeneradores, aunque depende de la dirección del viento, se mantiene entre 2 y 4 veces el diámetro de las palas (aspas). EREN (2015)

De los anteriores puntos se tomará el cuarto criterio, el cual indica que se debe mantener una distancia entre 2 y 4 veces el **diámetro de las aspas**, para nuestro cálculo promediaremos estas distancias y obtenemos que sería 3 veces la distancia.

Así que nuestra distancia lineal entre un aerogenerador y otro sería:

$$distancia_lineal = 3 \cdot diametro_aspa \quad (3.1)$$

Sin embargo, necesitamos hallar el área ocupada por un aerogenerador, así que calculamos el área a la redonda, sabiendo que el área de un círculo es:

$$area_generador = \pi \cdot radio_aspa^2 \quad (3.2)$$

Teniendo en cuenta que el radio ($radio_aspa$) es la mitad del diámetro ($distancia_lineal$), al reemplazar la formula 3.1 en 3.2 tenemos la siguiente ecuación para estimar el área ocupada a la redonda de un aerogenerador.

$$area_generador = \pi \cdot \left(\frac{3 \cdot diametro_aspa}{2} \right)^2 \quad (3.3)$$

²ABB (acrónimo de Asea Brown Boveri) es una corporación multinacional, cuya sede central queda en Zürich, Suiza y cuyos mayores negocios son los de tecnologías en generación de energía eléctrica y en automatización industrial.

La fórmula 3.3 es utilizada entonces para calcular el área que ocupa cada aerogenerador a la redonda basándonos en la columna **Diámetro** de la tabla 2.6.

3.3.2 COSTO DE UN AEROGENERADOR.

Al realizar la revisión bibliografía no se encontró el valor de los aerogeneradores en las páginas de las empresas que lo ofrecían, sin embargo, al consultar por otros medios se puede estimar el valor de un aerogenerador según la capacidad de energía que este pueda producir.

Tomando como referencia el siguiente texto «El coste para un aerogenerador de escala industrial es de alrededor de \$1.3 millones a \$2.2 millones (dólares) por MW de capacidad instalada. La mayoría de las turbinas instaladas a escala comercial hoy en día son de 2 MW. El coste total para la instalación de una turbina eólica a escala comercial puede variar dependiendo del número de turbinas a instalar.»³

Por lo anterior, promediaremos los valores de 1.3 y 2.2 millones de dólares, teniendo entonces 1.75 millones de dólares por cada MW (potencia nominal) de capacidad que puede producir un aerogenerador, así que nuestra ecuación que nos permitirá estimar el coste será:

$$coste_aerogenerador = 1.75 \cdot potencia \quad (3.4)$$

La ecuación 3.4 está expresada en millones de dólares, si queremos tenerla solo en dólares multiplicaremos por 1.000.000.

$$coste_aerogenerador = 1750000 \cdot potencia \quad (3.5)$$

La fórmula 3.5 la utilizaremos entonces para estimar el valor de cada aeroge-

³https://www.elplural.com/leequid/cuanto-cuesta-un-aerogenerador_122287102

nerador basándonos en la potencia máxima que este puede generar, la potencia de cada aerogenerador la podemos encontrar en la columna **Potencia Nominal** de la tabla 2.6.

3.3.3 PRESUPUESTO EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE.

A nivel mundial se han hecho cambios en la perspectiva de la seguridad energética⁴. Estos cambios están orientados a incluir temas como el cambio climático, la escasez del agua y el manejo de los residuos dentro de la planeación energética. Para esto se ha creado una serie de leyes y reglamentos derivados de la Reforma Energética, que fomentan el uso de los recursos provenientes del medio ambiente y que permite que los inversionistas vean un potencial de beneficio económico a desarrollar en proyectos de nueva generación de energía limpia en un ambiente de certeza jurídica.

México está comprometido con el cumplimiento de las metas de mitigación establecidas en la Ley de Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE⁵) que señala que el sector eléctrico debe transformarse para que al 2024 un máximo de 65 % de la electricidad provenga de combustibles fósiles. Esta meta se ratifica en la Ley General de Cambio Climático que estipula que el 35 % de la generación eléctrica provenga de energías limpias para ese mismo año, sin embargo en el documento **”Prospectiva de Energías Renovables 2016-2030”** desarrollado por el gobierno Mexicano, se estima un cierto monto de acuerdo a las proyecciones de desarrollo de costos de inversión para plantas eólicas y solares, pero al contrastar esta información en periódicos y/o portales digitales de economía notamos que no encajan en su totalidad, veamos algunas consultas:

⁴Vista como la capacidad de un país para satisfacer la demanda nacional de energía con suficiencia, oportunidad, sustentabilidad y precios adecuados, en el presente y hacia un futuro

⁵Ley Abrogada DOF 24-12-2015. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/abro/laerfte/LAERFTE_abro.pdf y sustituida por la Ley de Transición Energética.

- “El país busca satisfacer sus necesidades energéticas y disminuir las emisiones de contaminantes, por lo que ha elevado la apuesta para reducir el uso de combustibles fósiles, sumando acciones como la segunda subasta de energía para 2019 y la reciente reforma energética, para lograr que el 35 % de su energía proceda de fuentes renovables en el 2024.

La inversión estimada dentro de los próximos 15 años es de \$119.431 millones de dólares, con lo que ProMéxico ha confirmado que este sector es el segundo con mayor inversión después del automotriz, al atraer del extranjero 47 proyectos multianuales desde 2008.” (Enero 30, 2018) Forbes (2018a)

- “Otro hito que se marcó es que, por primera vez en la historia, México se ubicó dentro del top 10 de los países con nuevas inversiones en renovables.

Además, el reporte de la ONU señala otro récord que remarca el potencial eólico y solar del país: el pasado mes de noviembre en México se entregaron los contratos con la tarifa más baja: un promedio de 20.80 dólares por MHz en solar y 18.60 dólares en energía eólica.

Los \$6000 millones de dólares que se anotó México en inversiones es el monto más alto registrado en el país e incluye compromisos de \$3300 millones de dólares en eólica y \$2600 millones de dólares en solar. En ambos, dice el reporte, se creció la inversión en casi 9 veces.” (abril 6, 2018) Forbes (2018b)

- “Hacia 2032, la industria de energías renovables en México espera inversiones por \$4000 millones de dólares anuales y la generación de más de 200000 empleos, señaló el presidente de la Asociación Mexicana de la Industria Fotovoltaica (AMIF), Carlos Ortiz.

El representante del sector recordó que tan solo este año las inversiones del sector fueron por alrededor de 2000 millones de dólares, 45 % más respecto a las registradas el año anterior.

Sin embargo, admitió se esperaban montos superiores a los \$3500 millones de dólares, lo que habría implicado un alza de 60 % respecto a 2018, cifra que no

se alcanzó ante la incertidumbre del mercado por el primer año de gobierno.” (diciembre 20, 2019) *eleconomista* (2019)

- “La inversión en energía limpia de América Latina se recuperó el año pasado: aumentó un 54 % en los niveles de 2018 para alcanzar los \$1810 millones. El repunte fue liderado principalmente por Brasil y Chile para financiar adiciones de capacidad eléctrica en los próximos años. La energía eólica regresó, atrayendo \$8900 millones de inversión (un 87 % más que los niveles de 2018), mientras que la industria solar recibió un 31 % más de inversión que el año anterior con \$8100 millones.

El interés en Brasil se recuperó el año pasado, y el país recibió 6500 millones de dólares en inversión, un 74 % más que en 2018. Chile atrajo una inversión récord, cuatro veces más que el año anterior. El país fue el segundo mercado más grande de la región en 2019; superando a México, que atrajo unos \$4300 millones, 79 % de los cuales para energía solar. La inversión en Argentina alcanzó los 2000 millones de dólares, a pesar de su crisis económica desde mediados de 2018.” (Febrero 3, 2020) *BloombergNEF* (2020)

- “El informe anual sobre inversiones en energías renovables del Programa de la ONU para el Medio Ambiente (UNEP), incluye la preocupación por la política energética de México y la incertidumbre que está causando en el sector.

El informe señala que, aunque en 2019 en México se invirtieron 4300 millones de dólares en proyectos de energías renovables, un 17 % más que el año anterior, la cifra está lejos de los 6100 millones invertidos en 2016.” *milenio* (2020)

Teniendo en cuenta el sondeo de la información anterior con respecto al presupuesto destinado por el gobierno en la generación de energía limpia, se propone 3 tipos de presupuestos⁶ (Bajo, medio, Alto) que se muestran en la Tabla 3.10, el cual es calculado en el rango del mayor y menor presupuesto encontrado en las fuentes bibliográficas.

⁶Esto asumiendo que se está destinando plenamente a la energía eólica.

Presupuesto	Millones de dólares
Bajo	2000
Medio	4050
Alto	6100

TABLA 3.10: Presupuesto destinado a energía limpia.

En las siguientes secciones plantearemos diferentes modelos de optimización el cual iremos mejorando de manera incremental hasta llegar a nuestro modelo de optimización definitivo, sabiendo que cada uno de nuestros modelos están enfocados en maximizar la producción de energía.

3.3.4 PRIMER MODELO DE OPTIMIZACIÓN.

Para tener una idea básica de nuestro problema y como un primer abordaje a nuestro modelo de optimización **para maximizar la producción de energía** ($\max(z)$), supondremos que tenemos una sola estación meteorológica, de la cual sabemos el área ($area_zona$) disponible para la instalación de los n aerogeneradores que se tienen identificados y un *presupuesto* para comprarlos, siendo nuestra función objetivo como:

$$\max(z) = \sum_{i=1}^n x_i \cdot p_i \quad (3.6)$$

Donde p_i es la potencia del viento teniendo en cuenta la ley de Betz (Formula 2.6), la potencia se encuentra en Watts.

$$p_i = \frac{8 \cdot A_i \cdot D \cdot v^3}{27} \quad (3.7)$$

La fórmula anterior la llevamos a términos de MW (Mega Watts), así que

dividimos por 1000000 la ecuación 3.7 obteniendo:

$$p_i = \frac{8 \cdot A_i \cdot D \cdot v^3}{2,7 \cdot 10^7} \quad (3.8)$$

Al reemplazar la ecuación 3.8 en la ecuación 3.6 tendremos nuestra función objetivo de nuestro primer modelo de optimización para maximizar la producción de energía $max(z)$:

$$max(z) = \sum_{i=1}^n x_i \cdot \left(\frac{8 \cdot A_i \cdot D \cdot v^3}{2,7 \cdot 10^7} \right) \quad (3.9)$$

Sujeto a.

$$\sum_{i=1}^n x_i \cdot a_i \leq area_zona$$

$$\sum_{i=1}^n x_i \cdot c_i \leq presupuesto$$

Donde:

- A_i = Área del rotor del i-ésimo aerogenerador. (m^2)
- D = Densidad del aire. ($1.255kg/m^3$)
- x_i = Cantidad de aerogeneradores a comprar de la i-ésima referencia
- v = Velocidad promedio anual del viento. (m/seg)
- n = Cantidad de referencias de aerogeneradores existentes.
- i = Índice de la referencia del aerogenerador.
- a_i = Área ocupada por el i-ésimo aerogenerador. (m^2)
- c_i = Coste del i-ésimo aerogenerador. (Dólares)

En la gráfica 3.11 podemos apreciar de manera resumida el resultado de este modelo, el cual solo necesitaría una serie de aerogeneradores con sus características, un área disponible para instalar los aerogeneradores y una velocidad del viento; el modelo entregaría entonces que referencia de aerogeneradores y cuantos de ellos se deben comprar, además se indica la cantidad de energía total producida por los aerogeneradores seleccionados.

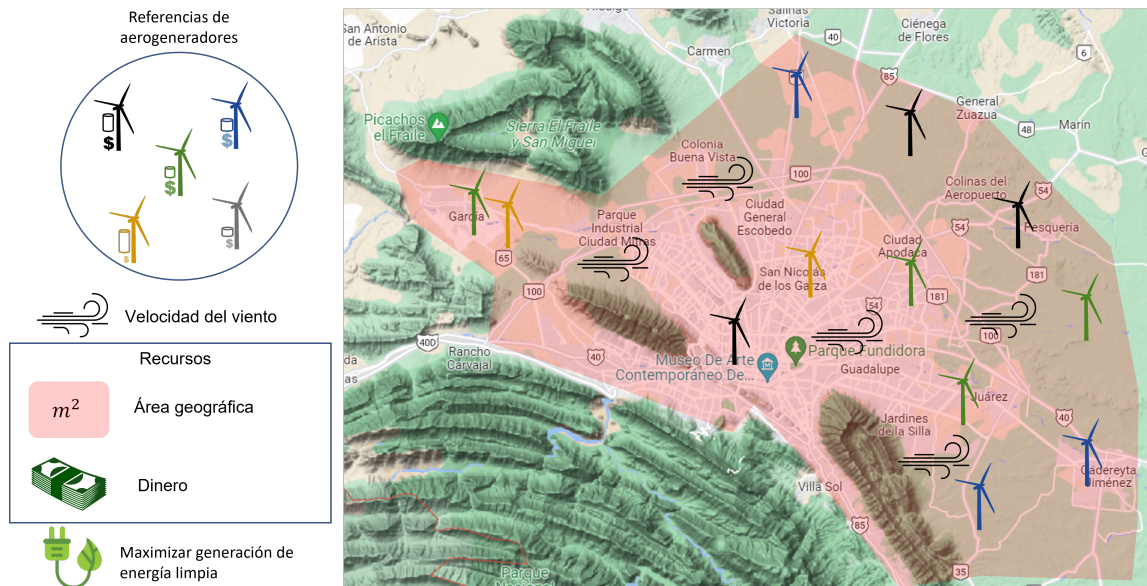


FIGURA 3.11: Modelo de optimización sin delimitación de zonas.

Este primer modelo solo se muestra de manera conceptual, pues lo que se pretende es entender la idea central al momento de optimizar la generación de energía, sin embargo, este es un buen punto de partida para acercarnos a nuestro objetivo.

3.3.5 SEGUNDO MODELO DE OPTIMIZACIÓN.

Para este segundo modelo de optimización vamos a tener en cuenta las m estaciones meteorológicas (zonas), es decir, las 13 zonas de los sensores con sus respectivas velocidades (v_j^3) y áreas ($area_zona_j$) para la instalación de los n aerogeneradores que se tienen identificados con un *presupuesto* para comprarlos.

Definimos nuestra función objetivo para maximizar la generación de energía ($max(z)$) como:

$$max(z) = \sum_{i=1}^n x_{(i,j)} \cdot p_{(i,j)} \text{ donde } j=1,2,3,\dots,m \quad (3.10)$$

Donde $p_{(i,j)}$ es la potencia del viento generada por un aerogenerador i en una zona j teniendo en cuenta la ley de Betz (Fórmula 2.6), la potencia está expresada en Watts.

$$p_{(i,j)} = \frac{8 \cdot A_i \cdot D \cdot v_j^3}{27} \quad (3.11)$$

La fórmula anterior pasamos a representarla en *MW* (Mega Watts) obteniendo:

$$p_{(i,j)} = \frac{8 \cdot A_i \cdot D \cdot v_j^3}{2,7 \cdot 10^7} \quad (3.12)$$

Al reemplazar la ecuación 3.12 en la ecuación 3.10 tendremos nuestra función objetivo de nuestro segundo modelo de optimización para maximizar la producción de energía $max(z)$:

$$max(z) = \sum_{i=1}^n x_{(i,j)} \cdot \left(\frac{8 \cdot A_i \cdot D \cdot v_j^3}{2,7 \cdot 10^7} \right) \text{ donde } j=1,2,3,\dots,m \quad (3.13)$$

Sujeto a.

$$\sum_{i=1}^n x_{(i,j)} \cdot a_i \leq \text{area_zona}_j \text{ donde } j=1,2,3,\dots,m$$

$$\sum_{i=1}^n x_{(i,j)} \cdot c_i \leq \text{presupuesto} \text{ donde } j=1,2,3,\dots,m$$

Donde:

- A_i = Área del rotor del i-ésimo aerogenerador. (m^2)
- D = Densidad del aire. ($1.255kg/m^3$)
- $x_{(i,j)}$ = Cantidad de aerogeneradores a comprar de la i-ésimo referencia para instalar en la j-ésima zona (Estación).
- v_j = Velocidad promedio anual del viento en la j-ésima zona. (m/seg)
- n = Cantidad de referencias de aerogeneradores existentes.
- i = Índice de la referencia del aerogenerador.
- a_i = Área ocupada por el i-ésimo aerogenerador. (m^2)
- c_i = Coste del i-ésimo aerogenerador.
- area_zona_j = Área disponible de la j-ésima zona.
- m = Cantidad de zonas (Estaciones).
- j = Índice de la zona (Estación).

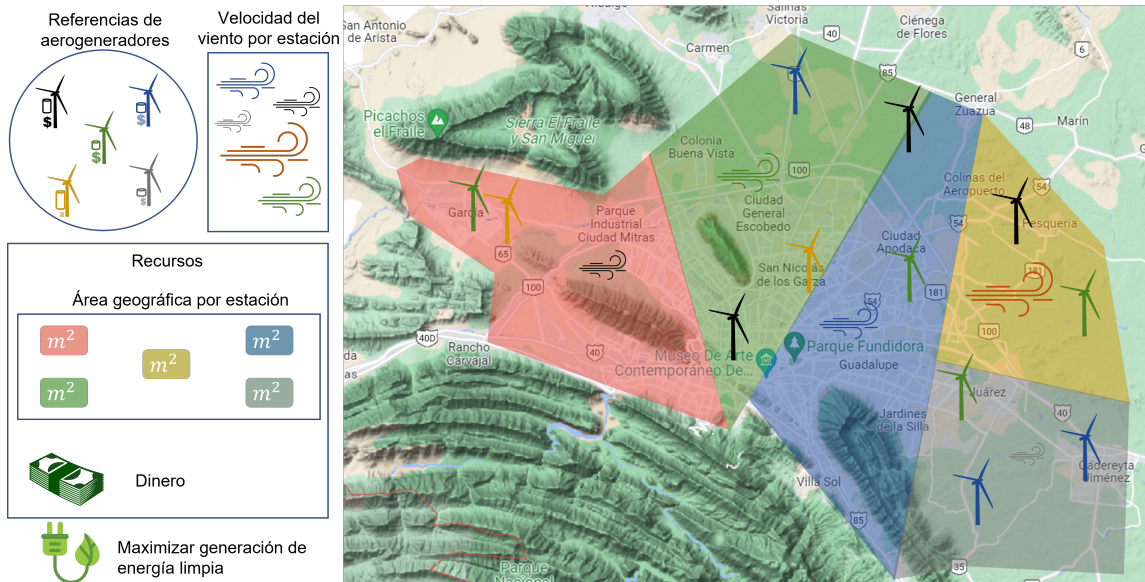


FIGURA 3.12: Modelo de optimización con delimitación de zonas.

La gráfica 3.12 muestra de manera simplificada que el modelo necesita datos como las referencias de los aerogeneradores, el área que delimita cada zona con su respectiva velocidad que se encontraron con los modelos de predicción guardados en nuestro diccionario 3.10, como además de un presupuesto para adquirir los aerogeneradores, al combinar todo lo anterior y ejecutar este modelo obtendríamos entonces las siguientes respuestas:

- Que referencia de aerogeneradores se deben de comprar.
- Cuantos aerogeneradores se deben de comprar de las referencias seleccionadas.
- En que zonas se deben instalar.
- Total de energía producida por los aerogeneradores seleccionados ubicados en las diferentes zonas.

Para entrar en más detalle sobre este modelo, se ampliará entonces de donde provienen los datos que lo alimenta, puesto que en este punto ya se encuentran recolectados a lo largo de la investigación.

Las velocidades de cada estación (v_j) fueron halladas con el algoritmo 3.2, el cual ejecuta los modelos de predicción de cada estación y generó la tabla 3.9, a esta tabla le asignamos manualmente el área⁷ ($area_zona_j$) disponible que existe en cada zona (estación) lo cual obtendríamos la tabla 3.11.

id	Estación	Velocidad	Área
1	Centro	6,7	1500000
2	Noreste	8,18	86800000
3	Noreste2	8,48	239000000
4	Noroeste	9,32	110000
5	Noroeste2	9,99	1034000000
6	Norte	7,41	207100000
7	Norte2	7,8	150000
8	Sur	2,41	180000
9	Sureste	8,82	140000
10	Sureste2	6,8	160000
11	Sureste3	2,61	1004400000
12	Suroeste	8,46	984500000
13	Suroeste2	4,13	69000000

TABLA 3.11: Estaciones con sus velocidades y área disponible.

Para los datos de los aerogeneradores, extraemos de la tabla 2.6 las características de **referencia** (x_i), **potencia nominal**, **velocidad min y max**⁸, **área de barrido** (A_i) **de las aspas**; ahora con la característica **potencia nominal** podemos calcular el **costo del aerogenerador** (c_i), esto se logra al utilizar la fórmula 3.5. Por último, para obtener el **área ocupada** (a_i) por un aerogenerador utilizamos la característica **diámetro** junto con la fórmula 3.3, con todo lo anterior, obtenemos entonces la tabla 3.12.

⁷Datos encontrados en búsquedas de internet, el área se encuentra en m^2 .

⁸La potencia nominal junto con la velocidad min y max la usaremos en un tercer modelo de optimización.

id	Referencia	Potencia Nominal	Velocidad Min	Velocidad Max	Área de barrido	Coste generador	Área ocupada
1	SG 2.1-114	2.1	8.2	22	10207	3675000	91863
2	SG 2.2-122	2.2	8	22	11690	3850000	105209
3	SG 2.6-114	2.6	8.8	22	10207	4593750	91863
4	SG 2.9-129	2.9	8.4	23	13273	5075000	119459
5	SG 3.4-132	3.4	8.8	22	13685	6063750	123163
6	SG 5.0-132	5	9.9	23	13685	8750000	123163
7	SG 5.0-145	5	9.3	23	16742	8750000	150674
8	SG 5.8-155	5.8	9.3	22	19113	10150000	172021
9	SG 5.8-170	5.8	8.8	22	22698	10150000	204282
10	SWT-DD-120	3.9	9.8	20	11310	6825000	101788
11	SWT-DD-130	3.9	9.2	18	13273	6825000	119459
12	SWT-DD-142	3.5	8.4	10	15837	6125000	142531
13	1.7-100	1.7	8.3	12	7854	2975000	70686
14	1.7-103	1.7	8.1	11	8495	2975000	76454
15	1.85-82.5	1.85	9.8	14	5281	3237500	47529
16	1.85-87	1.85	9.4	13	6082	3237500	54739
17	2MW-116	2.7	8.8	38	10568	4725000	95115
18	2MW-127	2.8	8.4	40	12868	4900000	115812
19	2MW-132	2.7	8.1	35	13685	4725000	123163
20	4MW-158	4.8	8.7	37	19607	8400000	176460
21	5MW-158	5.3	9	37	19607	9275000	176460
22	S111	2.1	8.3	30	9852	3675000	88668
23	S120	2.1	7.9	30	11310	3675000	101788
24	S128	2.7	8.2	30	13273	4725000	119459
25	V150-5,6MW	5.6	9.5	25	17671	9800000	159043
26	V162-5,6MW	5.6	9	25	20612	9800000	185508
27	V138-3,0MW	3	8.1	24	14957	5250000	134614
28	V90-2,0MW	2	9.5	23	6362	3500000	57256
29	V100-2,0MW	2	8.8	20	7854	3500000	70686
30	V100.1-2,0MW	2	8.3	18	9503	3500000	85530
31	V116-2,1MW	2.1	8.1	18	10568	3675000	95115
32	V120-2,2MW	2.2	8.1	18	11310	3850000	101788
33	V105-3,45MW	3.45	10.2	23	8825	6037500	79423
34	v112-3,45MW	3.45	9.8	23	9852	6037500	88668
35	v117-3,45MW	3.45	9.5	23	10936	6037500	98423
36	v117-4,2MW	4	9.9	25	10936	7000000	98423
37	v126-3,45MW	3.45	9.1	22.5	12469	6037500	112221
38	v136-3,45MW	3.45	8.6	22.5	14527	6037500	130741
39	v136-4,2MW	4.2	9.2	25	14527	7350000	130741
40	v150-4,2MW	4.2	8.6	22.5	17671	7350000	159043

TABLA 3.12: Datos de los aerogeneradores para el modelo de optimización.

El presupuesto para la compra de los aerogeneradores lo tomamos de la tabla 3.10, en el cual manejamos tres rangos (Alto, Medio, bajo), el modelo realizará un cálculo por cada uno de estos rangos pues se quiere obtener diferentes resultados según el presupuesto destinado en diferentes escenarios.

Para la implementación del modelo de optimización utilizaremos el paquete PuLP en python, "PuLP es un modelador LP escrito en Python. PuLP puede generar archivos MPS o LP y llamar a GLPK , COIN-OR CLP / CBC , CPLEX , GUROBI , MOSEK , XPRESS , CHOCO , MIPCL , SCIP para resolver problemas lineales."(PuLP (2020))

```
1 importar libreria PULP
2 Cargar datos de aerogeneradores
3 Cargar datos de estaciones
4 presupuestos=[2000000000,4050000000,6100000000]
5 for x in presupuestos:
6     Crear funcion objetivo
7     Configurar las restricciones
8         Area geografica
9         Presupuesto
10    Ejecutar modelo
11    Guardar resultado
12 end for
```

Código 3.3: Implementación del modelo.

PuLP nos permite ver el modelo generado con la información de las tablas, el modelo completo se puede ver en el apéndice A.4, en nuestro caso tenemos una tabla de 40 aerogeneradores y otra tabla con 13 estaciones (zonas), tenemos entonces 520 variables de decisiones, puesto que queremos encontrar cuantos aerogeneradores de una referencia específica se puede colocar en una zona en particular, por lo tanto se debe de cruzar los aerogeneradores vs estaciones.

Al ejecutar nuestro modelo nos da como resultado la tabla 3.13

Presupuesto	Aerogenerador	Estación	Cantidad	Potencia Generada
2000000000	SG 2.2-122	Noroeste2	3	2281.44
	S120	Noroeste2	541	
4050000000	S120	Noroeste2	1102	4620.73
6100000000	SG 2.2-122	Noroeste2	1	6959.54
	1.7-103	Noroeste2	1	
	S120	Noroeste2	1658	

TABLA 3.13: Solución del segundo modelo optimización.

Podemos ver entonces que nuestro modelo nos responde según los diferentes presupuestos lo siguiente:

- Que referencia de aerogeneradores se deben de comprar.
- Cuantos aerogeneradores se deben de comprar de las referencias seleccionadas.
- En que zonas se deben instalar.
- Total de energía producida por los aerogeneradores seleccionados ubicados en las diferentes zonas.

3.3.6 TERCER MODELO DE OPTIMIZACIÓN.

Para nuestro tercer modelo de optimización se realizarán las siguientes mejoras:

1. Reducir el número de variables de decisión.
2. Ajustar la potencia nominal de los aerogeneradores.

3.3.6.1 REDUCIENDO VARIABLES DE DECISIÓN.

Como vimos en el segundo modelo de optimización el cruce de la información de los aerogeneradores vs estaciones (zonas), genera 520 variables de decisiones, para reducir este número de variables se aplicará a la función objetivo un nuevo componente.

Para realizar esta reducción de variables nos apoyaremos en los campos **velocidad min**⁹ y **velocidad max**¹⁰ de la tabla 3.12, la **velocidad mínima** es la velocidad en la cual el aerogenerador empieza a generar su máxima potencia (Potencia nominal) mientras que la **velocidad máxima** es aquella velocidad la cual el aerogenerador puede soportar, una velocidad mayor a ella ocasionaría que los componentes del aerogenerador se vean afectados ocasionando daños en él, mientras que una velocidad por debajo de la velocidad mínima no se sacaría provecho a la generación de energía máxima del aerogenerador, con la figura 3.13 podemos ver por ejemplo la velocidad mínima, máxima y su potencia nominal del aerogenerador SG2.1-114, la velocidad de la estación (v_j) debería de estar dentro de este rango para sacar el máximo provecho para la generación de la energía.

⁹Conocida también como velocidad nominal.

¹⁰Conocida también como velocidad de parada.

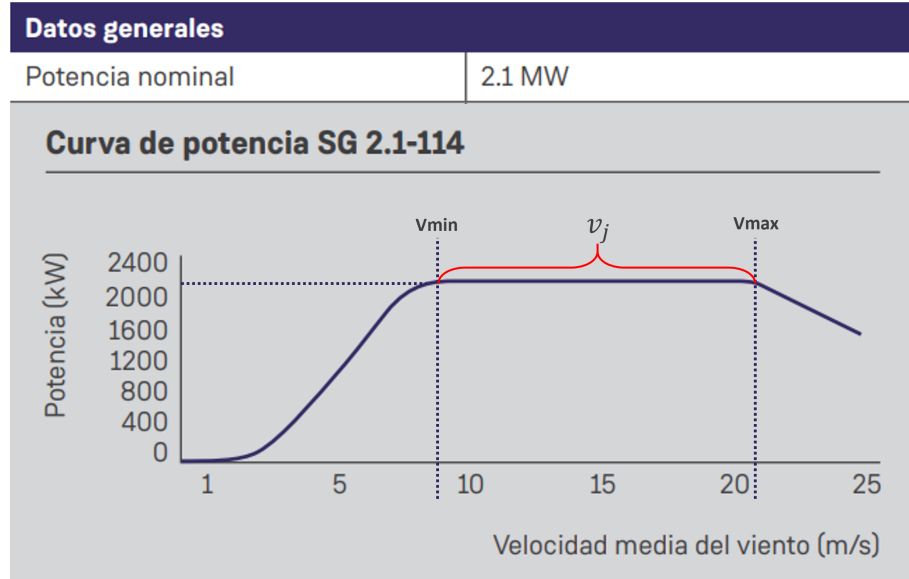


FIGURA 3.13: Velocidad max y min del aerogenerador SG2.1-114

Por lo anterior definimos $M_{(i,j)}$ como una matriz binaria de magnitud adimensional, la cual indica 1 si la velocidad promedio del viento (v_j) de la zona j se encuentra entre el rango de la velocidad mínima ($Vmin_i$) y velocidad de máxima ($Vmax_i$) del aerogenerador i , de lo contrario es 0.

$$M_{(i,j)} = \begin{cases} 1 & Vmin_i \leq v_j \leq Vmax_i & \text{donde } i=1,2,3,\dots,n \\ 0 & \text{Caso contrario} & \text{donde } j=1,2,3,\dots,m \end{cases} \quad (3.14)$$

Al combinar nuestra matriz binaria junto con la función objetivo quedaría de la siguiente forma:

$$\max(z) = \sum_{i=1}^n x_{(i,j)} \cdot p_{(i,j)} \cdot M_{(i,j)} \quad \text{donde } j=1,2,3,\dots,m \quad (3.15)$$

De esta forma al multiplicar cada variable de decisión con la posición correspondiente del elemento (i,j) de la matriz binaria, obtenemos entonces la eliminación o no de dicha variable en nuestro modelo.

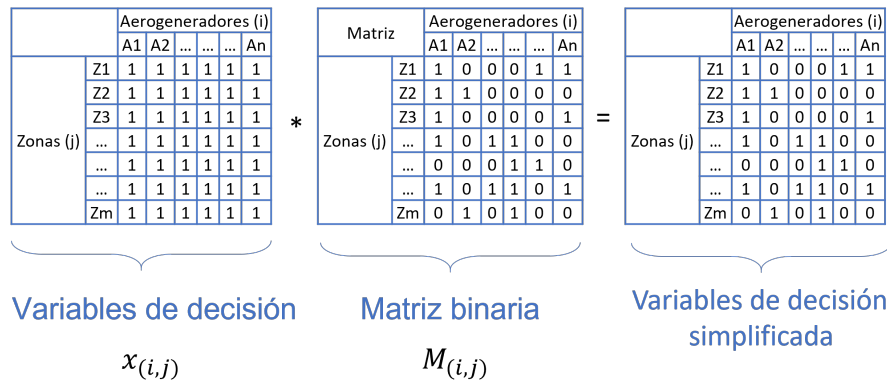


FIGURA 3.14: Simplificación de variables de decisión.

En la figura 3.14 se puede ver un ejemplo en el cual inicialmente todas las variables de decisión son consideradas dentro del modelo, pero una vez que se multiplica con la matriz binaria se reduce el número de ellas, obviamente esta reducción está supeditada a si se cumple o no la condición que define la matriz binaria.

3.3.6.2 AJUSTE DE LA POTENCIA.

Sabemos que $P_{(i,j)}$ es la potencia del viento generada por un aerogenerador i en una zona j teniendo en cuenta la ley de Betz y expresándola en la unidad de MW (Mega Watts) tenemos:

$$p_{(i,j)} = \frac{8 \cdot A_i \cdot D \cdot v_j^3}{2,7 \cdot 10^7} \tag{3.16}$$

Esta fórmula a pesar que nos ha sido útil debemos de ajustarla a la realidad, pues si tenemos en cuenta que los aerogeneradores poseen una potencia nominal de generación de energía, esta determinaría lo máximo que el generador puede aportar, esta limitante está sujeta por las características propias de los componentes con los cuales fue construido el aerogenerador, en un mundo perfecto en el cual no existiesen estas limitaciones podríamos obtener energía del viento de manera ilimitada pero sabemos que esto no es posible, la figura 3.13 nos permite ver que el aerogenerador

posee un límite en su potencia nominal que está determinada entre su velocidad mínima y velocidad máxima, sin embargo, si aplicamos la ecuación 3.16 dentro de ese rango de velocidades, obtendríamos una potencia muy superior a la que los componentes diseñados estarían dispuestos a entregar, por lo tanto, no tendríamos una mediciones que estén ajustadas a la realidad.

Para solucionar esta dificultad nos apoyaremos en el campo **Potencia nominal** de la tabla 3.12 y el campo **Velocidad** del viento de cada estación de la tabla 3.11, lo que haremos es calcular la potencia ($p_{(i,j)}$) por medio de la fórmula 3.16 con la velocidad (v_j) de cada estación y el área de barrido (A_i) de cada aerogenerador, si la potencia obtenida es mayor a la **potencia nominal** (pn_i) del aerogenerador ajustaremos su valor a la **potencia nominal** que se indica en la tabla 3.12, en caso contrario, se deja la potencia calculada por medio de la fórmula 3.16.

$$p_{(i,j)} = \begin{cases} pn_i & p_{(i,j)} > pn_i & \text{donde } i = 1, 2, 3, \dots, n \\ p_{(i,j)} & \text{caso contrario} & \text{donde } j = 1, 2, 3, \dots, m \end{cases} \quad (3.17)$$

Ya en este punto tenemos un modelo de optimización mucho más acorde a la realidad que los dos modelos anteriores, por lo tanto, nuestro tercer modelo quedaría de la siguiente forma:

$$\max(z) = \sum_{i=1}^n x_{(i,j)} \cdot p_{(i,j)} \cdot M_{(i,j)} \quad \text{donde } j=1,2,3,\dots,m \quad (3.18)$$

Para.

$$M_{(i,j)} = \begin{cases} 1 & Vmin_i \leq v_j \leq Vmax_i & \text{donde } i=1,2,3,\dots,n \\ 0 & \text{Caso contrario} & \text{donde } j=1,2,3,\dots,m \end{cases}$$

$$p_{(i,j)} = \begin{cases} pn_i & p_{(i,j)} > pn_i & \text{donde } i = 1, 2, 3, \dots, n \\ p_{(i,j)} & \text{caso contrario} & \text{donde } j = 1, 2, 3, \dots, m \end{cases}$$

Sujeto a.

$$\sum_{i=1}^n x_{(i,j)} \cdot a_i \cdot M_{(i,j)} \leq \text{area_zona}_j \text{ donde } j=1,2,3,\dots,m$$

$$\sum_{i=1}^n x_{(i,j)} \cdot c_i \cdot M_{(i,j)} \leq \text{presupuesto} \text{ donde } j=1,2,3,\dots,m$$

Donde:

- A_i = Área del rotor del i-ésimo aerogenerador. (m^2)
- D = Densidad del aire. ($1.255kg/m^3$)
- $x_{(i,j)}$ = Referencia del i-ésimo aerogenerador en la j-ésima zona.
- v_j = Velocidad promedio anual del viento en la j-ésima zona. (m/seg)
- n = Cantidad de aerogeneradores.
- a_i = Área ocupada por el i-ésimo aerogenerador. (m^2)
- c_i = Coste del i-ésimo aerogenerador.
- area_zona_j = Área disponible de la j-ésima zona.
- m = Cantidad de zonas.
- $Vmin_i$ = Velocidad nominal del i-ésimo aerogenerador (m/seg)
- $Vmax_i$ = Velocidad de parada del i-ésimo aerogenerador (m/seg)
- $M_{(i,j)}$ = Matriz binaria de validación.
- pn_i = Potencia nominal del i-ésimo aerogenerador.

La implementación del tercer modelo de optimización se muestra de manera resumida en el código 3.4 el cual tiene los pasos de reducir las variables de decisión y el ajuste de las potencias nominales de los aerogeneradores.

```
1 importar libreria PULP
2 Cargar datos de aerogeneradores
3 Cargar datos de estaciones
4 presupuestos=[2000000000,4050000000,6100000000]
5 for x in presupuestos:
6     Reducir variables de decision
7     Ajustar potencias
8     Crear funcion objetivo
9     Configurar las restricciones
10         Area geografica
11         Presupuesto
12     Ejecutar modelo
13     Guardar resultado
14 end for
```

Código 3.4: Implementación del tercer modelo.

Al ejecutar el tercer modelo en Python con ayuda de PuLP, podemos comparar con nuestros datos, el segundo modelo A.4 vs el tercero A.5, con ellos podemos evidenciar que la función objetivo del tercer modelo se ha reducido considerablemente, lo mismo sucede con las restricciones C3, C7, C9, C10, C11, C12, C13, al generar la matriz binaria podremos filtrar de las 520 variables de decisiones pasar a 129, es decir, hemos reducido 75.2% nuestras variables de decisión¹¹.

El resultado de la ejecución de este modelo nos arroja la siguiente tabla:

¹¹Cifra tomada al contar el número de celdas con valor de 1 dentro de la matriz binaria

Presupuesto	Aerogenerador	Estación	Cantidad	Potencia Generada
2000000000	1.85-82.5	Noroeste2	1	1142.85
	V138-3,0MW	Noroeste2	1	
	V100-2,0MW	Noroeste2	569	
4050000000	SG 2.6-114	Noroeste	1	2314.28
	SWT-DD-130	Noroeste2	3	
	1.85-82.5	Noroeste2	3	
	2MW-127	Suroeste	1	
	V162-5,6MW	Noroeste2	1	
	V90-2,0MW	Noroeste2	1143	
6100000000	SG 2.6-114	Noroeste2	1	3485.71
	SG 3.4-132	Noroeste2	2	
	1.7-100	Noroeste	1	
	1.7-100	Noroeste2	1	
	1.85-87	Noroeste2	2	
	V162-5,6MW	Noroeste2	1	
	V100-2,0MW	Noroeste2	1730	
	v112-3,45MW	Noroeste2	1	

TABLA 3.14: Solución del tercer modelo optimización

Al revisar la tabla 3.14 podemos ver que la potencia generada por los aerogeneradores es menor que la obtenida en el segundo modelo (Tabla 3.13), esto es debido a que precisamente la potencia de los aerogeneradores están ajustadas a la capacidad máxima real que sus componentes pueden ofrecer, esto se logra por medio del proceso 3.17.

Al apoyarnos en la gráfica 3.15, podemos ver de manera simplificada lo que hace nuestro tercer modelo, en él se muestra que los aerogeneradores se les tiene en cuenta la característica de velocidad máxima y mínima, esto con el fin de po-

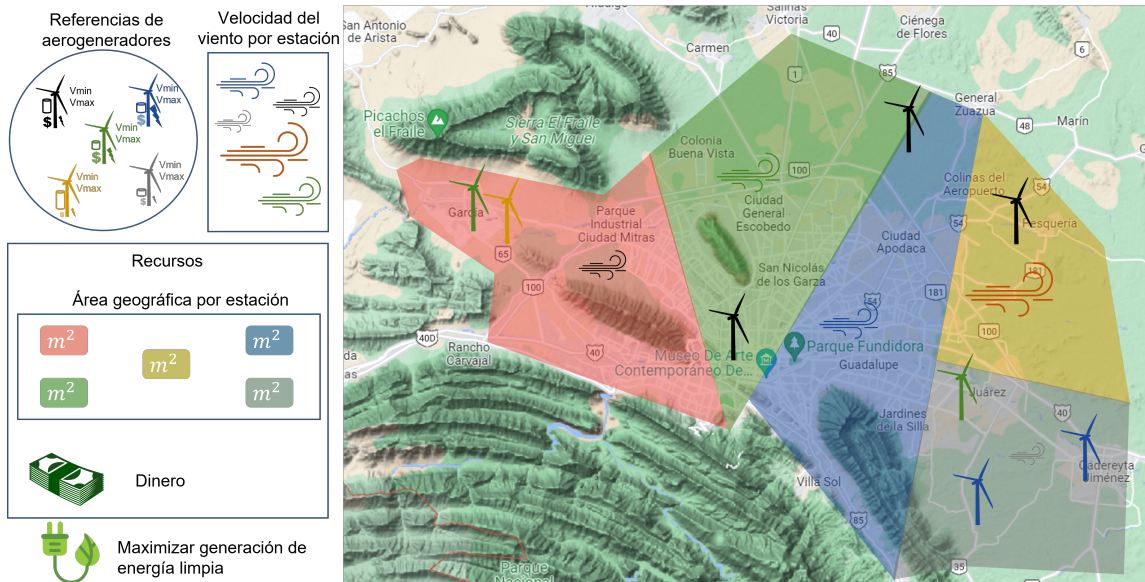


FIGURA 3.15: Modelo de optimización con delimitación de zonas, velocidad Max y Min y potencias ajustadas.

der descartar que aerogeneradores no soportarían ráfagas de vientos superiores a las que pueden ser sometidos sin que se vea afectada la integridad de los componentes, además de determinar que aerogeneradores están dentro del rango en el cual pueden llegar a obtener su máxima potencia nominal basado en su diseño. Podemos comparar la gráfica 3.12 con la imagen 3.15 en la cual notaremos que existen menos aerogeneradores en esta última figura como parte de la solución óptima, sin embargo nuestro modelo responde los interrogantes iniciales por el cual se inició este proyecto.

- Que referencia de aerogeneradores se deben de comprar.
- Cuantos aerogeneradores se deben de comprar de las referencias seleccionadas.
- En que zonas se deben instalar.
- Total de energía producida por los aerogeneradores seleccionados ubicados en las diferentes zonas.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado un estudio sobre la energía eólica, la cual utiliza la energía contenida en el viento; para la generación de energía mecánica a eléctrica a través de aerogeneradores. Esta clase de energía es derivada del sol, ya que la diferencia de temperatura que este genera en las masas de aire atmosféricas producen el viento, por lo que es una fuente continua e inagotable.

La eólica es líder entre las fuentes renovables; fundamentalmente a su escaso impacto medioambiental y a la progresiva reducción de costes, que ha hecho que actualmente resulte una energía limpia, competitiva y económicamente viable para los gobiernos, esto surge debido a la diversidad de aerogeneradores que pueden existir en el mercado e inversionistas dispuestos a inyectar capital para tal fin.

Para comprender el comportamiento de los datos históricos de las estaciones meteorológicas y debido amplio volumen de información; se ha hecho uso del lenguaje de programación Python, con el cual se pudieron estimar los datos bases para la formulación de un proceso de optimización por programación lineal, ya que Python cuenta con las librerías necesarias se pudo desarrollar todo bajo un mismo ambiente de programación, utilizando objetos como DataFrame, diccionarios de datos e instancias del modelo de programación lineal.

El modelo híbrido desarrollado en esta tesis consiste en:

1. Modelo de predicción.
2. Modelo de optimización¹.

En el modelo de predicción se obtiene un conjunto de **modelos en la predicción** de la variable de velocidad del viento en cada una de las 13 estaciones meteorológicas, esto se logra con la utilización de datos históricos en registros de las estaciones de las características (CO, NO, NO₂, NO_X, etc...), cada conjunto de dato² que representa a cada zona, son enviadas a 10 diferentes modelos de predicción para determinar cuál de ellos predice mejor su comportamiento; esta primera fase permite dar un insumo³ importante a nuestro modelo de optimización.

El modelo de optimización se enfoca en maximizar la producción de energía eléctrica, este se diseña entonces teniendo en cuenta las características de los aerogeneradores de diferentes compañías, tales como la potencia nominal, la velocidad mínima y máxima, el valor del generador y su área ocupada, para llegar al modelo más estable se plantearon diferentes modelos del cual se realizan mejoras incrementales en la obtención de la selección y lugar de la instalación de los aerogeneradores; teniendo en cuenta restricciones como lo son el presupuesto y el área de instalación, inicialmente con los datos manipulados se comprendían 520 variables de decisión y aunque Python es capaz de manejar esta cantidad de variables se proponen dos procesos computacionales que se une al modelo de optimización; el cual permite ajustar las potencias de los aerogeneradores calculados como filtrar una buena porción de variables de decisión, el cual con los datos que se tienen represento una reducción del 75.2%, es decir de las 520 pasamos a 129 variables de decisión, lo cual lo hace ser un modelo más liviano.

A pesar que nuestro modelo híbrido responde 4 interrogantes tales como: ¿Qué

¹Modelo de Programación Lineal Entera Mixta.

²Es decir las características (CO, NO, NO₂, NO_X, etc.)

³La velocidad del viento en cada zona.

referencia de aerogeneradores se deben de comprar?, ¿Cuántos aerogeneradores se deben de comprar de las referencias seleccionadas?, ¿En qué zonas se deben instalar? y ¿Cuál es el total de energía producida por los aerogeneradores seleccionados ubicados en las diferentes zonas?, también presenta limitantes, como es el caso de un análisis financiero teniendo en cuenta costo-beneficio, rentabilidad, amortización entre otros aspectos que son mencionados en la tesis doctoral desarrollada por García (2015); sin embargo con todos estos análisis no se contempla un criterio formalizado para la selección de los diferentes aerogeneradores existentes en el mercado teniendo en cuenta las limitantes en los recursos disponibles ni mucho menos se utiliza una técnica de optimización que responda lo que se plantea en la tesis presentada, siguiendo la narrativa anterior, se proponen como trabajos futuros para robustecer más el modelo híbrido las siguientes ideas:

- Incluir en el modelo de optimización restricciones que ahonden en características técnicas de los dispositivos propios de los aerogeneradores tales como el multiplicador, rotor, peso de las aspas, etc., para obtener un mayor diagnóstico en las variables de decisión.
- Incorporar en el modelo híbrido el estudio de la dirección del viento por medio de la rosa de los vientos, con el fin de determinar no solo la ubicación sino la dirección en la cual los aerogeneradores se deben de instalar en un área geográfica para aprovechar el máximo de energía que se puede producir.
- Integrar en el modelo híbrido un análisis financiero en la construcción de la obra civil de una central aerogeneradora de energía que ahonde sobre el costo de la plataformas de montaje, edificio de control, canalización en zanjas y restitución de terrenos, entre otros aspectos a su vez teniendo en cuenta la variabilidad de la demanda energética de la zona haciendo el modelo más subjetivo a la realidad.

APÉNDICE A

APÉNDICE

A.1 HISTOGRAMAS Y DIAGRAMAS DE CAJAS Y BIGOTES A DATOS NO AGRUPADOS.

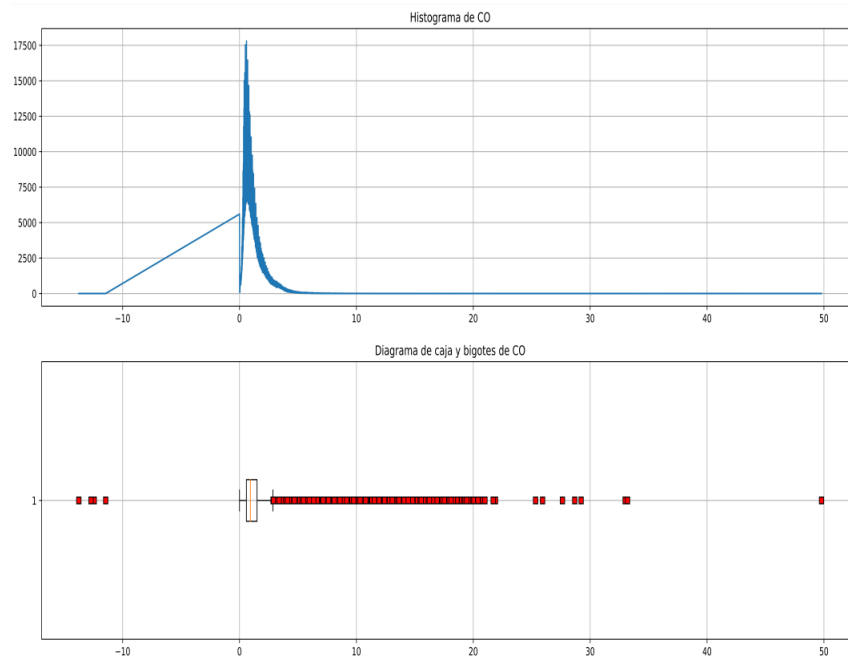


FIGURA A.1: Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica CO.

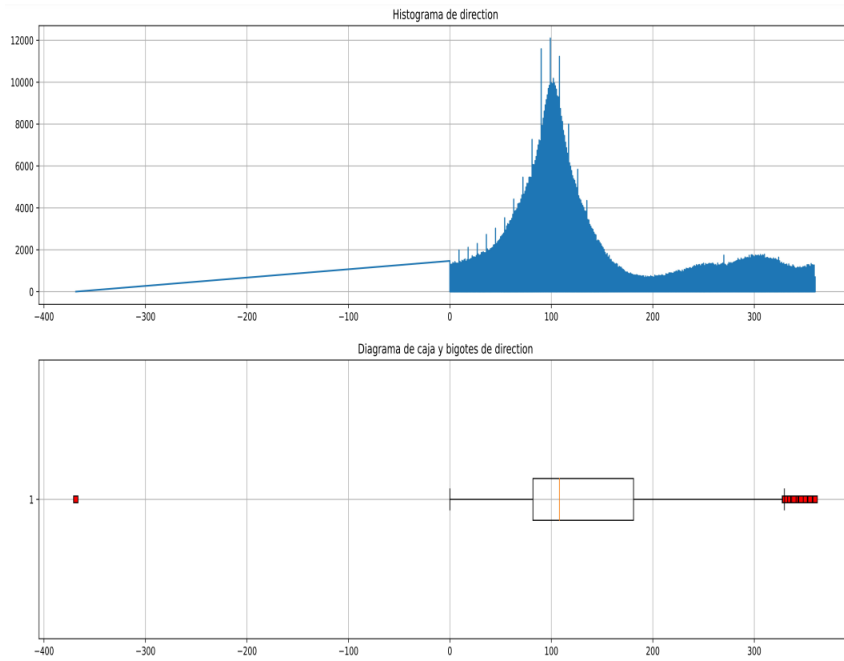


FIGURA A.2: Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica direction.

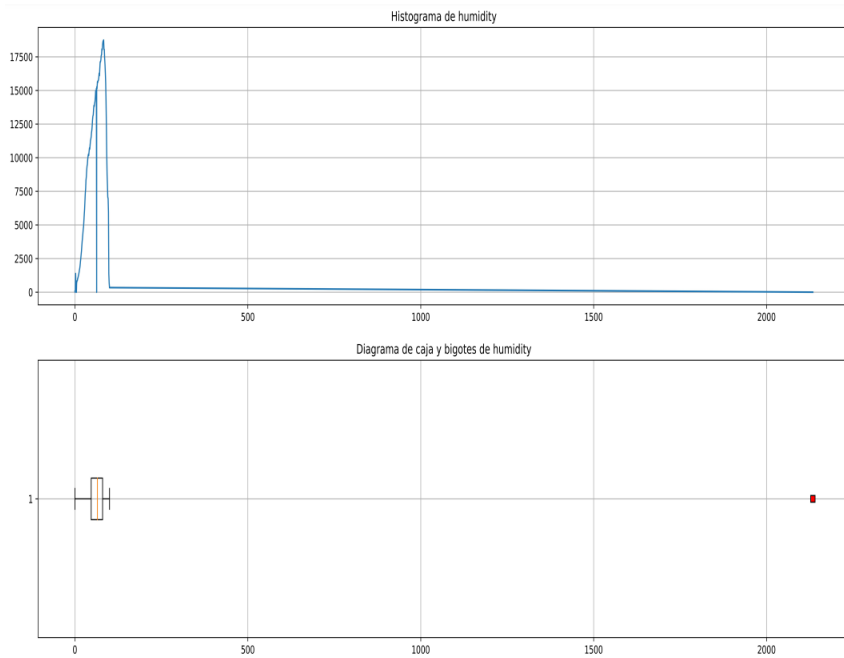


FIGURA A.3: Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica humidity.

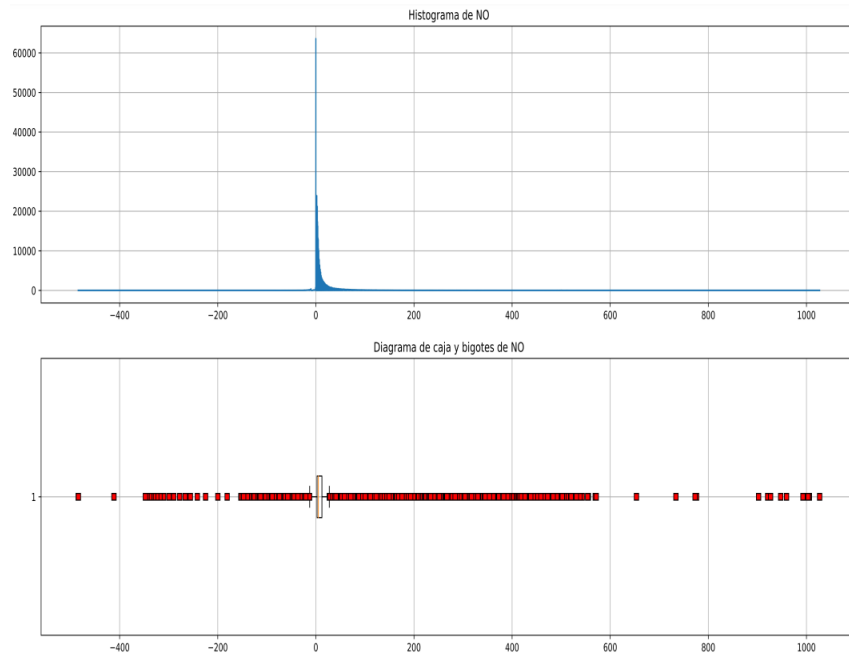


FIGURA A.4: Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica NO.

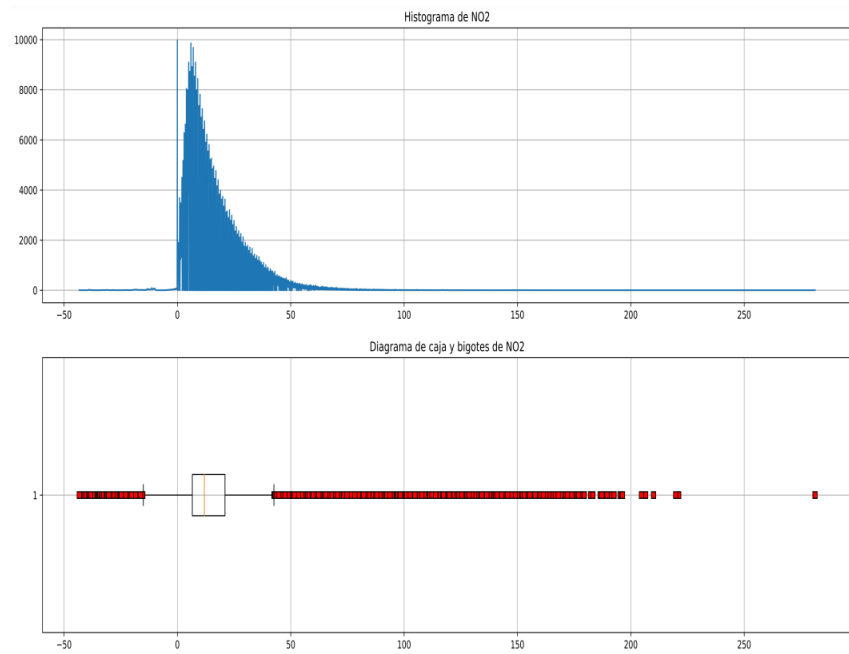


FIGURA A.5: Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica NO2.

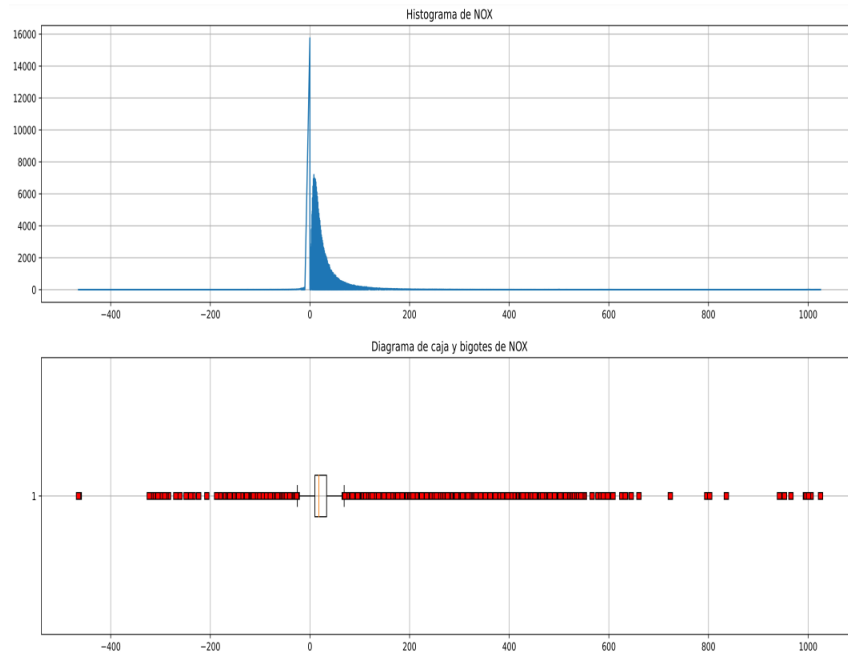


FIGURA A.6: Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica NOx.

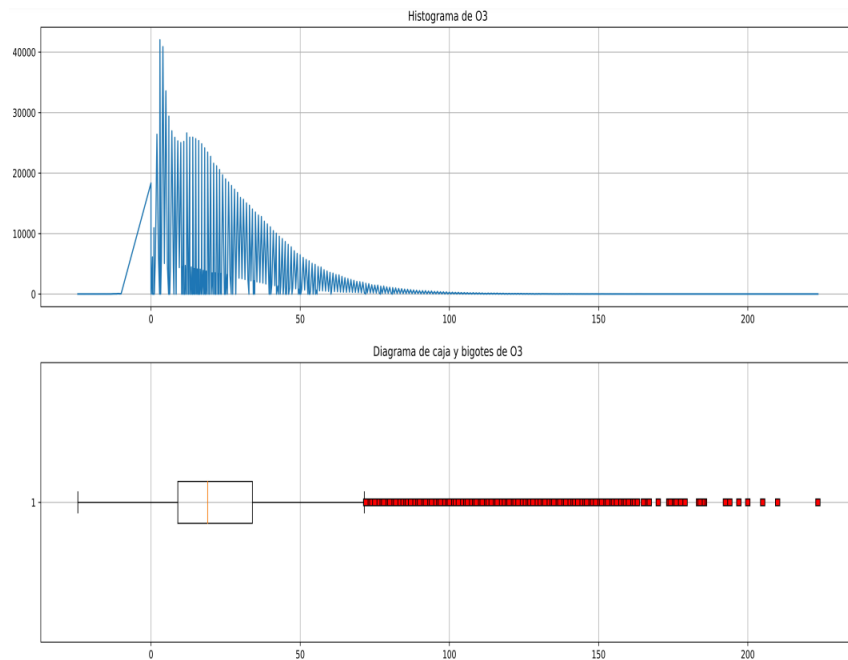


FIGURA A.7: Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica O3.

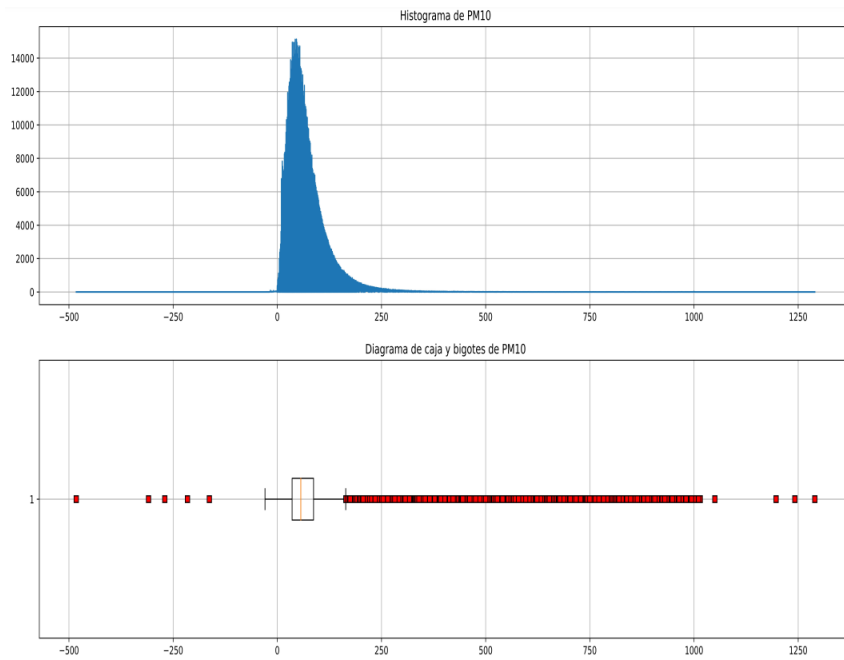


FIGURA A.8: Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica PM10.

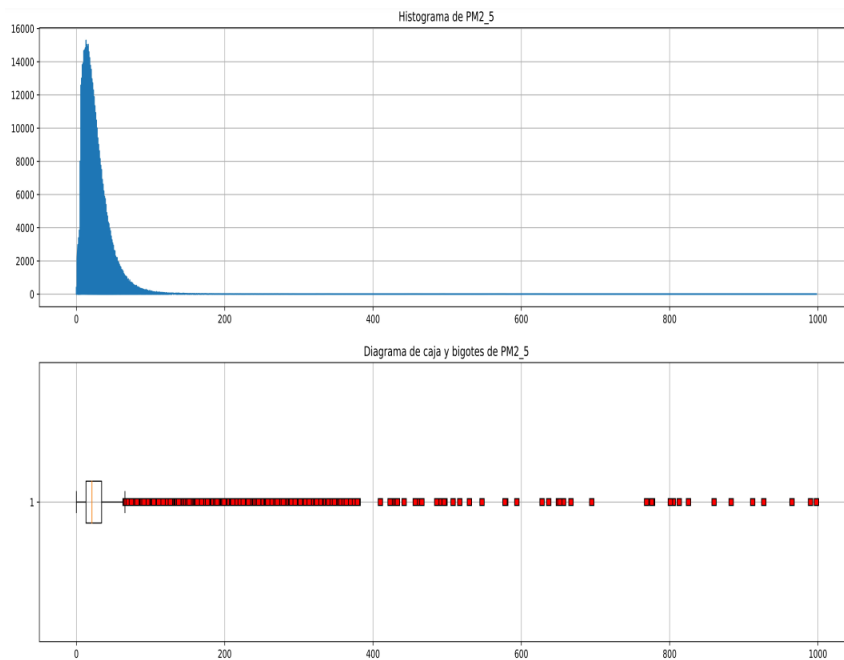


FIGURA A.9: Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica PM2.5.

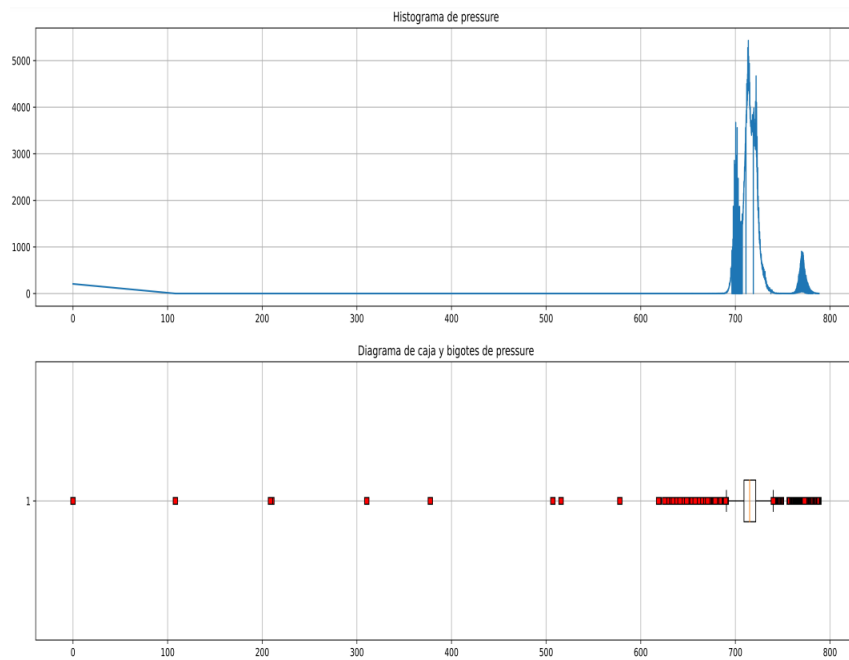


FIGURA A.10: Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica Pressure.

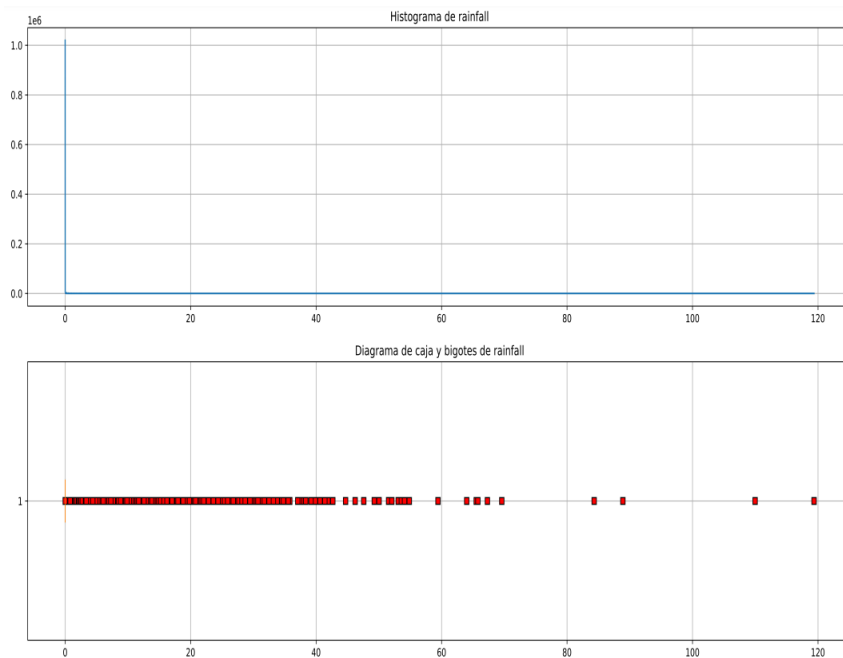


FIGURA A.11: Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica Rainfall.

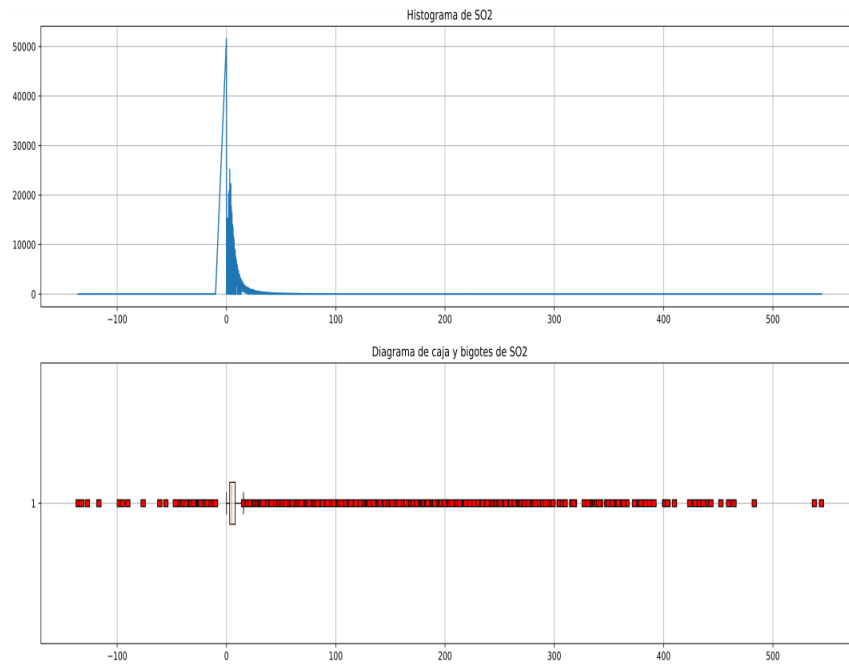


FIGURA A.12: Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica SO2.

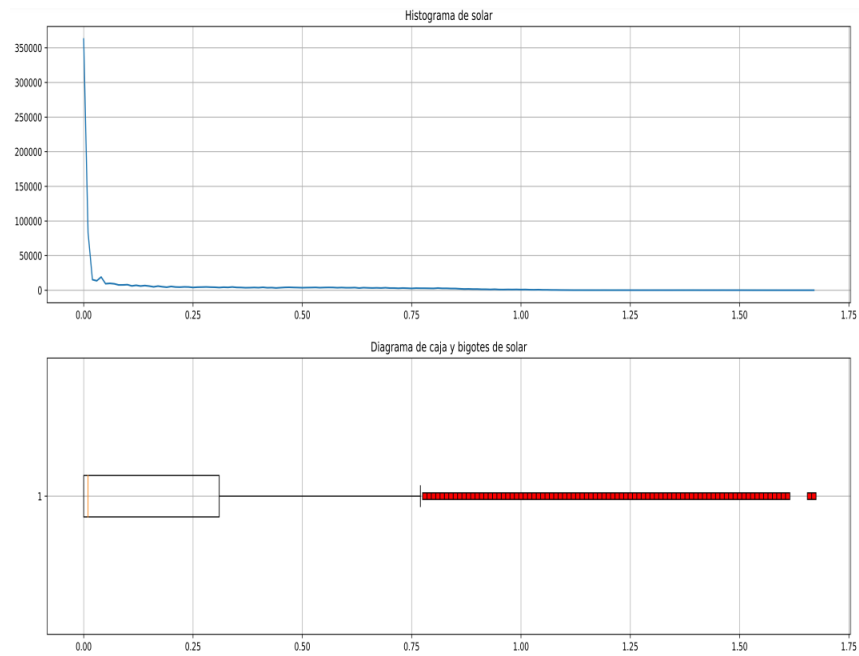


FIGURA A.13: Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica Solar.

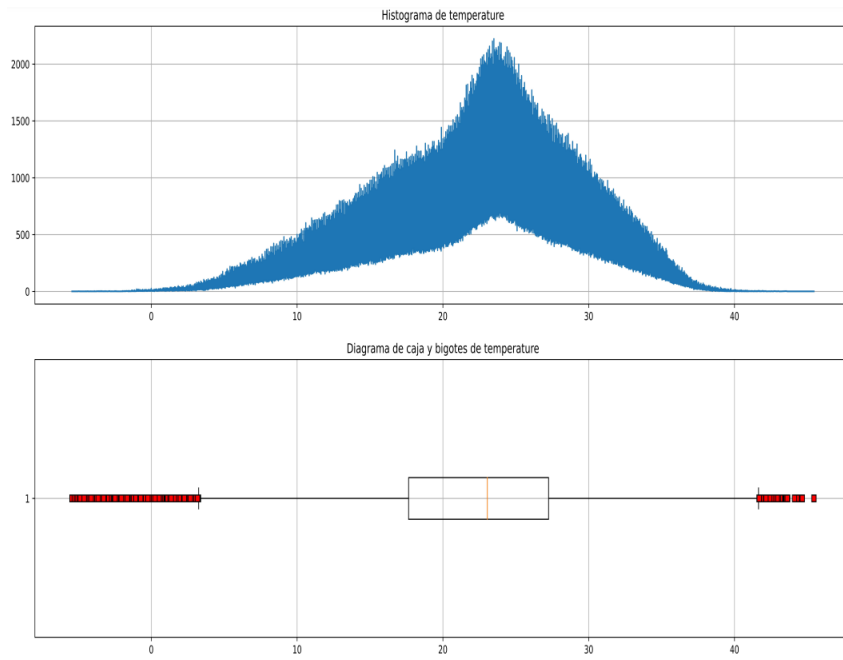


FIGURA A.14: Histograma y diagrama de caja y bigote de la característica Temperature.

A.2 HISTOGRAMAS Y DIAGRAMAS DE CAJAS Y BIGOTES DE VELOCIDAD EN CADA ESTACIÓN.

En esta sección se encuentran las gráficas de los histogramas y diagramas de cajas y bigotes de la característica de velocidad en cada estación sin antes de completar los datos faltantes.

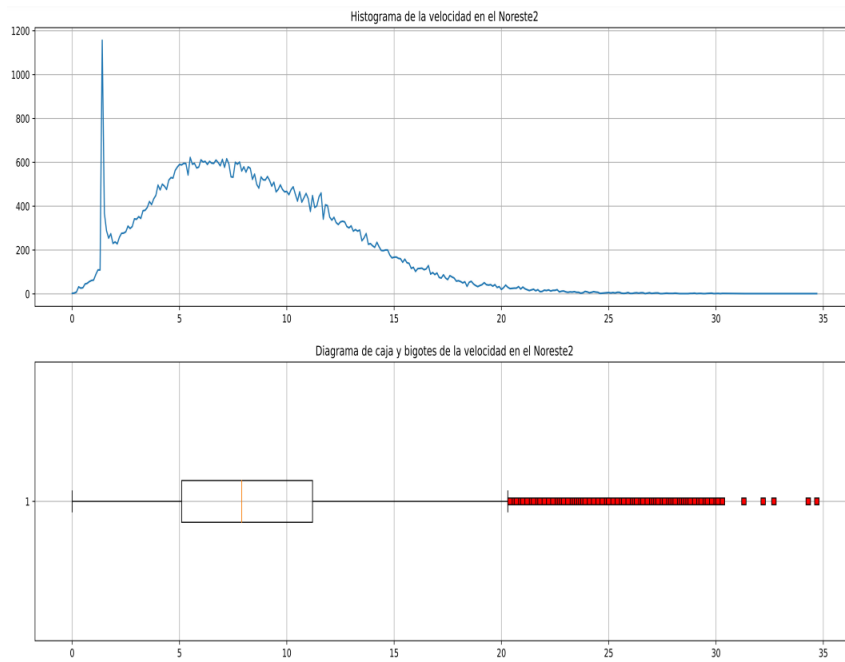


FIGURA A.15: Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Noreste2.

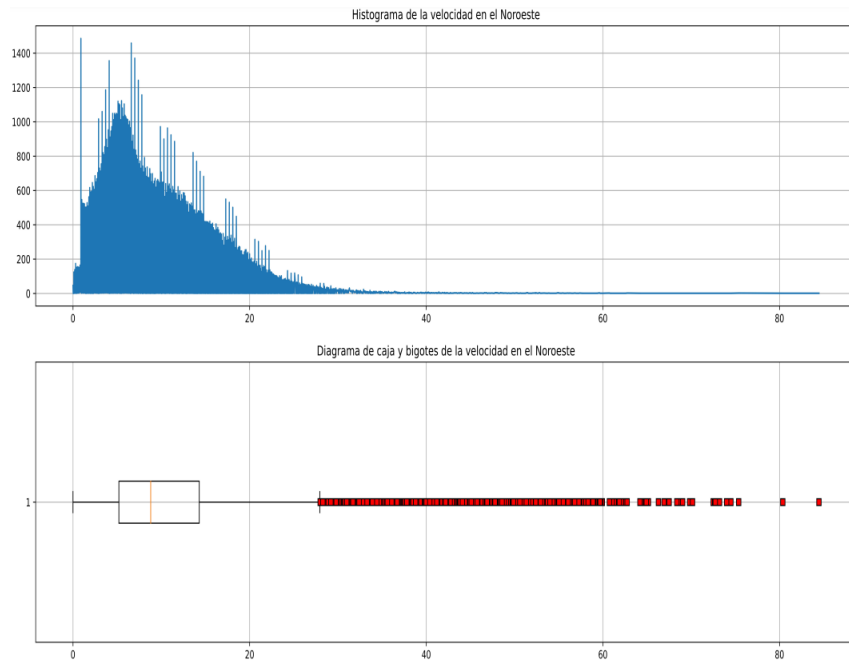


FIGURA A.16: Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Noroeste.

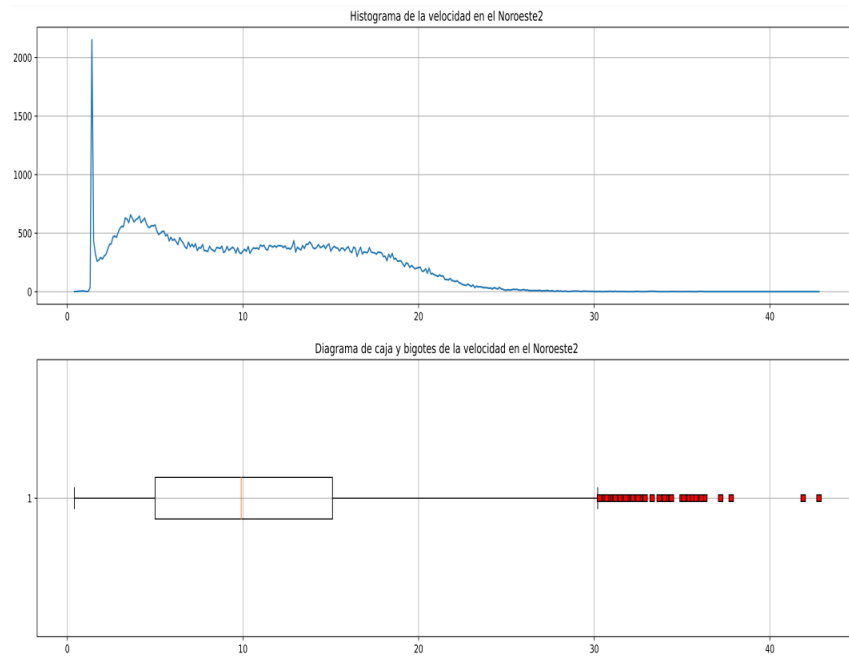


FIGURA A.17: Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Noroeste2.

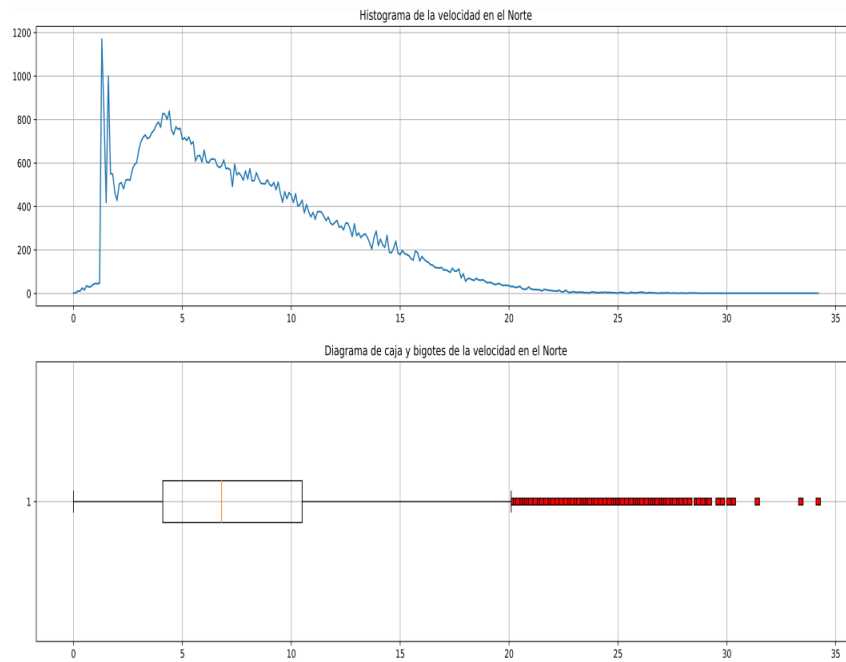


FIGURA A.18: Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Norte.

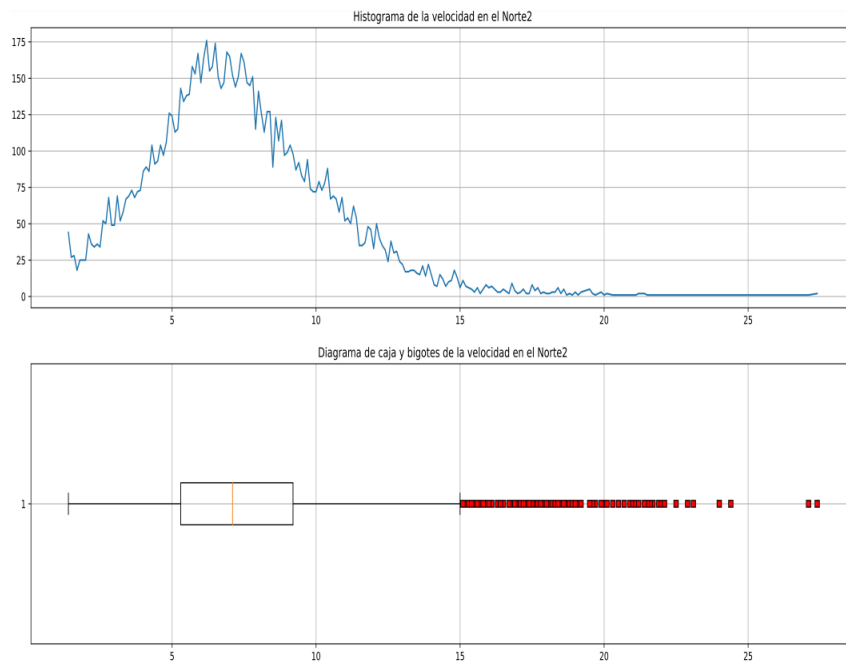


FIGURA A.19: Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Norte2.

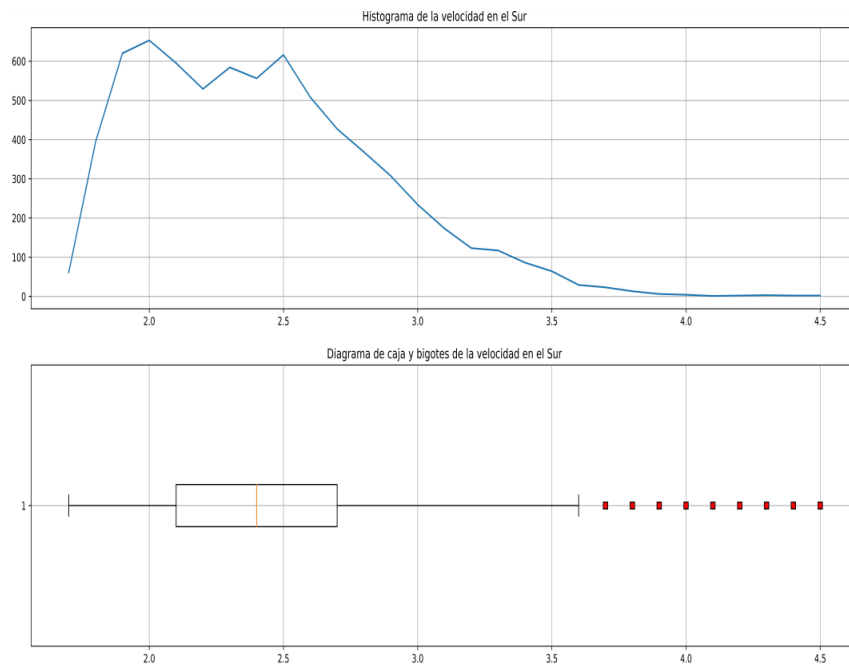


FIGURA A.20: Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Sur.

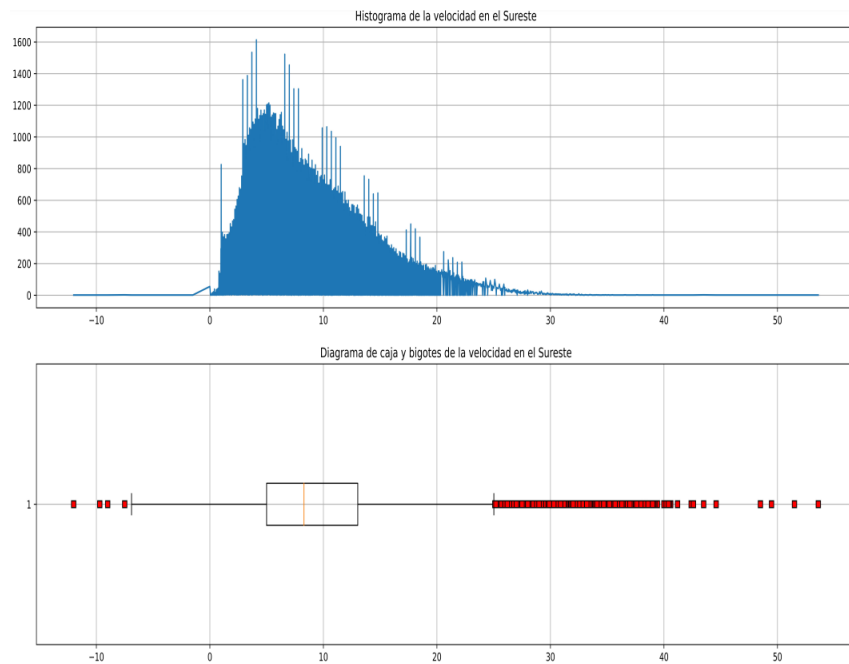


FIGURA A.21: Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Sureste.

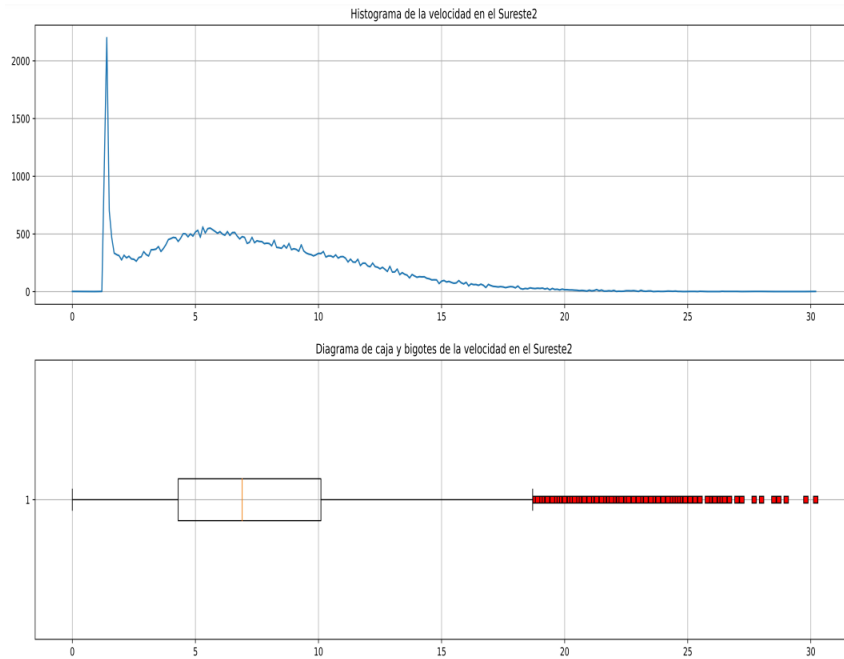


FIGURA A.22: Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Sureste2.

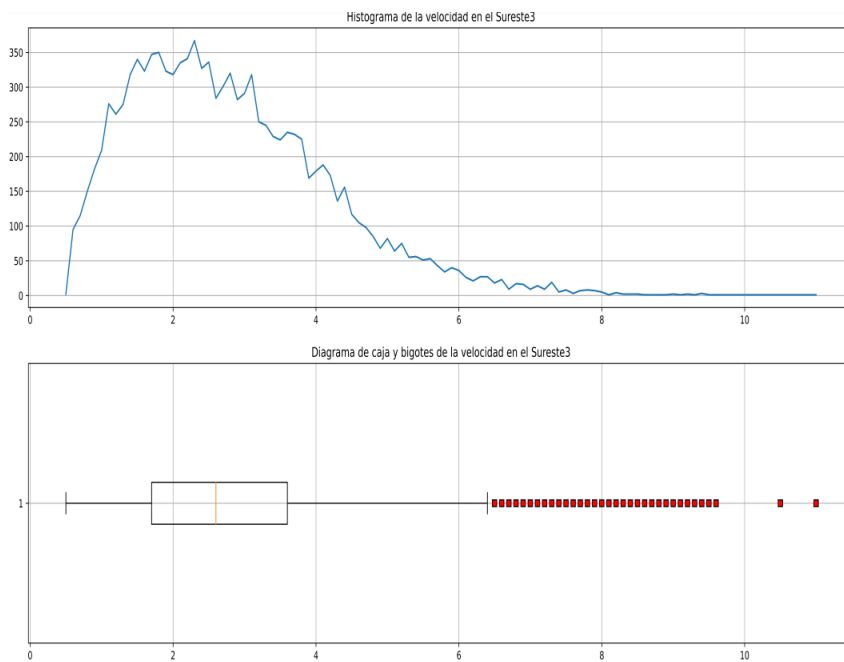


FIGURA A.23: Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Sureste3.

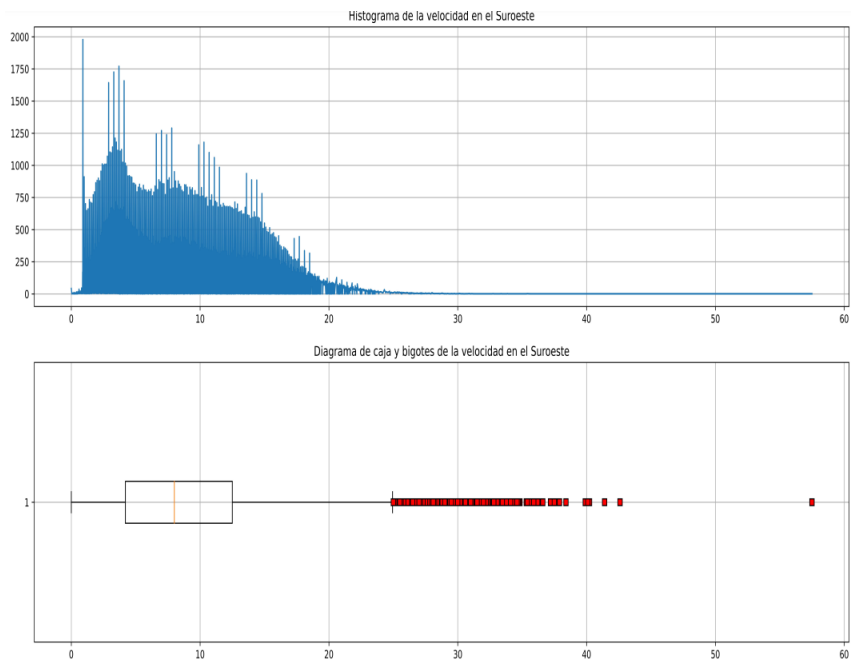


FIGURA A.24: Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Suroeste.

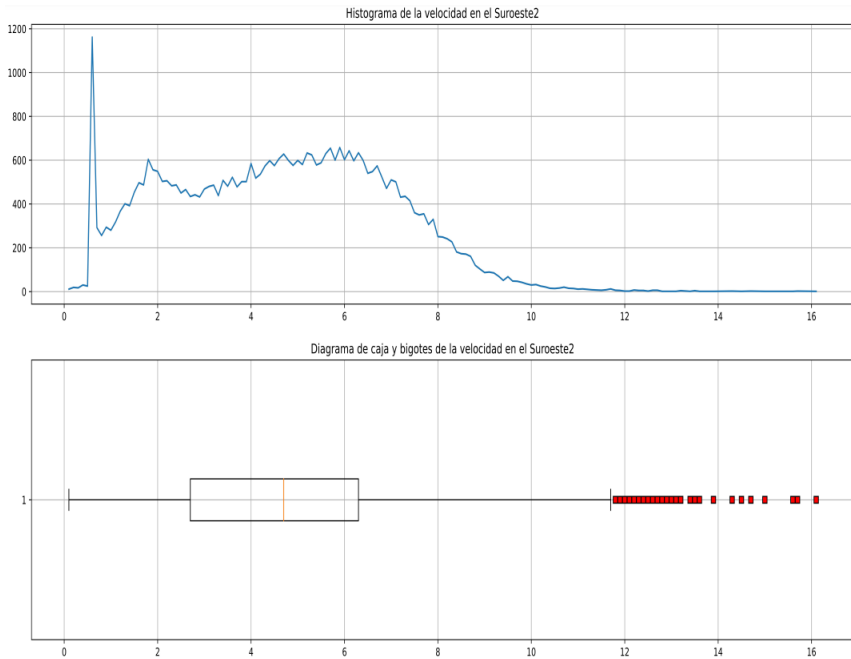


FIGURA A.25: Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Suroeste2.

A.3 HISTOGRAMAS Y DIAGRAMAS DE CAJAS Y BIGOTES DE VELOCIDAD EN CADA ESTACIÓN CON LOS DATOS COMPLETOS

En esta sección se encuentran las gráficas de los histogramas y diagramas de cajas y bigotes de la característica de velocidad en cada estación los datos completados.

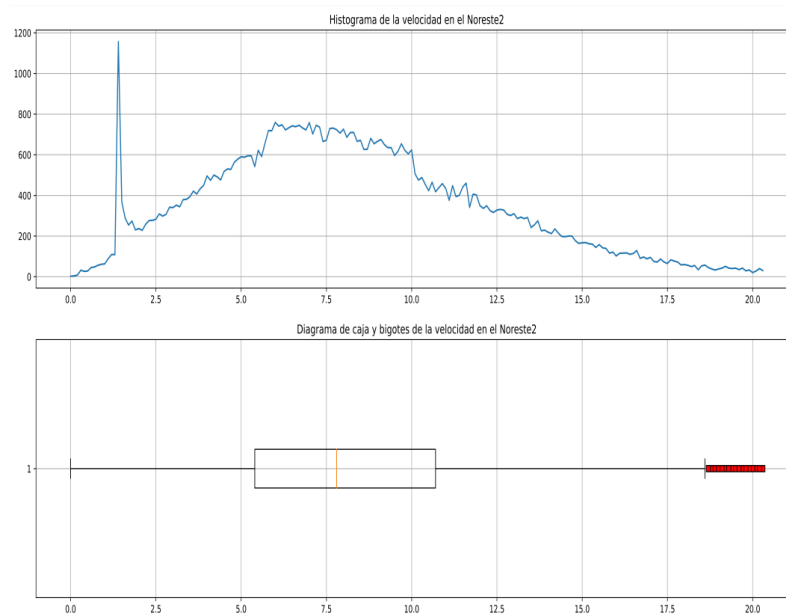


FIGURA A.26: Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Noreste2 - completado.

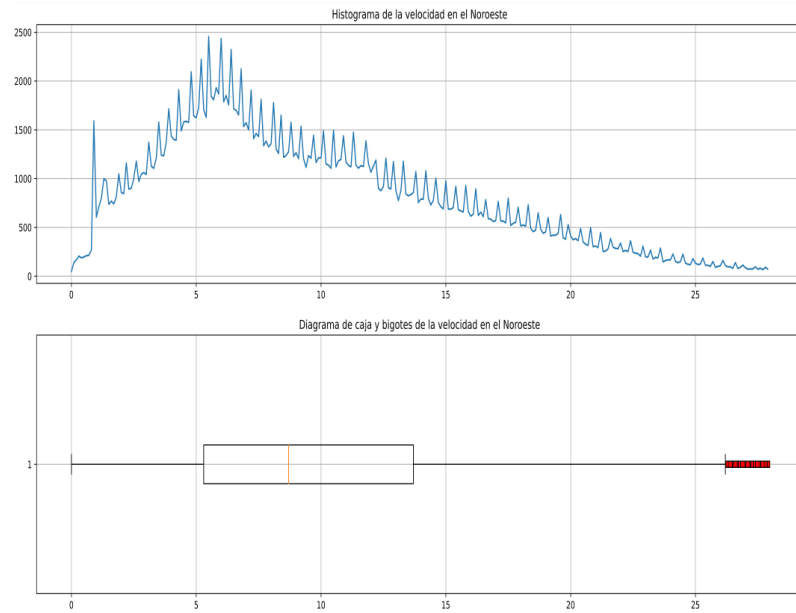


FIGURA A.27: Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Noroeste - completado.

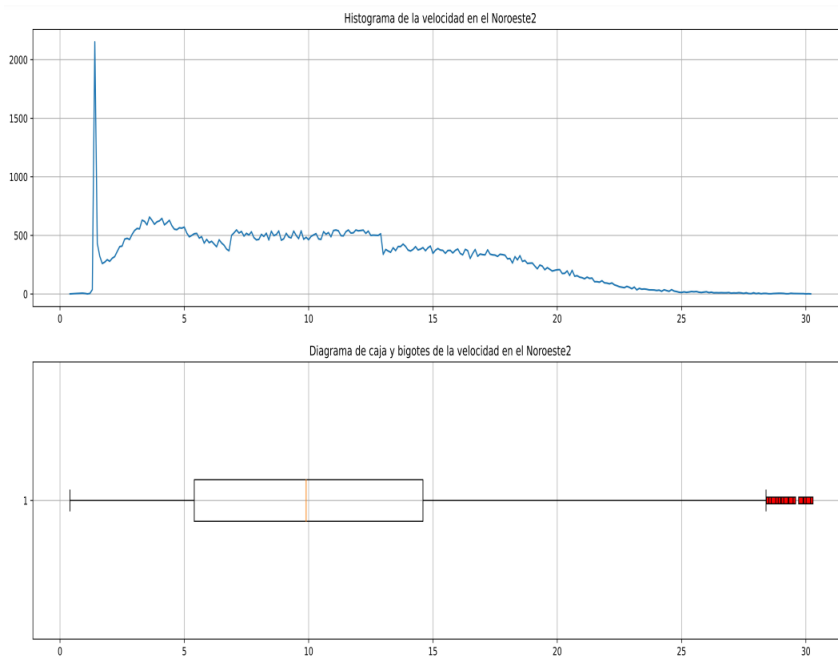


FIGURA A.28: Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Noroeste2 - Completado.

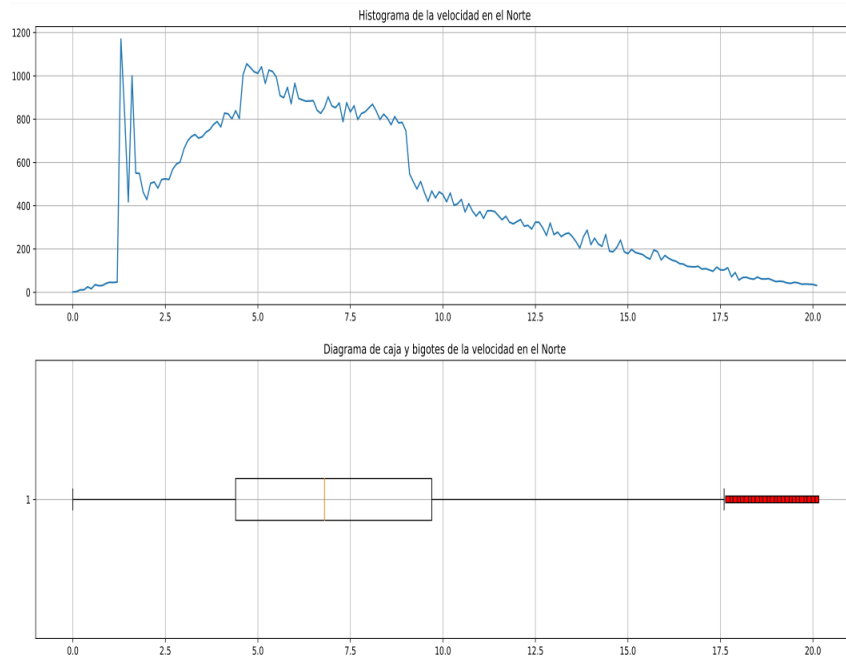


FIGURA A.29: Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Norte - Completado.

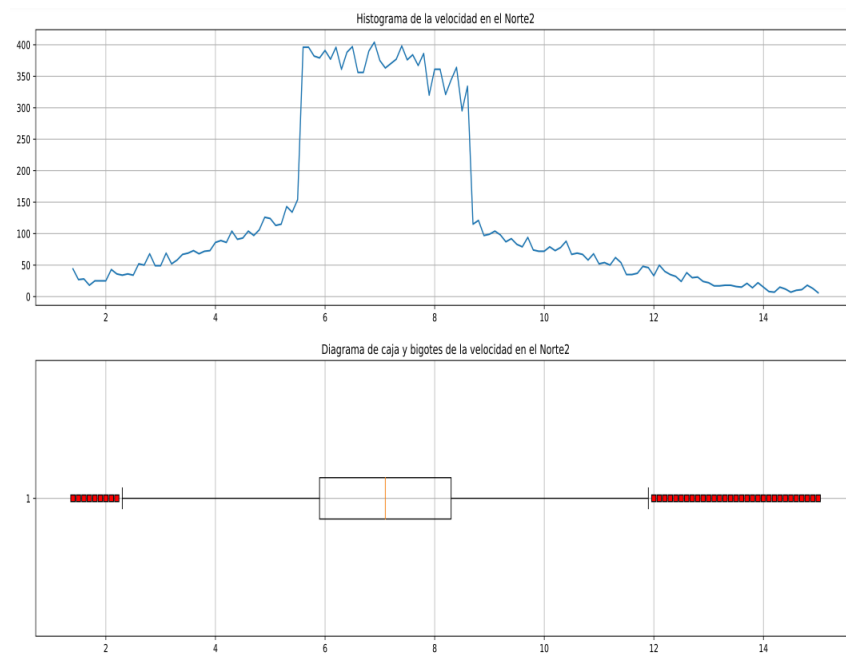


FIGURA A.30: Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Norte2 - Completado.

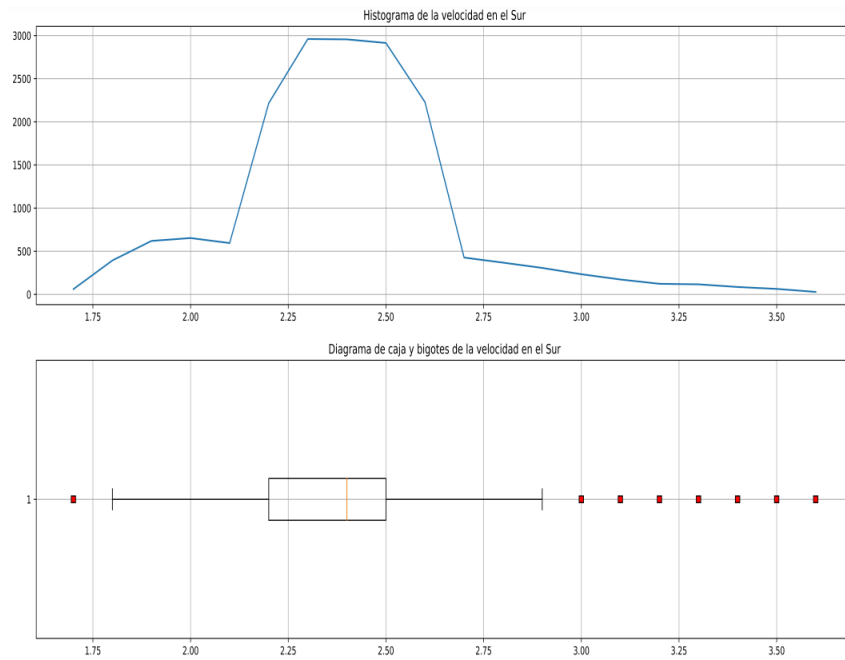


FIGURA A.31: Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Sur - Completado.

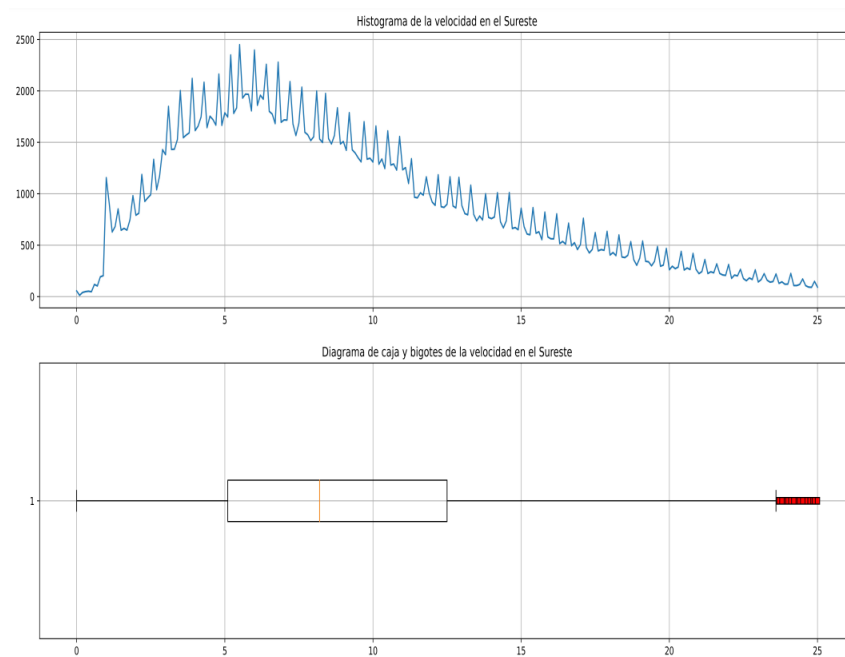


FIGURA A.32: Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Sureste - Completado.

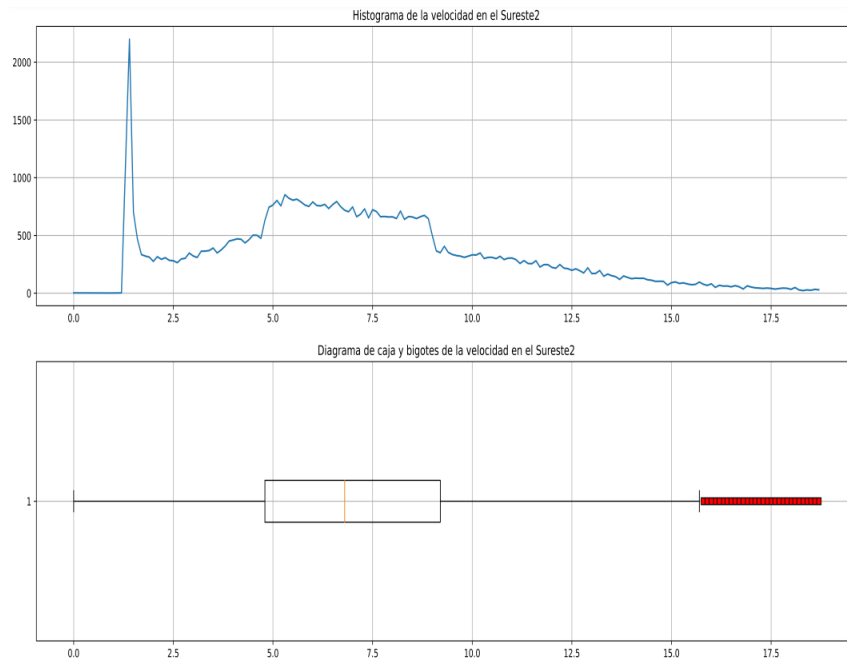


FIGURA A.33: Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Sureste2 - Completado.

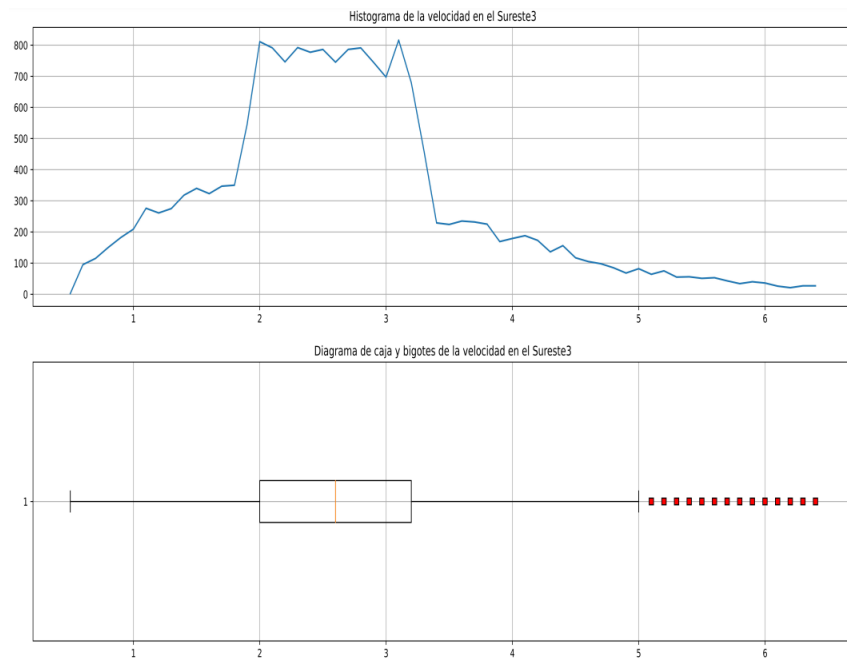


FIGURA A.34: Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Sureste3 - Completado.

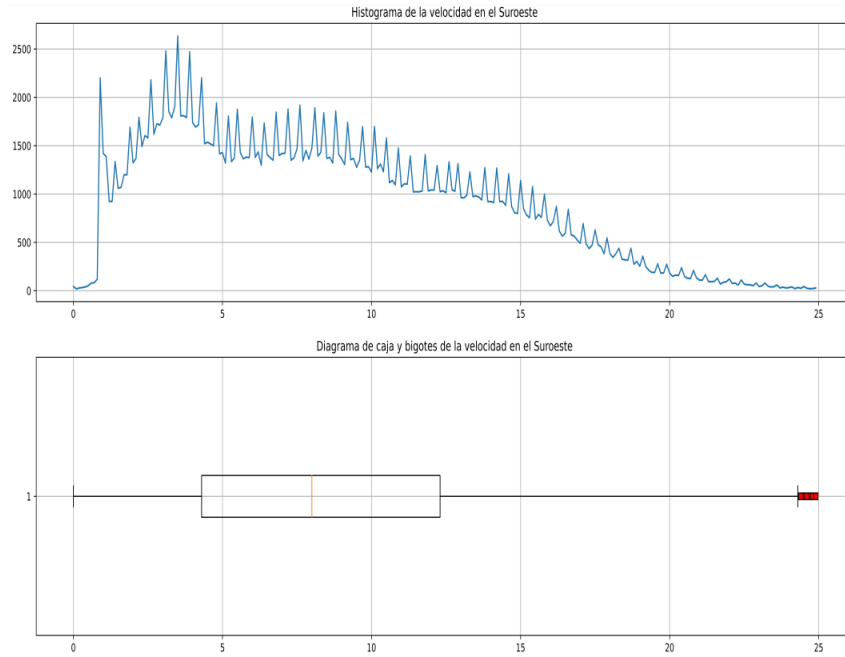


FIGURA A.35: Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Suroeste - Completado.

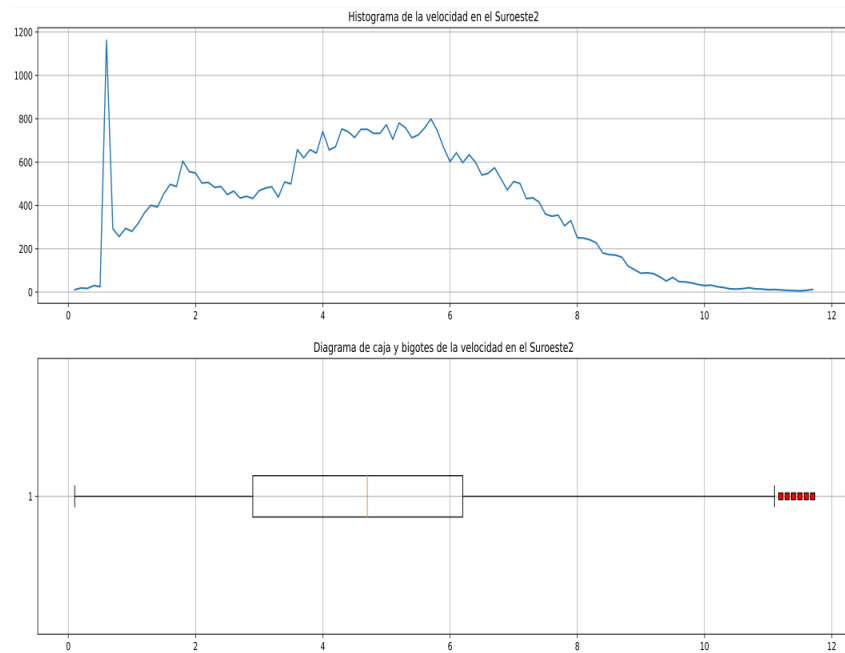


FIGURA A.36: Histograma y diagrama de caja y bigote de la velocidad en el Suroeste2 - Completado.

A.4 SEGUNDO MODELO DE OPTIMIZACIÓN IMPLEMENTANDO PULP

Maximizar función objetivo:

$$\begin{aligned}
 & 0.8783856934844444 * X_{(1.7.100', 'Centro')} + 1.598529872662115 * X_{(1.7.100', 'Noreste')} + 1.7809363669629155 * X_{(1.7.100', 'Noreste2')} + \\
 & 2.364332666528995 * X_{(1.7.100', 'Noroeste')} + 2.91177162976392 * X_{(1.7.100', 'Noroeste2')} + 1.1882709215176799 * X_{(1.7.100', 'Norte')} + \\
 & 1.3859407161599997 * X_{(1.7.100', 'Norte2')} + 0.04088010224212445 * X_{(1.7.100', 'Sur')} + 2.00385642308544 * X_{(1.7.100', 'Sureste')} + \\
 & 0.9183063421155554 * X_{(1.7.100', 'Sureste2')} + 0.05192570092247998 * X_{(1.7.100', 'Sureste3')} + 1.7683650979948802 * X_{(1.7.100', 'Suroeste')} + \\
 & 0.20573633572731553 * X_{(1.7.100', 'Suroeste2')} + 0.9500746710148147 * X_{(1.7.103', 'Centro')} + 1.728993031355318 * X_{(1.7.103', 'Noreste')} + \\
 & 1.9262865339126518 * X_{(1.7.103', 'Noreste2')} + 2.557296409748385 * X_{(1.7.103', 'Noroeste')} + 3.1494143105226 * X_{(1.7.103', 'Noroeste2')} + \\
 & 1.2852510158254 * X_{(1.7.103', 'Norte')} + 1.4990535247999999 * X_{(1.7.103', 'Norte2')} + 0.04421650987354815 * X_{(1.7.103', 'Sur')} + \\
 & 2.1674000909232 * X_{(1.7.103', 'Sureste')} + 0.993253421985185 * X_{(1.7.103', 'Sureste2')} + 0.05616358916939999 * X_{(1.7.103', 'Sureste3')} + \\
 & 1.9126892675664002 * X_{(1.7.103', 'Suroeste')} + 0.2225273964863185 * X_{(1.7.103', 'Suroeste2')} + 0.5906232298562963 * X_{(1.85.82.5', 'Centro')} + \\
 & 1.0748454618702101 * X_{(1.85.82.5', 'Noreste')} + 1.197494901188077 * X_{(1.85.82.5', 'Noreste2')} + 1.5897683743238638 * X_{(1.85.82.5', 'Noroeste')} + \\
 & 1.95786427002588 * X_{(1.85.82.5', 'Noroeste2')} + 0.7989888892965201 * X_{(1.85.82.5', 'Norte')} + 0.9319013142399999 * X_{(1.85.82.5', 'Norte2')} + \\
 & 0.027487626679482968 * X_{(1.85.82.5', 'Sur')} + 1.3473855067881602 * X_{(1.85.82.5', 'Sureste')} + 0.6174657235437037 * X_{(1.85.82.5', 'Sureste2')} + \\
 & 0.03491464560371999 * X_{(1.85.82.5', 'Sureste3')} + 1.1890420273123203 * X_{(1.85.82.5', 'Suroeste')} + 0.13833633676801038 * \\
 & X_{(1.85.82.5', 'Suroeste2')} + 0.6802064919496296 * X_{(1.85.87', 'Centro')} + 1.2378735275695167 * X_{(1.85.87', 'Noreste')} + \\
 & 1.3791259210425837 * X_{(1.85.87', 'Noreste2')} + 1.8308977944778901 * X_{(1.85.87', 'Noroeste')} + 2.2548249366213597 * X_{(1.85.87', 'Noroeste2')} + \\
 & 0.9201761834314399 * X_{(1.85.87', 'Norte')} + 1.0732482092799998 * X_{(1.85.87', 'Norte2')} + 0.031656834967736296 * X_{(1.85.87', 'Sur')} + \\
 & 1.5517513070035198 * X_{(1.85.87', 'Sureste')} + 0.7111203428503702 * X_{(1.85.87', 'Sureste2')} + 0.04021035306983999 * X_{(1.85.87', 'Sureste3')} + \\
 & 1.36939095059904 * X_{(1.85.87', 'Suroeste')} + 0.15931861394111702 * X_{(1.85.87', 'Suroeste2')} + 1.1819174953837037 * X_{(2MW.116', 'Centro')} + \\
 & 2.150912107753149 * X_{(2MW.116', 'Noreste')} + 2.396350334360083 * X_{(2MW.116', 'Noreste2')} + 3.181342961532776 * X_{(2MW.116', 'Noroeste')} + \\
 & 3.91795296452064 * X_{(2MW.116', 'Noroeste2')} + 1.5988855485865598 * X_{(2MW.116', 'Norte')} + 1.8648614067199998 * X_{(2MW.116', 'Norte2')} + \\
 & 0.05500648338359704 * X_{(2MW.116', 'Sur')} + 2.69630184354048 * X_{(2MW.116', 'Sureste')} + 1.235632979816296 * X_{(2MW.116', 'Sureste2')} + \\
 & 0.0698695942815997 * X_{(2MW.116', 'Sureste3')} + 2.3794349828889603 * X_{(2MW.116', 'Suroeste')} + 0.2768298441515496 * \\
 & X_{(2MW.116', 'Suroeste2')} + 1.4391478359762964 * X_{(2MW.127', 'Centro')} + 2.6190326459658895 * X_{(2MW.127', 'Noreste')} + \\
 & 2.917887594866157 * X_{(2MW.127', 'Noreste2')} + 3.8737245674681833 * X_{(2MW.127', 'Noroeste')} + 4.7706490109246396 * \\
 & X_{(2MW.127', 'Noroeste2')} + 1.94686404610256 * X_{(2MW.127', 'Norte')} + 2.2707263987199995 * X_{(2MW.127', 'Norte2')} + \\
 & 0.06697799282552297 * X_{(2MW.127', 'Sur')} + 3.28311999646848 * X_{(2MW.127', 'Sureste')} + 1.5045538592237033 * X_{(2MW.127', 'Sureste2')} + \\
 & 0.08507511070415996 * X_{(2MW.127', 'Sureste3')} + 2.897290817544961 * X_{(2MW.127', 'Suroeste')} + 0.3370785801042903 * \\
 & X_{(2MW.127', 'Suroeste2')} + 1.530520526525926 * X_{(2MW.132', 'Centro')} + 2.785317202365807 * X_{(2MW.132', 'Noreste')} + \\
 & 3.103146700011141 * X_{(2MW.132', 'Noreste2')} + 4.1196705553156745 * X_{(2MW.132', 'Noroeste')} + 5.0735414761038005 * \\
 & X_{(2MW.132', 'Noroeste2')} + 2.0704720602202 * X_{(2MW.132', 'Norte')} + 2.4148967023999997 * X_{(2MW.132', 'Norte2')} + \\
 & 0.07123048117945927 * X_{(2MW.132', 'Sur')} + 3.4915680099216004 * X_{(2MW.132', 'Sureste')} + 1.6000792324740738 * X_{(2MW.132', 'Sureste2')} + \\
 & 0.09047660009219997 * X_{(2MW.132', 'Sureste3')} + 3.0812422162032007 * X_{(2MW.132', 'Suroeste')} + 0.3584799789188074 * \\
 & X_{(2MW.132', 'Suroeste2')} + 2.1928327339125926 * X_{(4MW.158', 'Centro')} + 3.9906258229292195 * X_{(4MW.158', 'Noreste')} + \\
 & 4.445991768148954 * X_{(4MW.158', 'Noreste2')} + 5.902402672858927 * X_{(4MW.158', 'Noroeste')} + 7.269048426888359 * X_{(4MW.158', 'Noroeste2')} + \\
 & 2.9664410438244397 * X_{(4MW.158', 'Norte')} + 3.4599108252799993 * X_{(4MW.158', 'Norte2')} + 0.10205451549036593 * X_{(4MW.158', 'Sur')} + \\
 & 5.00249718454752 * X_{(4MW.158', 'Sureste')} + 2.2924920358874066 * X_{(4MW.158', 'Sureste2')} + 0.12962913394283995 * X_{(4MW.158', 'Sureste3')} + \\
 & 4.41460841308704 * X_{(4MW.158', 'Suroeste')} + 0.5136073764458207 * X_{(4MW.158', 'Suroeste2')} + 2.1928327339125926 * X_{(5MW.158', 'Centro')} + \\
 & 3.9906258229292195 * X_{(5MW.158', 'Noreste')} + 4.445991768148954 * X_{(5MW.158', 'Noreste2')} + 5.902402672858927 * X_{(5MW.158', 'Noroeste')} + \\
 & 7.269048426888359 * X_{(5MW.158', 'Noroeste2')} + 2.9664410438244397 * X_{(5MW.158', 'Norte')} + 3.4599108252799993 * X_{(5MW.158', 'Norte2')} + \\
 & 0.10205451549036593 * X_{(5MW.158', 'Sur')} + 5.00249718454752 * X_{(5MW.158', 'Sureste')} + 2.2924920358874066 * X_{(5MW.158', 'Sureste2')} + \\
 & 0.12962913394283995 * X_{(5MW.158', 'Sureste3')} + 4.41460841308704 * X_{(5MW.158', 'Suroeste')} + 0.5136073764458207 * X_{(5MW.158', 'Suroeste2')} + \\
 & 1.1018405719644444 * X_{(S111', 'Centro')} + 2.0051841489008346 * X_{(S111', 'Noreste')} + 2.2339935176112355 * X_{(S111', 'Noreste2')} + \\
 & 2.9658015572502756 * X_{(S111', 'Noroeste')} + 3.6525049779009597 * X_{(S111', 'Noroeste2')} + 1.49055832935984 * X_{(S111', 'Norte')} + \\
 & 1.7385138700799998 * X_{(S111', 'Norte2')} + 0.0512797004428445 * X_{(S111', 'Sur')} + 2.51362280115072 * X_{(S111', 'Sureste')} + \\
 & 1.1519167408355553 * X_{(S111', 'Sureste2')} + 0.06513521842223999 * X_{(S111', 'Sureste3')} + 2.21822421001344 * X_{(S111', 'Suroeste')} + \\
 & 0.25807415069843553 * X_{(S111', 'Suroeste2')} + 1.2649022400444445 * X_{(S120', 'Centro')} + 2.3019318639939548 * X_{(S120', 'Noreste')} + \\
 & 2.564602789705955 * X_{(S120', 'Noreste2')} + 3.4047112883171553 * X_{(S120', 'Noroeste')} + 4.1930401238387995 * X_{(S120', 'Noroeste2')} + \\
 & 1.7111464377852 * X_{(S120', 'Norte')} + 1.9957969824 * X_{(S120', 'Norte2')} + 0.05886859642964445 * X_{(S120', 'Sur')} + 2.8856144824416003 * \\
 & X_{(S120', 'Sureste')} + 1.322389193955552 * X_{(S120', 'Sureste2')} + 0.07477459605719998 * X_{(S120', 'Sureste3')} + 2.546499778243201 * \\
 & X_{(S120', 'Suroeste')} + 0.29626661027195555 * X_{(S120', 'Suroeste2')} + 1.4844427437762964 * X_{(S128', 'Centro')} + 2.70146256682509 * \\
 & X_{(S128', 'Noreste')} + 3.009723503781357 * X_{(S128', 'Noreste2')} + 3.9956439372089836 * X_{(S128', 'Noroeste')} + 4.9207976625740395 * \\
 & X_{(S128', 'Noroeste2')} + 2.00813852066516 * X_{(S128', 'Norte')} + 2.3421939299199996 * X_{(S128', 'Norte2')} + 0.06908601948812297 *
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & X_{-}('S128', 'Sur') + 3.38645101904928 * X_{-}('S128', 'Sureste') + 1.5519073184237033 * X_{-}('S128', 'Sureste2') + 0.08775271560275998 * \\
 & X_{-}('S128', 'Sureste3') + 2.9884784753865605 * X_{-}('S128', 'Suroeste') + 0.3476875966524903 * X_{-}('S128', 'Suroeste2') + 1.1415435158385185 * \\
 & X_{-}('SG.2.1.114', 'Centro') + 2.077437536320627 * X_{-}('SG.2.1.114', 'Noreste') + 2.3144916599936947 * X_{-}('SG.2.1.114', 'Noreste2') + \\
 & 3.0726691529490013 * X_{-}('SG.2.1.114', 'Noroeste') + 3.7841167589763596 * X_{-}('SG.2.1.114', 'Noroeste2') + 1.5442680539764397 * \\
 & X_{-}('SG.2.1.114', 'Norte') + 1.8011582492799996 * X_{-}('SG.2.1.114', 'Norte2') + 0.05312747690162519 * X_{-}('SG.2.1.114', 'Sur') + \\
 & 2.6041969073635203 * X_{-}('SG.2.1.114', 'Sureste') + 1.193424093961481 * X_{-}('SG.2.1.114', 'Sureste2') + 0.06748225481483998 * \\
 & X_{-}('SG.2.1.114', 'Sureste3') + 2.2981541323190404 * X_{-}('SG.2.1.114', 'Suroeste') + 0.2673734121172281 * X_{-}('SG.2.1.114', 'Suroeste2') + \\
 & 1.3074011658814815 * X_{-}('SG.2.2.122', 'Centro') + 2.3792735181334512 * X_{-}('SG.2.2.122', 'Noreste') + 2.650769815354785 * X_{-}('SG.2.2.122', 'Noreste2') + \\
 & 3.5191047710369183 * X_{-}('SG.2.2.122', 'Noroeste') + 4.3339203402012 * X_{-}('SG.2.2.122', 'Noroeste2') + 1.7686385373748 * X_{-}('SG.2.2.122', 'Norte') + \\
 & 2.0628529375999998 * X_{-}('SG.2.2.122', 'Norte2') + 0.06084649798961482 * X_{-}('SG.2.2.122', 'Sur') + 2.9825670468384 * X_{-}('SG.2.2.122', 'Sureste') + \\
 & 1.3668196001185182 * X_{-}('SG.2.2.122', 'Sureste2') + 0.07728691670279998 * X_{-}('SG.2.2.122', 'Sureste3') + 2.6320585683168005 * \\
 & X_{-}('SG.2.2.122', 'Suroeste') + 0.30622074925545184 * X_{-}('SG.2.2.122', 'Suroeste2') + 1.1415435158385185 * X_{-}('SG.2.6.114', 'Centro') + \\
 & 2.077437536320627 * X_{-}('SG.2.6.114', 'Noreste') + 2.3144916599936947 * X_{-}('SG.2.6.114', 'Noreste2') + 3.0726691529490013 * \\
 & X_{-}('SG.2.9.129', 'Noroeste') + 3.7841167589763596 * X_{-}('SG.2.6.114', 'Noroeste2') + 1.5442680539764397 * X_{-}('SG.2.6.114', 'Norte') + \\
 & 1.8011582492799996 * X_{-}('SG.2.6.114', 'Norte2') + 0.05312747690162519 * X_{-}('SG.2.6.114', 'Sur') + 2.6041969073635203 * X_{-}('SG.2.6.114', 'Sureste') + \\
 & 1.193424093961481 * X_{-}('SG.2.6.114', 'Sureste2') + 0.06748225481483998 * X_{-}('SG.2.6.114', 'Sureste3') + 2.2981541323190404 * \\
 & X_{-}('SG.2.6.114', 'Suroeste') + 0.2673734121172281 * X_{-}('SG.2.6.114', 'Suroeste2') + 1.4844427437762964 * X_{-}('SG.2.9.129', 'Centro') + \\
 & 2.70146256682509 * X_{-}('SG.2.9.129', 'Noreste') + 3.009723503781357 * X_{-}('SG.2.9.129', 'Noreste2') + 3.9956439372089836 * X_{-}('SG.2.9.129', 'Noroeste') + \\
 & 4.9207976625740395 * X_{-}('SG.2.9.129', 'Noroeste2') + 2.00813852066516 * X_{-}('SG.2.9.129', 'Norte') + 2.3421939299199996 * X_{-}('SG.2.9.129', 'Norte2') + \\
 & 0.06908601948812297 * X_{-}('SG.2.9.129', 'Sur') + 3.38645101904928 * X_{-}('SG.2.9.129', 'Sureste') + 1.5519073184237033 * X_{-}('SG.2.9.129', 'Sureste2') + \\
 & 0.08775271560275998 * X_{-}('SG.2.9.129', 'Sureste3') + 2.9884784753865605 * X_{-}('SG.2.9.129', 'Suroeste') + 0.3476875966524903 * \\
 & X_{-}('SG.2.9.129', 'Suroeste2') + 1.530520526525926 * X_{-}('SG.3.4.132', 'Centro') + 2.785317202365807 * X_{-}('SG.3.4.132', 'Noreste') + \\
 & 3.103146700011141 * X_{-}('SG.3.4.132', 'Noreste2') + 4.1196705553156745 * X_{-}('SG.3.4.132', 'Noroeste') + 5.0735414761038005 * \\
 & X_{-}('SG.3.4.132', 'Noroeste2') + 2.0704720602202 * X_{-}('SG.3.4.132', 'Norte') + 2.4148967023999997 * X_{-}('SG.3.4.132', 'Norte2') + \\
 & 0.07123048117945927 * X_{-}('SG.3.4.132', 'Sur') + 3.4915680099216004 * X_{-}('SG.3.4.132', 'Sureste') + 1.600079232470738 * X_{-}('SG.3.4.132', 'Sureste2') + \\
 & 0.09047660009219997 * X_{-}('SG.3.4.132', 'Sureste3') + 3.0812422162032007 * X_{-}('SG.3.4.132', 'Suroeste') + 0.3584799789188074 * \\
 & X_{-}('SG.3.4.132', 'Suroeste2') + 1.530520526525926 * X_{-}('SG.5.0.132', 'Centro') + 2.785317202365807 * X_{-}('SG.5.0.132', 'Noreste') + \\
 & 3.103146700011141 * X_{-}('SG.5.0.132', 'Noreste2') + 4.1196705553156745 * X_{-}('SG.5.0.132', 'Noroeste') + 5.0735414761038005 * \\
 & X_{-}('SG.5.0.132', 'Noroeste2') + 2.0704720602202 * X_{-}('SG.5.0.132', 'Norte') + 2.4148967023999997 * X_{-}('SG.5.0.132', 'Norte2') + \\
 & 0.07123048117945927 * X_{-}('SG.5.0.132', 'Sur') + 3.4915680099216004 * X_{-}('SG.5.0.132', 'Sureste') + 1.600079232470738 * X_{-}('SG.5.0.132', 'Sureste2') + \\
 & 0.09047660009219997 * X_{-}('SG.5.0.132', 'Sureste3') + 3.0812422162032007 * X_{-}('SG.5.0.132', 'Suroeste') + 0.3584799789188074 * \\
 & X_{-}('SG.5.0.132', 'Suroeste2') + 1.8724132009570373 * X_{-}('SG.5.0.145', 'Centro') + 3.4075104568511754 * X_{-}('SG.5.0.145', 'Noreste') + \\
 & 3.79633774582291 * X_{-}('SG.5.0.145', 'Noreste2') + 5.039936020248083 * X_{-}('SG.5.0.145', 'Noroeste') + 6.20688574299816 * X_{-}('SG.5.0.145', 'Noroeste2') + \\
 & 2.53298087191864 * X_{-}('SG.5.0.145', 'Norte') + 2.95434421568 * X_{-}('SG.5.0.145', 'Norte2') + 0.08714217872901038 * X_{-}('SG.5.0.145', 'Sur') + \\
 & 4.27152587666112 * X_{-}('SG.5.0.145', 'Sureste') + 1.9575101578429626 * X_{-}('SG.5.0.145', 'Sureste2') + 0.11068755854903999 * \\
 & X_{-}('SG.5.0.145', 'Sureste3') + 3.7695401668742408 * X_{-}('SG.5.0.145', 'Suroeste') + 0.43855840753077624 * X_{-}('SG.5.0.145', 'Suroeste2') + \\
 & 2.1375841303244445 * X_{-}('SG.5.8.155', 'Centro') + 3.8900816725478746 * X_{-}('SG.5.8.155', 'Noreste') + 4.333974634805475 * X_{-}('SG.5.8.155', 'Noreste2') + \\
 & 5.753691145323236 * X_{-}('SG.5.8.155', 'Noroeste') + 7.08590414561724 * X_{-}('SG.5.8.155', 'Noroeste2') + 2.89170131435596 * X_{-}('SG.5.8.155', 'Norte') + \\
 & 3.37273808352 * X_{-}('SG.5.8.155', 'Norte2') + 0.09948324346240446 * X_{-}('SG.5.8.155', 'Sur') + 4.87645885083168 * X_{-}('SG.5.8.155', 'Sureste') + \\
 & 2.234732507875555 * X_{-}('SG.5.8.155', 'Sureste2') + 0.12636311710355996 * X_{-}('SG.5.8.155', 'Sureste3') + 4.303381985991361 * \\
 & X_{-}('SG.5.8.155', 'Suroeste') + 0.5006669957672756 * X_{-}('SG.5.8.155', 'Suroeste2') + 2.5385279438133335 * X_{-}('SG.5.8.170', 'Centro') + \\
 & 4.619739120153385 * X_{-}('SG.5.8.170', 'Noreste') + 5.146892495202986 * X_{-}('SG.5.8.170', 'Noreste2') + 6.832903344139947 * X_{-}('SG.5.8.170', 'Noroeste') + \\
 & 8.414997765773041 * X_{-}('SG.5.8.170', 'Noroeste2') + 3.4340938854861602 * X_{-}('SG.5.8.170', 'Norte') + 4.00535808192 * X_{-}('SG.5.8.170', 'Norte2') + \\
 & 0.11814318317949334 * X_{-}('SG.5.8.170', 'Sur') + 5.79112975441728 * X_{-}('SG.5.8.170', 'Sureste') + 2.653898313386666 * X_{-}('SG.5.8.170', 'Sureste2') + \\
 & 0.15006487898375995 * X_{-}('SG.5.8.170', 'Sureste3') + 5.110561623922561 * X_{-}('SG.5.8.170', 'Suroeste') + 0.5945764385457866 * \\
 & X_{-}('SG.5.8.170', 'Suroeste2') + 1.2649022400444445 * X_{-}('SWT_DD_120', 'Centro') + 2.3019318639939548 * X_{-}('SWT_DD_120', 'Noreste') + \\
 & 2.564602789705955 * X_{-}('SWT_DD_120', 'Noreste2') + 3.4047112883171553 * X_{-}('SWT_DD_120', 'Noroeste') + 4.1930401238387995 * \\
 & X_{-}('SWT_DD_120', 'Noroeste2') + 1.7111464377852 * X_{-}('SWT_DD_120', 'Norte') + 1.9957969824 * X_{-}('SWT_DD_120', 'Norte2') + \\
 & 0.058868596429644454 * X_{-}('SWT_DD_120', 'Sur') + 2.8856144824416003 * X_{-}('SWT_DD_120', 'Sureste') + 1.322389193955552 * \\
 & X_{-}('SWT_DD_120', 'Sureste2') + 0.07477459605719998 * X_{-}('SWT_DD_120', 'Sureste3') + 2.546499778243201 * X_{-}('SWT_DD_120', 'Suroeste') + \\
 & 0.29626661027195555 * X_{-}('SWT_DD_120', 'Suroeste2') + 1.4844427437762964 * X_{-}('SWT_DD_130', 'Centro') + 2.70146256682509 * \\
 & X_{-}('SWT_DD_130', 'Noreste') + 3.009723503781357 * X_{-}('SWT_DD_130', 'Noreste2') + 3.9956439372089836 * X_{-}('SWT_DD_130', 'Noroeste') + \\
 & 4.9207976625740395 * X_{-}('SWT_DD_130', 'Noroeste2') + 2.00813852066516 * X_{-}('SWT_DD_130', 'Norte') + 2.3421939299199996 * \\
 & X_{-}('SWT_DD_130', 'Norte2') + 0.06908601948812297 * X_{-}('SWT_DD_130', 'Sur') + 3.38645101904928 * X_{-}('SWT_DD_130', 'Sureste') + \\
 & 1.5519073184237033 * X_{-}('SWT_DD_130', 'Sureste2') + 0.08775271560275998 * X_{-}('SWT_DD_130', 'Sureste3') + 2.9884784753865605 * \\
 & X_{-}('SWT_DD_130', 'Suroeste') + 0.3476875966524903 * X_{-}('SWT_DD_130', 'Suroeste2') + 1.7711986538977778 * X_{-}('SWT_DD_142', 'Centro') + \\
 & 3.2233152015979014 * X_{-}('SWT_DD_142', 'Noreste') + 3.5911241715803017 * X_{-}('SWT_DD_142', 'Noreste2') + 4.767498910086542 * \\
 & X_{-}('SWT_DD_142', 'Noroeste') + 5.8713683856087595 * X_{-}('SWT_DD_142', 'Noroeste2') + 2.3960588978960398 * X_{-}('SWT_DD_142', 'Norte') + \\
 & 2.7946451644799994 * X_{-}('SWT_DD_142', 'Norte2') + 0.08243165001381779 * X_{-}('SWT_DD_142', 'Sur') + 4.04062569040032 * \\
 & X_{-}('SWT_DD_142', 'Sureste') + 1.8516956379022218 * X_{-}('SWT_DD_142', 'Sureste2') + 0.10470426859043998 * X_{-}('SWT_DD_142', 'Sureste3') + \\
 & 3.5657751536726403 * X_{-}('SWT_DD_142', 'Suroeste') + 0.4148518396885022 * X_{-}('SWT_DD_142', 'Suroeste2') + 1.0628086637614815 * \\
 & X_{-}('V100.1.2, 0MW', 'Centro') + 1.9341519454937712 * X_{-}('V100.1.2, 0MW', 'Noreste') + 2.1548559072127054 * X_{-}('V100.1.2, 0MW', 'Noreste2') +
 \end{aligned}$$

$2.8607401744365983 * X_{-}(V100.1.2, 0MW', 'Noroeste') + 3.52311762129444 * X_{-}(V100.1.2, 0MW', 'Noroeste2') + 1.4377563747367599 * X_{-}(V100.1.2, 0MW', 'Norte') + 1.6769282691199998 * X_{-}(V100.1.2, 0MW', 'Norte2') + 0.04946315401157483 * X_{-}(V100.1.2, 0MW', 'Sur') + 2.24257952490208 * X_{-}(V100.1.2, 0MW', 'Sureste') + 1.1111109204385183 * X_{-}(V100.1.2, 0MW', 'Sureste2') + 0.06282785025035999 * X_{-}(V100.1.2, 0MW', 'Sureste3') + 2.1396452159721604 * X_{-}(V100.1.2, 0MW', 'Suroeste') + 0.24893205989517186 * X_{-}(V100.1.2, 0MW', 'Suroeste2') - 0.878385693484444 * X_{-}(V100.2, 0MW', 'Centro') + 1.598529872662115 * X_{-}(V100.2, 0MW', 'Noreste') + 1.7809363669629155 * X_{-}(V100.2, 0MW', 'Noreste2') + 2.364332666528995 * X_{-}(V100.2, 0MW', 'Noroeste') + 2.91177162976392 * X_{-}(V100.2, 0MW', 'Noroeste2') + 1.1882709215176799 * X_{-}(V100.2, 0MW', 'Norte') + 1.3859407161599997 * X_{-}(V100.2, 0MW', 'Norte2') + 0.04088010224212445 * X_{-}(V100.2, 0MW', 'Sur') + 2.00385642308544 * X_{-}(V100.2, 0MW', 'Sureste') + 0.9183063421155554 * X_{-}(V100.2, 0MW', 'Sureste2') + 0.05192570092247998 * X_{-}(V100.2, 0MW', 'Sureste3') + 1.7683650979948802 * X_{-}(V100.2, 0MW', 'Suroeste') + 0.20573633572731553 * X_{-}(V100.2, 0MW', 'Suroeste2') + 0.9869816329259259 * X_{-}(V105.3, 45MW', 'Centro') + 1.7961581520554066 * X_{-}(V105.3, 45MW', 'Noreste') + 2.0011157930287404 * X_{-}(V105.3, 45MW', 'Noreste2') + 2.656638118426074 * X_{-}(V105.3, 45MW', 'Noroeste') + 3.271757656311 * X_{-}(V105.3, 45MW', 'Noroeste2') + 1.335178365469 * X_{-}(V105.3, 45MW', 'Norte') + 1.5572863279999998 * X_{-}(V105.3, 45MW', 'Norte2') + 0.04593416122825926 * X_{-}(V105.3, 45MW', 'Sur') + 2.251595738952 * X_{-}(V105.3, 45MW', 'Sureste') + 1.0318377220740738 * X_{-}(V105.3, 45MW', 'Sureste2') + 0.05834534130899998 * X_{-}(V105.3, 45MW', 'Sureste3') + 1.9869903221040004 * X_{-}(V105.3, 45MW', 'Suroeste') + 0.2311717803404074 * X_{-}(V105.3, 45MW', 'Suroeste2') + 1.1819174953837037 * X_{-}(V116.2, 1MW', 'Centro') + 2.150912107753149 * X_{-}(V116.2, 1MW', 'Noreste') + 2.396350334360083 * X_{-}(V116.2, 1MW', 'Noreste2') + 3.181342961532776 * X_{-}(V116.2, 1MW', 'Noroeste') + 3.91795296452064 * X_{-}(V116.2, 1MW', 'Noroeste2') + 1.5988855485865598 * X_{-}(V116.2, 1MW', 'Norte') + 1.8648614067199998 * X_{-}(V116.2, 1MW', 'Norte2') + 0.05500648338359704 * X_{-}(V116.2, 1MW', 'Sur') + 2.69630184350408 * X_{-}(V116.2, 1MW', 'Sureste') + 1.235632979816296 * X_{-}(V116.2, 1MW', 'Sureste2') + 0.06986895942815997 * X_{-}(V116.2, 1MW', 'Sureste3') + 2.3794349828889603 * X_{-}(V116.2, 1MW', 'Suroeste') + 0.2768298441515496 * X_{-}(V116.2, 1MW', 'Suroeste2') + 1.264902240044445 * X_{-}(V120.2, 2MW', 'Centro') + 2.3019318639939548 * X_{-}(V120.2, 2MW', 'Noreste') + 2.564602789705955 * X_{-}(V120.2, 2MW', 'Noreste2') + 3.4047112883171553 * X_{-}(V120.2, 2MW', 'Noroeste') + 4.1930401238387995 * X_{-}(V120.2, 2MW', 'Noroeste2') + 1.7111464377852 * X_{-}(V120.2, 2MW', 'Norte') + 1.9957969824 * X_{-}(V120.2, 2MW', 'Norte2') + 0.05886859642964445 * X_{-}(V120.2, 2MW', 'Sur') + 2.8856144824416003 * X_{-}(V120.2, 2MW', 'Sureste') + 1.322389193955552 * X_{-}(V120.2, 2MW', 'Sureste2') + 0.07477459605719998 * X_{-}(V120.2, 2MW', 'Sureste3') + 2.546499778243201 * X_{-}(V120.2, 2MW', 'Suroeste') + 0.29626661027195555 * X_{-}(V120.2, 2MW', 'Suroeste2') + 1.6727800888014817 * X_{-}(V138.3, 0MW', 'Centro') + 3.0442082130643313 * X_{-}(V138.3, 0MW', 'Noreste') + 3.391579480604065 * X_{-}(V138.3, 0MW', 'Noreste2') + 4.502587686946039 * X_{-}(V138.3, 0MW', 'Noroeste') + 5.4511946350636 * X_{-}(V138.3, 0MW', 'Noroeste2') + 2.26291929884644 * X_{-}(V138.3, 0MW', 'Norte') + 2.63935768928 * X_{-}(V138.3, 0MW', 'Norte2') + 0.07785124640125483 * X_{-}(V138.3, 0MW', 'Sur') + 3.8161039623235204 * X_{-}(V138.3, 0MW', 'Sureste') + 1.7488041709985185 * X_{-}(V138.3, 0MW', 'Sureste2') + 0.09888626288483997 * X_{-}(V138.3, 0MW', 'Sureste3') + 3.3676390082390406 * X_{-}(V138.3, 0MW', 'Suroeste') + 0.3918001494109319 * X_{-}(V138.3, 0MW', 'Suroeste2') + 1.9763118907007409 * X_{-}(V150.5, 6MW', 'Centro') + 3.596590448155365 * X_{-}(V150.5, 6MW', 'Noreste') + 4.006993448001233 * X_{-}(V150.5, 6MW', 'Noreste2') + 5.319597981949819 * X_{-}(V150.5, 6MW', 'Noroeste') + 6.551300798263081 * X_{-}(V150.5, 6MW', 'Noroeste2') + 2.6735339259153204 * X_{-}(V150.5, 6MW', 'Norte') + 3.11827837984 * X_{-}(V150.5, 6MW', 'Norte2') + 0.09197762754272742 * X_{-}(V150.5, 6MW', 'Sur') + 4.50854938277856 * X_{-}(V150.5, 6MW', 'Sureste') + 2.066130808699259 * X_{-}(V150.5, 6MW', 'Sureste2') + 0.11682952139051998 * X_{-}(V150.5, 6MW', 'Sureste3') + 3.978708893133121 * X_{-}(V150.5, 6MW', 'Suroeste') + 0.46289365783516595 * X_{-}(V150.5, 6MW', 'Suroeste2') + 2.3052312088237037 * X_{-}(V162.5, 6MW', 'Centro') + 4.1951741450613085 * X_{-}(V162.5, 6MW', 'Noreste') + 4.673880875457043 * X_{-}(V162.5, 6MW', 'Noreste2') + 6.204943331104617 * X_{-}(V162.5, 6MW', 'Noroeste') + 7.641639525425759 * X_{-}(V162.5, 6MW', 'Noroeste2') + 3.11849251773904 * X_{-}(V162.5, 6MW', 'Norte') + 3.6372561804799997 * X_{-}(V162.5, 6MW', 'Norte2') + 0.10728554461607705 * X_{-}(V162.5, 6MW', 'Sur') + 5.2589112035443195 * X_{-}(V162.5, 6MW', 'Sureste') + 2.4099987679762958 * X_{-}(V162.5, 6MW', 'Sureste2') + 0.13627356091343995 * X_{-}(V162.5, 6MW', 'Sureste3') + 4.64088897360641 * X_{-}(V162.5, 6MW', 'Suroeste') + 0.5399334545469096 * X_{-}(V162.5, 6MW', 'Suroeste2') + 0.7115214899348149 * X_{-}(V90.2, 0MW', 'Centro') + 1.2948621148301982 * X_{-}(V90.2, 0MW', 'Noreste') + 1.4426174136259318 * X_{-}(V90.2, 0MW', 'Noreste2') + 1.915187729113505 * X_{-}(V90.2, 0MW', 'Noroeste') + 2.35863141183576 * X_{-}(V90.2, 0MW', 'Noroeste2') + 0.9625387831290401 * X_{-}(V90.2, 0MW', 'Norte') + 1.12265786048 * X_{-}(V90.2, 0MW', 'Norte2') + 0.03311423611718815 * X_{-}(V90.2, 0MW', 'Sur') + 1.62319003866432 * X_{-}(V90.2, 0MW', 'Sureste') + 0.743858536865185 * X_{-}(V90.2, 0MW', 'Sureste2') + 0.04206153670343999 * X_{-}(V90.2, 0MW', 'Sureste3') + 1.4324342696006402 * X_{-}(V90.2, 0MW', 'Suroeste') + 0.1666532426657985 * X_{-}(V90.2, 0MW', 'Suroeste2') + 1.1018405719644444 * X_{-}(v112.3, 45MW', 'Centro') + 2.0051841489008346 * X_{-}(v112.3, 45MW', 'Noreste') + 2.2339935176112355 * X_{-}(v112.3, 45MW', 'Noreste2') + 2.9658015572502756 * X_{-}(v112.3, 45MW', 'Noroeste') + 3.6525049779009597 * X_{-}(v112.3, 45MW', 'Noroeste2') + 1.49055832935984 * X_{-}(v112.3, 45MW', 'Norte') + 1.7385138700799998 * X_{-}(v112.3, 45MW', 'Norte2') + 0.05127970044428445 * X_{-}(v112.3, 45MW', 'Sur') + 2.51362280115072 * X_{-}(v112.3, 45MW', 'Sureste') + 1.1519167408355553 * X_{-}(v112.3, 45MW', 'Sureste2') + 0.06513521842223999 * X_{-}(v112.3, 45MW', 'Sureste3') + 2.21822421001344 * X_{-}(v112.3, 45MW', 'Suroeste') + 0.25807415069843553 * X_{-}(v112.3, 45MW', 'Suroeste2') + 1.2230743498785186 * X_{-}(v117.3, 45MW', 'Centro') + 2.2258113938671875 * X_{-}(v117.3, 45MW', 'Noreste') + 2.4797962960410547 * X_{-}(v117.3, 45MW', 'Noreste2') + 3.292124018482441 * X_{-}(v117.3, 45MW', 'Noroeste') + 4.05438433194528 * X_{-}(v117.3, 45MW', 'Noroeste2') + 1.65456210818912 * X_{-}(v117.3, 45MW', 'Norte') + 1.9297998054399996 * X_{-}(v117.3, 45MW', 'Norte2') + 0.056921924894305184 * X_{-}(v117.3, 45MW', 'Sur') + 2.79019274800896 * X_{-}(v117.3, 45MW', 'Sureste') + 1.278660320521481 * X_{-}(v117.3, 45MW', 'Sureste2') + 0.07230194363231998 * X_{-}(v117.3, 45MW', 'Sureste3') + 2.4622919164339203 * X_{-}(v117.3, 45MW', 'Suroeste') + 0.2864696419039881 * X_{-}(v117.3, 45MW', 'Suroeste2') + 1.2230743498785186 * X_{-}(v117.4, 2MW', 'Centro') + 2.2258113938671875 * X_{-}(v117.4, 2MW', 'Noreste') + 2.4797962960410547 * X_{-}(v117.4, 2MW', 'Noreste2') + 3.292124018482441 * X_{-}(v117.4, 2MW', 'Noroeste') + 4.05438433194528 * X_{-}(v117.4, 2MW', 'Noroeste2') + 1.65456210818912 * X_{-}(v117.4, 2MW', 'Norte') + 1.9297998054399996 * X_{-}(v117.4, 2MW', 'Norte2') + 0.056921924894305184 * X_{-}(v117.4, 2MW', 'Sur') + 2.79019274800896 * X_{-}(v117.4, 2MW', 'Sureste') + 1.278660320521481 * X_{-}(v117.4, 2MW', 'Sureste2') + 0.07230194363231998 * X_{-}(v117.4, 2MW', 'Sureste3') + 2.4622919164339203 * X_{-}(v117.4, 2MW', 'Suroeste') + 0.2864696419039881 * X_{-}(v117.4, 2MW', 'Suroeste2') + 1.3945239638474076 * X_{-}(v126.3, 45MW', 'Centro') + 2.537823909119419 * X_{-}(v126.3, 45MW', 'Noreste') + 2.827412217934886 * X_{-}(v126.3, 45MW', 'Noreste2') + 3.7536114106124323 *$

$$\begin{aligned}
 & X_{-}(v126.3, 45MW', \text{'Noroeste'}) + 4.62272478374412 * X_{-}(v126.3, 45MW', \text{'Noroeste2'}) + 1.88649734153348 * X_{-}(v126.3, 45MW', \text{'Norte'}) + \\
 & 2.2003176457599998 * X_{-}(v126.3, 45MW', \text{'Norte2'}) + 0.06490119618755408 * X_{-}(v126.3, 45MW', \text{'Sur'}) + 3.18131980385184 * \\
 & X_{-}(v126.3, 45MW', \text{'Sureste'}) + 1.4579019327525924 * X_{-}(v126.3, 45MW', \text{'Sureste2'}) + 0.08243717402627998 * X_{-}(v126.3, 45MW', \text{'Sureste3'}) + \\
 & 2.8074540879676806 * X_{-}(v126.3, 45MW', \text{'Suroeste'}) + 0.32662673417161925 * X_{-}(v126.3, 45MW', \text{'Suroeste2'}) + 1.6246891990385186 * \\
 & X_{-}(v136.3, 45MW', \text{'Centro'}) + 2.956690025485427 * X_{-}(v136.3, 45MW', \text{'Noreste'}) + 3.2940746884224943 * X_{-}(v136.3, 45MW', \text{'Noreste2'}) + \\
 & 4.373142430184202 * X_{-}(v136.3, 45MW', \text{'Noroeste'}) + 5.385702376569959 * X_{-}(v136.3, 45MW', \text{'Noroeste2'}) + 2.19786244931084 * \\
 & X_{-}(v136.3, 45MW', \text{'Norte'}) + 2.5634785820799992 * X_{-}(v136.3, 45MW', \text{'Norte2'}) + 0.0756130946360252 * X_{-}(v136.3, 45MW', \text{'Sur'}) + \\
 & 3.7063944815587204 * X_{-}(v136.3, 45MW', \text{'Sureste'}) + 1.6985276587614813 * X_{-}(v136.3, 45MW', \text{'Sureste2'}) + 0.09604337373323997 * \\
 & X_{-}(v136.3, 45MW', \text{'Sureste3'}) + 3.270822482629441 * X_{-}(v136.3, 45MW', \text{'Suroeste'}) + 0.3805362552980281 * X_{-}(v136.3, 45MW', \text{'Suroeste2'}) + \\
 & 1.6246891990385186 * X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Centro'}) + 2.956690025485427 * X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Noreste'}) + 3.2940746884224943 * \\
 & X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Noreste2'}) + 4.373142430184202 * X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Noroeste'}) + 5.385702376569959 * X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Noroeste2'}) + \\
 & 2.19786244931084 * X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Norte'}) + 2.5634785820799992 * X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Norte2'}) + 0.0756130946360252 * \\
 & X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Sur'}) + 3.7063944815587204 * X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Sureste'}) + 1.6985276587614813 * X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Sureste2'}) + \\
 & 0.09604337373323997 * X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Sureste3'}) + 3.270822482629441 * X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Suroeste'}) + 0.3805362552980281 * \\
 & X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Suroeste2'}) + 1.9763118907007409 * X_{-}(v150.4, 2MW', \text{'Centro'}) + 3.596590448155365 * X_{-}(v150.4, 2MW', \text{'Noreste'}) + \\
 & 4.006993448001233 * X_{-}(v150.4, 2MW', \text{'Noreste2'}) + 5.319597981949819 * X_{-}(v150.4, 2MW', \text{'Noroeste'}) + 6.551300798263081 * \\
 & X_{-}(v150.4, 2MW', \text{'Noroeste2'}) + 2.6735339259153204 * X_{-}(v150.4, 2MW', \text{'Norte'}) + 3.11827837984 * X_{-}(v150.4, 2MW', \text{'Norte2'}) + \\
 & 0.09197762754272742 * X_{-}(v150.4, 2MW', \text{'Sur'}) + 4.50854938277856 * X_{-}(v150.4, 2MW', \text{'Sureste'}) + 2.066130808699259 * X_{-}(v150.4, 2MW', \text{'Sureste2'}) + \\
 & 0.11682952139051998 * X_{-}(v150.4, 2MW', \text{'Sureste3'}) + 3.978708893133121 * X_{-}(v150.4, 2MW', \text{'Suroeste'}) + 0.46289365783516595 * \\
 & X_{-}(v150.4, 2MW', \text{'Suroeste2'})
 \end{aligned}$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned}
 C1 : & 70686X{-}(1.7.100', \text{'Sureste'}) + 76454X_{-}(1.7.103', \text{'Sureste'}) + 47529X_{-}(1.85.82.5', \text{'Sureste'}) + 54739X_{-}(1.85.87', \text{'Sureste'}) + \\
 & 95115X_{-}(2MW.116', \text{'Sureste'}) + 115812X_{-}(2MW.127', \text{'Sureste'}) + 123163X_{-}(2MW.132', \text{'Sureste'}) + 176460X_{-}(4MW.158', \text{'Sureste'}) + \\
 & 176460X_{-}(5MW.158', \text{'Sureste'}) + 88668X_{-}(S111', \text{'Sureste'}) + 101788X_{-}(S120', \text{'Sureste'}) + 119459X_{-}(S128', \text{'Sureste'}) + \\
 & 91863X_{-}(SG.2.1.114', \text{'Sureste'}) + 105209X_{-}(SG.2.2.122', \text{'Sureste'}) + 91863X_{-}(SG.2.6.114', \text{'Sureste'}) + 119459X_{-}(SG.2.9.129', \text{'Sureste'}) + \\
 & 123163X_{-}(SG.3.4.132', \text{'Sureste'}) + 123163X_{-}(SG.5.0.132', \text{'Sureste'}) + 150674X_{-}(SG.5.0.145', \text{'Sureste'}) + 172021X_{-}(SG.5.8.155', \text{'Sureste'}) + \\
 & 204282X_{-}(SG.5.8.170', \text{'Sureste'}) + 101788X_{-}(SWT.DD.120', \text{'Sureste'}) + 119459X_{-}(SWT.DD.130', \text{'Sureste'}) + 142531X_{-}(SWT.DD.142', \text{'Sureste'}) + \\
 & 85530X_{-}(V100.1.2, 0MW', \text{'Sureste'}) + 70686X_{-}(V100.2, 0MW', \text{'Sureste'}) + 79423X_{-}(V105.3, 45MW', \text{'Sureste'}) + 95115X_{-}(V116.2, 1MW', \text{'Sureste'}) + \\
 & 101788X_{-}(V120.2, 2MW', \text{'Sureste'}) + 134614X_{-}(V138.3, 0MW', \text{'Sureste'}) + 159043X_{-}(V150.5, 6MW', \text{'Sureste'}) + 185508X_{-}(V162.5, 6MW', \text{'Sureste'}) + \\
 & 57256X_{-}(V90.2, 0MW', \text{'Sureste'}) + 88668X_{-}(v112.3, 45MW', \text{'Sureste'}) + 98423X_{-}(v117.3, 45MW', \text{'Sureste'}) + 98423X_{-}(v117.4, 2MW', \text{'Sureste'}) + \\
 & 112221X_{-}(v126.3, 45MW', \text{'Sureste'}) + 130741X_{-}(v136.3, 45MW', \text{'Sureste'}) + 130741X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Sureste'}) + 159043X_{-}(v150.4, 2MW', \text{'Sureste'}) \\
 & 140000
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C2 : & 70686X{-}(1.7.100', \text{'Noreste'}) + 76454X_{-}(1.7.103', \text{'Noreste'}) + 47529X_{-}(1.85.82.5', \text{'Noreste'}) + 54739X_{-}(1.85.87', \text{'Noreste'}) + \\
 & 95115X_{-}(2MW.116', \text{'Noreste'}) + 115812X_{-}(2MW.127', \text{'Noreste'}) + 123163X_{-}(2MW.132', \text{'Noreste'}) + 176460X_{-}(4MW.158', \text{'Noreste'}) + \\
 & 176460X_{-}(5MW.158', \text{'Noreste'}) + 88668X_{-}(S111', \text{'Noreste'}) + 101788X_{-}(S120', \text{'Noreste'}) + 119459X_{-}(S128', \text{'Noreste'}) + \\
 & 91863X_{-}(SG.2.1.114', \text{'Noreste'}) + 105209X_{-}(SG.2.2.122', \text{'Noreste'}) + 91863X_{-}(SG.2.6.114', \text{'Noreste'}) + 119459X_{-}(SG.2.9.129', \text{'Noreste'}) + \\
 & 123163X_{-}(SG.3.4.132', \text{'Noreste'}) + 123163X_{-}(SG.5.0.132', \text{'Noreste'}) + 150674X_{-}(SG.5.0.145', \text{'Noreste'}) + 172021X_{-}(SG.5.8.155', \text{'Noreste'}) + \\
 & 204282X_{-}(SG.5.8.170', \text{'Noreste'}) + 101788X_{-}(SWT.DD.120', \text{'Noreste'}) + 119459X_{-}(SWT.DD.130', \text{'Noreste'}) + 142531X_{-}(SWT.DD.142', \text{'Noreste'}) + \\
 & 85530X_{-}(V100.1.2, 0MW', \text{'Noreste'}) + 70686X_{-}(V100.2, 0MW', \text{'Noreste'}) + 79423X_{-}(V105.3, 45MW', \text{'Noreste'}) + 95115X_{-}(V116.2, 1MW', \text{'Noreste'}) + \\
 & 101788X_{-}(V120.2, 2MW', \text{'Noreste'}) + 134614X_{-}(V138.3, 0MW', \text{'Noreste'}) + 159043X_{-}(V150.5, 6MW', \text{'Noreste'}) + 185508X_{-}(V162.5, 6MW', \text{'Noreste'}) + \\
 & 57256X_{-}(V90.2, 0MW', \text{'Noreste'}) + 88668X_{-}(v112.3, 45MW', \text{'Noreste'}) + 98423X_{-}(v117.3, 45MW', \text{'Noreste'}) + 98423X_{-}(v117.4, 2MW', \text{'Noreste'}) + \\
 & 112221X_{-}(v126.3, 45MW', \text{'Noreste'}) + 130741X_{-}(v136.3, 45MW', \text{'Noreste'}) + 130741X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Noreste'}) + 159043X_{-}(v150.4, 2MW', \text{'Noreste'}) \\
 & 86800000
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C3 : & 70686X{-}(1.7.100', \text{'Centro'}) + 76454X_{-}(1.7.103', \text{'Centro'}) + 47529X_{-}(1.85.82.5', \text{'Centro'}) + 54739X_{-}(1.85.87', \text{'Centro'}) + \\
 & 95115X_{-}(2MW.116', \text{'Centro'}) + 115812X_{-}(2MW.127', \text{'Centro'}) + 123163X_{-}(2MW.132', \text{'Centro'}) + 176460X_{-}(4MW.158', \text{'Centro'}) + \\
 & 176460X_{-}(5MW.158', \text{'Centro'}) + 88668X_{-}(S111', \text{'Centro'}) + 101788X_{-}(S120', \text{'Centro'}) + 119459X_{-}(S128', \text{'Centro'}) + \\
 & 91863X_{-}(SG.2.1.114', \text{'Centro'}) + 105209X_{-}(SG.2.2.122', \text{'Centro'}) + 91863X_{-}(SG.2.6.114', \text{'Centro'}) + 119459X_{-}(SG.2.9.129', \text{'Centro'}) + \\
 & 123163X_{-}(SG.3.4.132', \text{'Centro'}) + 123163X_{-}(SG.5.0.132', \text{'Centro'}) + 150674X_{-}(SG.5.0.145', \text{'Centro'}) + 172021X_{-}(SG.5.8.155', \text{'Centro'}) + \\
 & 204282X_{-}(SG.5.8.170', \text{'Centro'}) + 101788X_{-}(SWT.DD.120', \text{'Centro'}) + 119459X_{-}(SWT.DD.130', \text{'Centro'}) + 142531X_{-}(SWT.DD.142', \text{'Centro'}) + \\
 & 85530X_{-}(V100.1.2, 0MW', \text{'Centro'}) + 70686X_{-}(V100.2, 0MW', \text{'Centro'}) + 79423X_{-}(V105.3, 45MW', \text{'Centro'}) + 95115X_{-}(V116.2, 1MW', \text{'Centro'}) + \\
 & 101788X_{-}(V120.2, 2MW', \text{'Centro'}) + 134614X_{-}(V138.3, 0MW', \text{'Centro'}) + 159043X_{-}(V150.5, 6MW', \text{'Centro'}) + 185508X_{-}(V162.5, 6MW', \text{'Centro'}) + \\
 & 57256X_{-}(V90.2, 0MW', \text{'Centro'}) + 88668X_{-}(v112.3, 45MW', \text{'Centro'}) + 98423X_{-}(v117.3, 45MW', \text{'Centro'}) + 98423X_{-}(v117.4, 2MW', \text{'Centro'}) + \\
 & 112221X_{-}(v126.3, 45MW', \text{'Centro'}) + 130741X_{-}(v136.3, 45MW', \text{'Centro'}) + 130741X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Centro'}) + 159043X_{-}(v150.4, 2MW', \text{'Centro'}) \\
 & 1500000
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C4 : & 70686X{-}(1.7.100', \text{'Noroeste'}) + 76454X_{-}(1.7.103', \text{'Noroeste'}) + 47529X_{-}(1.85.82.5', \text{'Noroeste'}) + 54739X_{-}(1.85.87', \text{'Noroeste'}) + \\
 & 95115X_{-}(2MW.116', \text{'Noroeste'}) + 115812X_{-}(2MW.127', \text{'Noroeste'}) + 123163X_{-}(2MW.132', \text{'Noroeste'}) + 176460X_{-}(4MW.158', \text{'Noroeste'}) +
 \end{aligned}$$

176460X_({'5MW_158', 'Noroeste'})+88668X_({'S111', 'Noroeste'})+101788X_({'S120', 'Noroeste'})+119459X_({'S128', 'Noroeste'})+
 91863X_({'SG_2.1.114', 'Noroeste'})+105209X_({'SG_2.2.122', 'Noroeste'})+91863X_({'SG_2.6.114', 'Noroeste'})+119459X_({'SG_2.9.129', 'Noroeste'})+
 123163X_({'SG_3.4.132', 'Noroeste'})+123163X_({'SG_5.0.132', 'Noroeste'})+150674X_({'SG_5.0.145', 'Noroeste'})+172021X_({'SG_5.8.155', 'Noroeste'})+
 204282X_({'SG_5.8.170', 'Noroeste'})+101788X_({'SWT_DD_120', 'Noroeste'})+119459X_({'SWT_DD_130', 'Noroeste'})+142531X_({'SWT_DD_142', 'Noroeste'})+
 85530X_({'V100.1.2, 0MW', 'Noroeste'})+70686X_({'V100.2, 0MW', 'Noroeste'})+79423X_({'V105.3, 45MW', 'Noroeste'})+95115X_({'V116.2, 1MW', 'Noroeste'})+
 101788X_({'V120.2, 2MW', 'Noroeste'})+134614X_({'V138.3, 0MW', 'Noroeste'})+159043X_({'V150.5, 6MW', 'Noroeste'})+185508X_({'V162.5, 6MW', 'Noroeste'})+
 57256X_({'V90.2, 0MW', 'Noroeste'})+88668X_({'v112.3, 45MW', 'Noroeste'})+98423X_({'v117.3, 45MW', 'Noroeste'})+98423X_({'v117.4, 2MW', 'Noroeste'})+
 112221X_({'v126.3, 45MW', 'Noroeste'})+130741X_({'v136.3, 45MW', 'Noroeste'})+130741X_({'v136.4, 2MW', 'Noroeste'})+159043X_({'v150.4, 2MW', 'Noroeste'})+
 110000

.C5 : 70686X_({'1.7_100', 'Suroeste'})+76454X_({'1.7_103', 'Suroeste'})+47529X_({'1.85_82.5', 'Suroeste'})+54739X_({'1.85_87', 'Suroeste'})+
 95115X_({'2MW_116', 'Suroeste'})+115812X_({'2MW_127', 'Suroeste'})+123163X_({'2MW_132', 'Suroeste'})+176460X_({'4MW_158', 'Suroeste'})+
 176460X_({'5MW_158', 'Suroeste'})+88668X_({'S111', 'Suroeste'})+101788X_({'S120', 'Suroeste'})+119459X_({'S128', 'Suroeste'})+
 91863X_({'SG_2.1.114', 'Suroeste'})+105209X_({'SG_2.2.122', 'Suroeste'})+91863X_({'SG_2.6.114', 'Suroeste'})+119459X_({'SG_2.9.129', 'Suroeste'})+
 123163X_({'SG_3.4.132', 'Suroeste'})+123163X_({'SG_5.0.132', 'Suroeste'})+150674X_({'SG_5.0.145', 'Suroeste'})+172021X_({'SG_5.8.155', 'Suroeste'})+
 204282X_({'SG_5.8.170', 'Suroeste'})+101788X_({'SWT_DD_120', 'Suroeste'})+119459X_({'SWT_DD_130', 'Suroeste'})+142531X_({'SWT_DD_142', 'Suroeste'})+
 85530X_({'V100.1.2, 0MW', 'Suroeste'})+70686X_({'V100.2, 0MW', 'Suroeste'})+79423X_({'V105.3, 45MW', 'Suroeste'})+95115X_({'V116.2, 1MW', 'Suroeste'})+
 101788X_({'V120.2, 2MW', 'Suroeste'})+134614X_({'V138.3, 0MW', 'Suroeste'})+159043X_({'V150.5, 6MW', 'Suroeste'})+185508X_({'V162.5, 6MW', 'Suroeste'})+
 57256X_({'V90.2, 0MW', 'Suroeste'})+88668X_({'v112.3, 45MW', 'Suroeste'})+98423X_({'v117.3, 45MW', 'Suroeste'})+98423X_({'v117.4, 2MW', 'Suroeste'})+
 112221X_({'v126.3, 45MW', 'Suroeste'})+130741X_({'v136.3, 45MW', 'Suroeste'})+130741X_({'v136.4, 2MW', 'Suroeste'})+159043X_({'v150.4, 2MW', 'Suroeste'})+
 984500000

.C6 : 70686X_({'1.7_100', 'Noroeste2'})+76454X_({'1.7_103', 'Noroeste2'})+47529X_({'1.85_82.5', 'Noroeste2'})+54739X_({'1.85_87', 'Noroeste2'})+
 95115X_({'2MW_116', 'Noroeste2'})+115812X_({'2MW_127', 'Noroeste2'})+123163X_({'2MW_132', 'Noroeste2'})+176460X_({'4MW_158', 'Noroeste2'})+
 176460X_({'5MW_158', 'Noroeste2'})+88668X_({'S111', 'Noroeste2'})+101788X_({'S120', 'Noroeste2'})+119459X_({'S128', 'Noroeste2'})+
 91863X_({'SG_2.1.114', 'Noroeste2'})+105209X_({'SG_2.2.122', 'Noroeste2'})+91863X_({'SG_2.6.114', 'Noroeste2'})+119459X_({'SG_2.9.129', 'Noroeste2'})+
 123163X_({'SG_3.4.132', 'Noroeste2'})+123163X_({'SG_5.0.132', 'Noroeste2'})+150674X_({'SG_5.0.145', 'Noroeste2'})+172021X_({'SG_5.8.155', 'Noroeste2'})+
 204282X_({'SG_5.8.170', 'Noroeste2'})+101788X_({'SWT_DD_120', 'Noroeste2'})+119459X_({'SWT_DD_130', 'Noroeste2'})+142531X_({'SWT_DD_142', 'Noroeste2'})+
 85530X_({'V100.1.2, 0MW', 'Noroeste2'})+70686X_({'V100.2, 0MW', 'Noroeste2'})+79423X_({'V105.3, 45MW', 'Noroeste2'})+95115X_({'V116.2, 1MW', 'Noroeste2'})+
 95115X_({'V116.2, 1MW', 'Noroeste2'})+101788X_({'V120.2, 2MW', 'Noroeste2'})+134614X_({'V138.3, 0MW', 'Noroeste2'})+
 159043X_({'V150.5, 6MW', 'Noroeste2'})+185508X_({'V162.5, 6MW', 'Noroeste2'})+57256X_({'V90.2, 0MW', 'Noroeste2'})+88668X_({'v112.3, 45MW', 'Noroeste2'})+
 98423X_({'v117.3, 45MW', 'Noroeste2'})+98423X_({'v117.4, 2MW', 'Noroeste2'})+112221X_({'v126.3, 45MW', 'Noroeste2'})+130741X_({'v136.3, 45MW', 'Noroeste2'})+
 130741X_({'v136.4, 2MW', 'Noroeste2'})+159043X_({'v150.4, 2MW', 'Noroeste2'}) ≤ 1034000000

.C7 : 70686X_({'1.7_100', 'Norte'})+76454X_({'1.7_103', 'Norte'})+47529X_({'1.85_82.5', 'Norte'})+54739X_({'1.85_87', 'Norte'})+
 95115X_({'2MW_116', 'Norte'})+115812X_({'2MW_127', 'Norte'})+123163X_({'2MW_132', 'Norte'})+176460X_({'4MW_158', 'Norte'})+
 176460X_({'5MW_158', 'Norte'})+88668X_({'S111', 'Norte'})+101788X_({'S120', 'Norte'})+119459X_({'S128', 'Norte'})+91863X_({'SG_2.1.114', 'Norte'})+
 105209X_({'SG_2.2.122', 'Norte'})+91863X_({'SG_2.6.114', 'Norte'})+119459X_({'SG_2.9.129', 'Norte'})+123163X_({'SG_3.4.132', 'Norte'})+
 123163X_({'SG_5.0.132', 'Norte'})+150674X_({'SG_5.0.145', 'Norte'})+172021X_({'SG_5.8.155', 'Norte'})+204282X_({'SG_5.8.170', 'Norte'})+
 101788X_({'SWT_DD_120', 'Norte'})+119459X_({'SWT_DD_130', 'Norte'})+142531X_({'SWT_DD_142', 'Norte'})+85530X_({'V100.1.2, 0MW', 'Norte'})+
 70686X_({'V100.2, 0MW', 'Norte'})+79423X_({'V105.3, 45MW', 'Norte'})+95115X_({'V116.2, 1MW', 'Norte'})+101788X_({'V120.2, 2MW', 'Norte'})+
 134614X_({'V138.3, 0MW', 'Norte'})+159043X_({'V150.5, 6MW', 'Norte'})+185508X_({'V162.5, 6MW', 'Norte'})+57256X_({'V90.2, 0MW', 'Norte'})+
 88668X_({'v112.3, 45MW', 'Norte'})+98423X_({'v117.3, 45MW', 'Norte'})+98423X_({'v117.4, 2MW', 'Norte'})+112221X_({'v126.3, 45MW', 'Norte'})+
 130741X_({'v136.3, 45MW', 'Norte'})+130741X_({'v136.4, 2MW', 'Norte'})+159043X_({'v150.4, 2MW', 'Norte'}) ≤ 207100000

.C8 : 70686X_({'1.7_100', 'Noreste2'})+76454X_({'1.7_103', 'Noreste2'})+47529X_({'1.85_82.5', 'Noreste2'})+54739X_({'1.85_87', 'Noreste2'})+
 95115X_({'2MW_116', 'Noreste2'})+115812X_({'2MW_127', 'Noreste2'})+123163X_({'2MW_132', 'Noreste2'})+176460X_({'4MW_158', 'Noreste2'})+
 176460X_({'5MW_158', 'Noreste2'})+88668X_({'S111', 'Noreste2'})+101788X_({'S120', 'Noreste2'})+119459X_({'S128', 'Noreste2'})+
 91863X_({'SG_2.1.114', 'Noreste2'})+105209X_({'SG_2.2.122', 'Noreste2'})+91863X_({'SG_2.6.114', 'Noreste2'})+119459X_({'SG_2.9.129', 'Noreste2'})+
 123163X_({'SG_3.4.132', 'Noreste2'})+123163X_({'SG_5.0.132', 'Noreste2'})+150674X_({'SG_5.0.145', 'Noreste2'})+172021X_({'SG_5.8.155', 'Noreste2'})+
 204282X_({'SG_5.8.170', 'Noreste2'})+101788X_({'SWT_DD_120', 'Noreste2'})+119459X_({'SWT_DD_130', 'Noreste2'})+142531X_({'SWT_DD_142', 'Noreste2'})+
 85530X_({'V100.1.2, 0MW', 'Noreste2'})+70686X_({'V100.2, 0MW', 'Noreste2'})+79423X_({'V105.3, 45MW', 'Noreste2'})+95115X_({'V116.2, 1MW', 'Noreste2'})+
 101788X_({'V120.2, 2MW', 'Noreste2'})+134614X_({'V138.3, 0MW', 'Noreste2'})+159043X_({'V150.5, 6MW', 'Noreste2'})+185508X_({'V162.5, 6MW', 'Noreste2'})+
 57256X_({'V90.2, 0MW', 'Noreste2'})+88668X_({'v112.3, 45MW', 'Noreste2'})+98423X_({'v117.3, 45MW', 'Noreste2'})+98423X_({'v117.4, 2MW', 'Noreste2'})+
 112221X_({'v126.3, 45MW', 'Noreste2'})+130741X_({'v136.3, 45MW', 'Noreste2'})+130741X_({'v136.4, 2MW', 'Noreste2'})+159043X_({'v150.4, 2MW', 'Noreste2'})+
 239000000

.C9 : 70686X_({'1.7_100', 'Sureste2'})+76454X_({'1.7_103', 'Sureste2'})+47529X_({'1.85_82.5', 'Sureste2'})+54739X_({'1.85_87', 'Sureste2'})+
 95115X_({'2MW_116', 'Sureste2'})+115812X_({'2MW_127', 'Sureste2'})+123163X_({'2MW_132', 'Sureste2'})+176460X_({'4MW_158', 'Sureste2'})+
 176460X_({'5MW_158', 'Sureste2'})+88668X_({'S111', 'Sureste2'})+101788X_({'S120', 'Sureste2'})+119459X_({'S128', 'Sureste2'})+
 91863X_({'SG_2.1.114', 'Sureste2'})+105209X_({'SG_2.2.122', 'Sureste2'})+91863X_({'SG_2.6.114', 'Sureste2'})+119459X_({'SG_2.9.129', 'Sureste2'})+
 123163X_({'SG_3.4.132', 'Sureste2'})+123163X_({'SG_5.0.132', 'Sureste2'})+150674X_({'SG_5.0.145', 'Sureste2'})+172021X_({'SG_5.8.155', 'Sureste2'})+
 204282X_({'SG_5.8.170', 'Sureste2'})+101788X_({'SWT_DD_120', 'Sureste2'})+119459X_({'SWT_DD_130', 'Sureste2'})+142531X_({'SWT_DD_142', 'Sureste2'})+
 85530X_({'V100.1.2, 0MW', 'Sureste2'})+70686X_({'V100.2, 0MW', 'Sureste2'})+79423X_({'V105.3, 45MW', 'Sureste2'})+95115X_({'V116.2, 1MW', 'Sureste2'})+
 101788X_({'V120.2, 2MW', 'Sureste2'})+134614X_({'V138.3, 0MW', 'Sureste2'})+159043X_({'V150.5, 6MW', 'Sureste2'})+185508X_({'V162.5, 6MW', 'Sureste2'})+
 57256X_({'V90.2, 0MW', 'Sureste2'})+88668X_({'v112.3, 45MW', 'Sureste2'})+98423X_({'v117.3, 45MW', 'Sureste2'})+98423X_({'v117.4, 2MW', 'Sureste2'})+
 112221X_({'v126.3, 45MW', 'Sureste2'})+130741X_({'v136.3, 45MW', 'Sureste2'})+130741X_({'v136.4, 2MW', 'Sureste2'})+159043X_({'v150.4, 2MW', 'Sureste2'})+
 239000000

123163X₋(*'SG.3.4.132'*, *'Suroeste2'*) + 123163X₋(*'SG.5.0.132'*, *'Suroeste2'*) + 150674X₋(*'SG.5.0.145'*, *'Suroeste2'*) + 172021X₋(*'SG.5.8.155'*, *'Suroeste2'*) + 204282X₋(*'SG.5.8.170'*, *'Suroeste2'*) + 101788X₋(*'SWT_DD_120'*, *'Suroeste2'*) + 119459X₋(*'SWT_DD_130'*, *'Suroeste2'*) + 142531X₋(*'SWT_DD_142'*, *'Suroeste2'*) + 85530X₋(*'V100.1.2, 0MW'*, *'Suroeste2'*) + 70686X₋(*'V100.2, 0MW'*, *'Suroeste2'*) + 79423X₋(*'V105.3, 45MW'*, *'Suroeste2'*) + 95115X₋(*'V116.2, 1MW'*, *'Suroeste2'*) + 101788X₋(*'V120.2, 2MW'*, *'Suroeste2'*) + 134614X₋(*'V138.3, 0MW'*, *'Suroeste2'*) + 159043X₋(*'V150.5, 6MW'*, *'Suroeste2'*) + 185508X₋(*'V162.5, 6MW'*, *'Suroeste2'*) + 57256X₋(*'V90.2, 0MW'*, *'Suroeste2'*) + 88668X₋(*'v112.3, 45MW'*, *'Suroeste2'*) + 98423X₋(*'v117.3, 45MW'*, *'Suroeste2'*) + 98423X₋(*'v117.4, 2MW'*, *'Suroeste2'*) + 112221X₋(*'v126.3, 45MW'*, *'Suroeste2'*) + 130741X₋(*'v136.3, 45MW'*, *'Suroeste2'*) + 130741X₋(*'v136.4, 2MW'*, *'Suroeste2'*) + 159043X₋(*'v150.4, 2MW'*, *'Suroeste2'*) + 160000

..C10 : 70686X₋(*'1.7.100'*, *'Suroeste2'*) + 76454X₋(*'1.7.103'*, *'Suroeste2'*) + 47529X₋(*'1.85.82.5'*, *'Suroeste2'*) + 54739X₋(*'1.85.87'*, *'Suroeste2'*) + 95115X₋(*'2MW_116'*, *'Suroeste2'*) + 115812X₋(*'2MW_127'*, *'Suroeste2'*) + 123163X₋(*'2MW_132'*, *'Suroeste2'*) + 176460X₋(*'4MW_158'*, *'Suroeste2'*) + 176460X₋(*'5MW_158'*, *'Suroeste2'*) + 88668X₋(*'S111'*, *'Suroeste2'*) + 101788X₋(*'S120'*, *'Suroeste2'*) + 119459X₋(*'S128'*, *'Suroeste2'*) + 91863X₋(*'SG.2.1.114'*, *'Suroeste2'*) + 105209X₋(*'SG.2.2.122'*, *'Suroeste2'*) + 91863X₋(*'SG.2.6.114'*, *'Suroeste2'*) + 119459X₋(*'SG.2.9.129'*, *'Suroeste2'*) + 123163X₋(*'SG.3.4.132'*, *'Suroeste2'*) + 123163X₋(*'SG.5.0.132'*, *'Suroeste2'*) + 150674X₋(*'SG.5.0.145'*, *'Suroeste2'*) + 172021X₋(*'SG.5.8.155'*, *'Suroeste2'*) + 204282X₋(*'SG.5.8.170'*, *'Suroeste2'*) + 101788X₋(*'SWT_DD_120'*, *'Suroeste2'*) + 119459X₋(*'SWT_DD_130'*, *'Suroeste2'*) + 142531X₋(*'SWT_DD_142'*, *'Suroeste2'*) + 85530X₋(*'V100.1.2, 0MW'*, *'Suroeste2'*) + 70686X₋(*'V100.2, 0MW'*, *'Suroeste2'*) + 79423X₋(*'V105.3, 45MW'*, *'Suroeste2'*) + 95115X₋(*'V116.2, 1MW'*, *'Suroeste2'*) + 101788X₋(*'V120.2, 2MW'*, *'Suroeste2'*) + 134614X₋(*'V138.3, 0MW'*, *'Suroeste2'*) + 159043X₋(*'V150.5, 6MW'*, *'Suroeste2'*) + 185508X₋(*'V162.5, 6MW'*, *'Suroeste2'*) + 57256X₋(*'V90.2, 0MW'*, *'Suroeste2'*) + 88668X₋(*'v112.3, 45MW'*, *'Suroeste2'*) + 98423X₋(*'v117.3, 45MW'*, *'Suroeste2'*) + 98423X₋(*'v117.4, 2MW'*, *'Suroeste2'*) + 112221X₋(*'v126.3, 45MW'*, *'Suroeste2'*) + 130741X₋(*'v136.3, 45MW'*, *'Suroeste2'*) + 130741X₋(*'v136.4, 2MW'*, *'Suroeste2'*) + 159043X₋(*'v150.4, 2MW'*, *'Suroeste2'*) ≤ 69000000

..C11 : 70686X₋(*'1.7.100'*, *'Suroeste3'*) + 76454X₋(*'1.7.103'*, *'Suroeste3'*) + 47529X₋(*'1.85.82.5'*, *'Suroeste3'*) + 54739X₋(*'1.85.87'*, *'Suroeste3'*) + 95115X₋(*'2MW_116'*, *'Suroeste3'*) + 115812X₋(*'2MW_127'*, *'Suroeste3'*) + 123163X₋(*'2MW_132'*, *'Suroeste3'*) + 176460X₋(*'4MW_158'*, *'Suroeste3'*) + 176460X₋(*'5MW_158'*, *'Suroeste3'*) + 88668X₋(*'S111'*, *'Suroeste3'*) + 101788X₋(*'S120'*, *'Suroeste3'*) + 119459X₋(*'S128'*, *'Suroeste3'*) + 91863X₋(*'SG.2.1.114'*, *'Suroeste3'*) + 105209X₋(*'SG.2.2.122'*, *'Suroeste3'*) + 91863X₋(*'SG.2.6.114'*, *'Suroeste3'*) + 119459X₋(*'SG.2.9.129'*, *'Suroeste3'*) + 123163X₋(*'SG.3.4.132'*, *'Suroeste3'*) + 123163X₋(*'SG.5.0.132'*, *'Suroeste3'*) + 150674X₋(*'SG.5.0.145'*, *'Suroeste3'*) + 172021X₋(*'SG.5.8.155'*, *'Suroeste3'*) + 204282X₋(*'SG.5.8.170'*, *'Suroeste3'*) + 101788X₋(*'SWT_DD_120'*, *'Suroeste3'*) + 119459X₋(*'SWT_DD_130'*, *'Suroeste3'*) + 142531X₋(*'SWT_DD_142'*, *'Suroeste3'*) + 85530X₋(*'V100.1.2, 0MW'*, *'Suroeste3'*) + 70686X₋(*'V100.2, 0MW'*, *'Suroeste3'*) + 79423X₋(*'V105.3, 45MW'*, *'Suroeste3'*) + 95115X₋(*'V116.2, 1MW'*, *'Suroeste3'*) + 101788X₋(*'V120.2, 2MW'*, *'Suroeste3'*) + 134614X₋(*'V138.3, 0MW'*, *'Suroeste3'*) + 159043X₋(*'V150.5, 6MW'*, *'Suroeste3'*) + 185508X₋(*'V162.5, 6MW'*, *'Suroeste3'*) + 57256X₋(*'V90.2, 0MW'*, *'Suroeste3'*) + 88668X₋(*'v112.3, 45MW'*, *'Suroeste3'*) + 98423X₋(*'v117.3, 45MW'*, *'Suroeste3'*) + 98423X₋(*'v117.4, 2MW'*, *'Suroeste3'*) + 112221X₋(*'v126.3, 45MW'*, *'Suroeste3'*) + 130741X₋(*'v136.3, 45MW'*, *'Suroeste3'*) + 130741X₋(*'v136.4, 2MW'*, *'Suroeste3'*) + 159043X₋(*'v150.4, 2MW'*, *'Suroeste3'*) + 100440000

..C12 : 70686X₋(*'1.7.100'*, *'Sur'*) + 76454X₋(*'1.7.103'*, *'Sur'*) + 47529X₋(*'1.85.82.5'*, *'Sur'*) + 54739X₋(*'1.85.87'*, *'Sur'*) + 95115X₋(*'2MW_116'*, *'Sur'*) + 115812X₋(*'2MW_127'*, *'Sur'*) + 123163X₋(*'2MW_132'*, *'Sur'*) + 176460X₋(*'4MW_158'*, *'Sur'*) + 176460X₋(*'5MW_158'*, *'Sur'*) + 88668X₋(*'S111'*, *'Sur'*) + 101788X₋(*'S120'*, *'Sur'*) + 119459X₋(*'S128'*, *'Sur'*) + 91863X₋(*'SG.2.1.114'*, *'Sur'*) + 105209X₋(*'SG.2.2.122'*, *'Sur'*) + 91863X₋(*'SG.2.6.114'*, *'Sur'*) + 119459X₋(*'SG.2.9.129'*, *'Sur'*) + 123163X₋(*'SG.3.4.132'*, *'Sur'*) + 123163X₋(*'SG.5.0.132'*, *'Sur'*) + 150674X₋(*'SG.5.0.145'*, *'Sur'*) + 172021X₋(*'SG.5.8.155'*, *'Sur'*) + 204282X₋(*'SG.5.8.170'*, *'Sur'*) + 101788X₋(*'SWT_DD_120'*, *'Sur'*) + 119459X₋(*'SWT_DD_130'*, *'Sur'*) + 142531X₋(*'SWT_DD_142'*, *'Sur'*) + 85530X₋(*'V100.1.2, 0MW'*, *'Sur'*) + 70686X₋(*'V100.2, 0MW'*, *'Sur'*) + 79423X₋(*'V105.3, 45MW'*, *'Sur'*) + 95115X₋(*'V116.2, 1MW'*, *'Sur'*) + 101788X₋(*'V120.2, 2MW'*, *'Sur'*) + 134614X₋(*'V138.3, 0MW'*, *'Sur'*) + 159043X₋(*'V150.5, 6MW'*, *'Sur'*) + 185508X₋(*'V162.5, 6MW'*, *'Sur'*) + 57256X₋(*'V90.2, 0MW'*, *'Sur'*) + 88668X₋(*'v112.3, 45MW'*, *'Sur'*) + 98423X₋(*'v117.3, 45MW'*, *'Sur'*) + 98423X₋(*'v117.4, 2MW'*, *'Sur'*) + 112221X₋(*'v126.3, 45MW'*, *'Sur'*) + 130741X₋(*'v136.3, 45MW'*, *'Sur'*) + 130741X₋(*'v136.4, 2MW'*, *'Sur'*) + 159043X₋(*'v150.4, 2MW'*, *'Sur'*) ≤ 180000

..C13 : 70686X₋(*'1.7.100'*, *'Norte2'*) + 76454X₋(*'1.7.103'*, *'Norte2'*) + 47529X₋(*'1.85.82.5'*, *'Norte2'*) + 54739X₋(*'1.85.87'*, *'Norte2'*) + 95115X₋(*'2MW_116'*, *'Norte2'*) + 115812X₋(*'2MW_127'*, *'Norte2'*) + 123163X₋(*'2MW_132'*, *'Norte2'*) + 176460X₋(*'4MW_158'*, *'Norte2'*) + 176460X₋(*'5MW_158'*, *'Norte2'*) + 88668X₋(*'S111'*, *'Norte2'*) + 101788X₋(*'S120'*, *'Norte2'*) + 119459X₋(*'S128'*, *'Norte2'*) + 91863X₋(*'SG.2.1.114'*, *'Norte2'*) + 105209X₋(*'SG.2.2.122'*, *'Norte2'*) + 91863X₋(*'SG.2.6.114'*, *'Norte2'*) + 119459X₋(*'SG.2.9.129'*, *'Norte2'*) + 123163X₋(*'SG.3.4.132'*, *'Norte2'*) + 123163X₋(*'SG.5.0.132'*, *'Norte2'*) + 150674X₋(*'SG.5.0.145'*, *'Norte2'*) + 172021X₋(*'SG.5.8.155'*, *'Norte2'*) + 204282X₋(*'SG.5.8.170'*, *'Norte2'*) + 101788X₋(*'SWT_DD_120'*, *'Norte2'*) + 119459X₋(*'SWT_DD_130'*, *'Norte2'*) + 142531X₋(*'SWT_DD_142'*, *'Norte2'*) + 85530X₋(*'V100.1.2, 0MW'*, *'Norte2'*) + 70686X₋(*'V100.2, 0MW'*, *'Norte2'*) + 79423X₋(*'V105.3, 45MW'*, *'Norte2'*) + 95115X₋(*'V116.2, 1MW'*, *'Norte2'*) + 101788X₋(*'V120.2, 2MW'*, *'Norte2'*) + 134614X₋(*'V138.3, 0MW'*, *'Norte2'*) + 159043X₋(*'V150.5, 6MW'*, *'Norte2'*) + 185508X₋(*'V162.5, 6MW'*, *'Norte2'*) + 57256X₋(*'V90.2, 0MW'*, *'Norte2'*) + 88668X₋(*'v112.3, 45MW'*, *'Norte2'*) + 98423X₋(*'v117.3, 45MW'*, *'Norte2'*) + 98423X₋(*'v117.4, 2MW'*, *'Norte2'*) + 112221X₋(*'v126.3, 45MW'*, *'Norte2'*) + 130741X₋(*'v136.3, 45MW'*, *'Norte2'*) + 130741X₋(*'v136.4, 2MW'*, *'Norte2'*) + 159043X₋(*'v150.4, 2MW'*, *'Norte2'*) + 150000

..C14 : 2975000X₋(*'1.7.100'*, *'Centro'*) + 2975000X₋(*'1.7.100'*, *'Noreste'*) + 2975000X₋(*'1.7.100'*, *'Noreste2'*) + 2975000X₋(*'1.7.100'*, *'Noreste3'*) + 2975000X₋(*'1.7.100'*, *'Suroeste2'*) + 2975000X₋(*'1.7.100'*, *'Suroeste3'*) + 2975000X₋(*'1.7.100'*, *'Suroeste'*) + 2975000X₋(*'1.7.103'*, *'Centro'*) + 2975000X₋(*'1.7.103'*, *'Noreste'*) + 2975000X₋(*'1.7.103'*, *'Noreste2'*) + 2975000X₋(*'1.7.103'*, *'Noreste3'*) + 2975000X₋(*'1.7.103'*, *'Noreste'*) + 2975000X₋(*'1.7.103'*, *'Noreste2'*) + 2975000X₋(*'1.7.103'*, *'Noreste3'*) + 2975000X₋(*'1.7.103'*, *'Suroeste'*) + 2975000X₋(*'1.7.103'*, *'Suroeste2'*) + 2975000X₋(*'1.7.103'*, *'Suroeste3'*) +

2975000X_({'1.7.103', 'Suroeste'})+2975000X_({'1.7.103', 'Suroeste2'})+3237500X_({'1.85.82.5', 'Centro'})+3237500X_({'1.85.82.5', 'Noreste'})+
 3237500X_({'1.85.82.5', 'Noreste2'})+3237500X_({'1.85.82.5', 'Noroeste'})+3237500X_({'1.85.82.5', 'Noroeste2'})+3237500X_({'1.85.82.5', 'Norte'})+
 3237500X_({'1.85.82.5', 'Norte2'})+3237500X_({'1.85.82.5', 'Sur'})+3237500X_({'1.85.82.5', 'Sureste'})+3237500X_({'1.85.82.5', 'Sureste2'})+
 3237500X_({'1.85.82.5', 'Sureste3'})+3237500X_({'1.85.82.5', 'Suroeste'})+3237500X_({'1.85.82.5', 'Suroeste2'})+3237500X_({'1.85.87', 'Centro'})+
 3237500X_({'1.85.87', 'Noreste'})+3237500X_({'1.85.87', 'Noreste2'})+3237500X_({'1.85.87', 'Noroeste'})+3237500X_({'1.85.87', 'Noroeste2'})+
 3237500X_({'1.85.87', 'Norte'})+3237500X_({'1.85.87', 'Norte2'})+3237500X_({'1.85.87', 'Sur'})+3237500X_({'1.85.87', 'Sureste'})+
 3237500X_({'1.85.87', 'Sureste2'})+3237500X_({'1.85.87', 'Sureste3'})+3237500X_({'1.85.87', 'Suroeste'})+3237500X_({'1.85.87', 'Suroeste2'})+
 4725000X_({'2MW.116', 'Centro'})+4725000X_({'2MW.116', 'Noreste'})+4725000X_({'2MW.116', 'Noreste2'})+4725000X_({'2MW.116', 'Noroeste'})+
 4725000X_({'2MW.116', 'Noroeste2'})+4725000X_({'2MW.116', 'Norte'})+4725000X_({'2MW.116', 'Norte2'})+4725000X_({'2MW.116', 'Sur'})+
 4725000X_({'2MW.116', 'Sureste'})+4725000X_({'2MW.116', 'Sureste2'})+4725000X_({'2MW.116', 'Sureste3'})+4725000X_({'2MW.116', 'Suroeste'})+
 4725000X_({'2MW.116', 'Suroeste2'})+4900000X_({'2MW.127', 'Centro'})+4900000X_({'2MW.127', 'Noreste'})+4900000X_({'2MW.127', 'Noreste2'})+
 4900000X_({'2MW.127', 'Noroeste'})+4900000X_({'2MW.127', 'Noroeste2'})+4900000X_({'2MW.127', 'Norte'})+4900000X_({'2MW.127', 'Norte2'})+
 4900000X_({'2MW.127', 'Sur'})+4900000X_({'2MW.127', 'Sureste'})+4900000X_({'2MW.127', 'Sureste2'})+4900000X_({'2MW.127', 'Sureste3'})+
 4900000X_({'2MW.127', 'Suroeste'})+4900000X_({'2MW.127', 'Suroeste2'})+4725000X_({'2MW.132', 'Centro'})+4725000X_({'2MW.132', 'Noreste'})+
 4725000X_({'2MW.132', 'Noreste2'})+4725000X_({'2MW.132', 'Noroeste'})+4725000X_({'2MW.132', 'Noroeste2'})+4725000X_({'2MW.132', 'Norte'})+
 4725000X_({'2MW.132', 'Norte2'})+4725000X_({'2MW.132', 'Sur'})+4725000X_({'2MW.132', 'Sureste'})+4725000X_({'2MW.132', 'Sureste2'})+
 4725000X_({'2MW.132', 'Sureste3'})+4725000X_({'2MW.132', 'Suroeste'})+4725000X_({'2MW.132', 'Suroeste2'})+8400000X_({'4MW.158', 'Centro'})+
 8400000X_({'4MW.158', 'Noreste'})+8400000X_({'4MW.158', 'Noreste2'})+8400000X_({'4MW.158', 'Noroeste'})+8400000X_({'4MW.158', 'Noroeste2'})+
 8400000X_({'4MW.158', 'Norte'})+8400000X_({'4MW.158', 'Norte2'})+8400000X_({'4MW.158', 'Sur'})+8400000X_({'4MW.158', 'Sureste'})+
 8400000X_({'4MW.158', 'Sureste2'})+8400000X_({'4MW.158', 'Sureste3'})+8400000X_({'4MW.158', 'Suroeste'})+8400000X_({'4MW.158', 'Suroeste2'})+
 9275000X_({'5MW.158', 'Centro'})+9275000X_({'5MW.158', 'Noreste'})+9275000X_({'5MW.158', 'Noreste2'})+9275000X_({'5MW.158', 'Noroeste'})+
 9275000X_({'5MW.158', 'Noroeste2'})+9275000X_({'5MW.158', 'Norte'})+9275000X_({'5MW.158', 'Norte2'})+9275000X_({'5MW.158', 'Sur'})+
 9275000X_({'5MW.158', 'Sureste'})+9275000X_({'5MW.158', 'Sureste2'})+9275000X_({'5MW.158', 'Sureste3'})+9275000X_({'5MW.158', 'Suroeste'})+
 9275000X_({'5MW.158', 'Suroeste2'})+3675000X_({'S111', 'Centro'})+3675000X_({'S111', 'Noreste'})+3675000X_({'S111', 'Noreste2'})+
 3675000X_({'S111', 'Noroeste'})+3675000X_({'S111', 'Noroeste2'})+3675000X_({'S111', 'Norte'})+3675000X_({'S111', 'Norte2'})+
 3675000X_({'S111', 'Sur'})+3675000X_({'S111', 'Sureste'})+3675000X_({'S111', 'Sureste2'})+3675000X_({'S111', 'Sureste3'})+
 3675000X_({'S111', 'Suroeste'})+3675000X_({'S111', 'Suroeste2'})+3675000X_({'S120', 'Centro'})+3675000X_({'S120', 'Noreste'})+
 3675000X_({'S120', 'Noreste2'})+3675000X_({'S120', 'Noroeste'})+3675000X_({'S120', 'Noroeste2'})+3675000X_({'S120', 'Norte'})+
 3675000X_({'S120', 'Norte2'})+3675000X_({'S120', 'Sur'})+3675000X_({'S120', 'Sureste'})+3675000X_({'S120', 'Sureste2'})+
 3675000X_({'S120', 'Sureste3'})+3675000X_({'S120', 'Suroeste'})+3675000X_({'S120', 'Suroeste2'})+4725000X_({'S128', 'Centro'})+
 4725000X_({'S128', 'Noreste'})+4725000X_({'S128', 'Noreste2'})+4725000X_({'S128', 'Noroeste'})+4725000X_({'S128', 'Noroeste2'})+
 4725000X_({'S128', 'Norte'})+4725000X_({'S128', 'Norte2'})+4725000X_({'S128', 'Sur'})+4725000X_({'S128', 'Sureste'})+4725000X_({'S128', 'Sureste2'})+
 4725000X_({'S128', 'Sureste3'})+4725000X_({'S128', 'Suroeste'})+4725000X_({'S128', 'Suroeste2'})+3675000X_({'SG.2.1.114', 'Centro'})+
 3675000X_({'SG.2.1.114', 'Noreste'})+3675000X_({'SG.2.1.114', 'Noreste2'})+3675000X_({'SG.2.1.114', 'Noroeste'})+3675000X_({'SG.2.1.114', 'Noroeste2'})+
 3675000X_({'SG.2.1.114', 'Norte'})+3675000X_({'SG.2.1.114', 'Norte2'})+3675000X_({'SG.2.1.114', 'Sur'})+3675000X_({'SG.2.1.114', 'Sureste'})+
 3675000X_({'SG.2.1.114', 'Sureste2'})+3675000X_({'SG.2.1.114', 'Sureste3'})+3675000X_({'SG.2.1.114', 'Suroeste'})+3675000X_({'SG.2.1.114', 'Suroeste2'})+
 3850000X_({'SG.2.2.122', 'Centro'})+3850000X_({'SG.2.2.122', 'Noreste'})+3850000X_({'SG.2.2.122', 'Noreste2'})+3850000X_({'SG.2.2.122', 'Noroeste'})+
 3850000X_({'SG.2.2.122', 'Noroeste2'})+3850000X_({'SG.2.2.122', 'Norte'})+3850000X_({'SG.2.2.122', 'Norte2'})+3850000X_({'SG.2.2.122', 'Sur'})+
 3850000X_({'SG.2.2.122', 'Sureste'})+3850000X_({'SG.2.2.122', 'Sureste2'})+3850000X_({'SG.2.2.122', 'Sureste3'})+3850000X_({'SG.2.2.122', 'Suroeste'})+
 3850000X_({'SG.2.2.122', 'Suroeste2'})+4593750X_({'SG.2.6.114', 'Centro'})+4593750X_({'SG.2.6.114', 'Noreste'})+4593750X_({'SG.2.6.114', 'Noreste2'})+
 4593750X_({'SG.2.6.114', 'Noroeste'})+4593750X_({'SG.2.6.114', 'Noroeste2'})+4593750X_({'SG.2.6.114', 'Norte'})+4593750X_({'SG.2.6.114', 'Norte2'})+
 4593750X_({'SG.2.6.114', 'Sur'})+4593750X_({'SG.2.6.114', 'Sureste'})+4593750X_({'SG.2.6.114', 'Sureste2'})+4593750X_({'SG.2.6.114', 'Sureste3'})+
 4593750X_({'SG.2.6.114', 'Suroeste'})+4593750X_({'SG.2.6.114', 'Suroeste2'})+5075000X_({'SG.2.9.129', 'Centro'})+5075000X_({'SG.2.9.129', 'Noreste'})+
 5075000X_({'SG.2.9.129', 'Noreste2'})+5075000X_({'SG.2.9.129', 'Noroeste'})+5075000X_({'SG.2.9.129', 'Noroeste2'})+5075000X_({'SG.2.9.129', 'Norte'})+
 5075000X_({'SG.2.9.129', 'Norte2'})+5075000X_({'SG.2.9.129', 'Sur'})+5075000X_({'SG.2.9.129', 'Sureste'})+5075000X_({'SG.2.9.129', 'Sureste2'})+
 5075000X_({'SG.2.9.129', 'Sureste3'})+5075000X_({'SG.2.9.129', 'Suroeste'})+5075000X_({'SG.2.9.129', 'Suroeste2'})+6063750X_({'SG.3.4.132', 'Centro'})+
 6063750X_({'SG.3.4.132', 'Noreste'})+6063750X_({'SG.3.4.132', 'Noreste2'})+6063750X_({'SG.3.4.132', 'Noroeste'})+6063750X_({'SG.3.4.132', 'Noroeste2'})+
 6063750X_({'SG.3.4.132', 'Norte'})+6063750X_({'SG.3.4.132', 'Norte2'})+6063750X_({'SG.3.4.132', 'Sur'})+6063750X_({'SG.3.4.132', 'Sureste'})+
 6063750X_({'SG.3.4.132', 'Sureste2'})+6063750X_({'SG.3.4.132', 'Sureste3'})+6063750X_({'SG.3.4.132', 'Suroeste'})+6063750X_({'SG.3.4.132', 'Suroeste2'})+
 8750000X_({'SG.5.0.132', 'Centro'})+8750000X_({'SG.5.0.132', 'Noreste'})+8750000X_({'SG.5.0.132', 'Noreste2'})+8750000X_({'SG.5.0.132', 'Noroeste'})+
 8750000X_({'SG.5.0.132', 'Noroeste2'})+8750000X_({'SG.5.0.132', 'Norte'})+8750000X_({'SG.5.0.132', 'Norte2'})+8750000X_({'SG.5.0.132', 'Sur'})+
 8750000X_({'SG.5.0.132', 'Sureste'})+8750000X_({'SG.5.0.132', 'Sureste2'})+8750000X_({'SG.5.0.132', 'Sureste3'})+8750000X_({'SG.5.0.132', 'Suroeste'})+
 8750000X_({'SG.5.0.132', 'Suroeste2'})+8750000X_({'SG.5.0.145', 'Centro'})+8750000X_({'SG.5.0.145', 'Noreste'})+8750000X_({'SG.5.0.145', 'Noreste2'})+
 8750000X_({'SG.5.0.145', 'Noroeste'})+8750000X_({'SG.5.0.145', 'Noroeste2'})+8750000X_({'SG.5.0.145', 'Norte'})+8750000X_({'SG.5.0.145', 'Norte2'})+
 8750000X_({'SG.5.0.145', 'Sur'})+8750000X_({'SG.5.0.145', 'Sureste'})+8750000X_({'SG.5.0.145', 'Sureste2'})+8750000X_({'SG.5.0.145', 'Sureste3'})+
 8750000X_({'SG.5.0.145', 'Suroeste'})+8750000X_({'SG.5.0.145', 'Suroeste2'})+10150000X_({'SG.5.8.155', 'Centro'})+10150000X_({'SG.5.8.155', 'Noreste'})+
 10150000X_({'SG.5.8.155', 'Noreste2'})+10150000X_({'SG.5.8.155', 'Noroeste'})+10150000X_({'SG.5.8.155', 'Noroeste2'})+10150000X_({'SG.5.8.155', 'Norte'})+
 10150000X_({'SG.5.8.155', 'Norte2'})+10150000X_({'SG.5.8.155', 'Sur'})+10150000X_({'SG.5.8.155', 'Sureste'})+10150000X_({'SG.5.8.155', 'Sureste2'})+
 10150000X_({'SG.5.8.155', 'Sureste3'})+10150000X_({'SG.5.8.155', 'Suroeste'})+10150000X_({'SG.5.8.155', 'Suroeste2'})+10150000X_({'SG.5.8.170', 'Centro'})+
 10150000X_({'SG.5.8.170', 'Noreste'})+10150000X_({'SG.5.8.170', 'Noreste2'})+10150000X_({'SG.5.8.170', 'Noroeste'})+10150000X_({'SG.5.8.170', 'Noroeste2'})+
 10150000X_({'SG.5.8.170', 'Norte'})+10150000X_({'SG.5.8.170', 'Norte2'})+10150000X_({'SG.5.8.170', 'Sur'})+10150000X_({'SG.5.8.170', 'Sureste'})+
 10150000X_({'SG.5.8.170', 'Sureste2'})+10150000X_({'SG.5.8.170', 'Sureste3'})+10150000X_({'SG.5.8.170', 'Suroeste'})+10150000X_({'SG.5.8.170', 'Suroeste2'})+

6037500X_('(v136.3, 45MW', -'Sureste2') + 6037500X_('(v136.3, 45MW', -'Sureste3') + 6037500X_('(v136.3, 45MW', -'Suroeste') +
 6037500X_('(v136.3, 45MW', -'Suroeste2') + 7350000X_('(v136.4, 2MW', -'Centro') + 7350000X_('(v136.4, 2MW', -'Noreste') + 7350000X_('(v136.4, 2MW',
 7350000X_('(v136.4, 2MW', -'Noroeste') + 7350000X_('(v136.4, 2MW', -'Noroeste2') + 7350000X_('(v136.4, 2MW', -'Norte') + 7350000X_('(v136.4, 2MW',
 7350000X_('(v136.4, 2MW', -'Sur') + 7350000X_('(v136.4, 2MW', -'Sureste') + 7350000X_('(v136.4, 2MW', -'Sureste2') + 7350000X_('(v136.4, 2MW', -'Sur
 7350000X_('(v136.4, 2MW', -'Suroeste') + 7350000X_('(v136.4, 2MW', -'Suroeste2') + 7350000X_('(v150.4, 2MW', -'Centro') + 7350000X_('(v150.4, 2MW',
 7350000X_('(v150.4, 2MW', -'Noreste2') + 7350000X_('(v150.4, 2MW', -'Noroeste') + 7350000X_('(v150.4, 2MW', -'Noroeste2') +
 7350000X_('(v150.4, 2MW', -'Norte') + 7350000X_('(v150.4, 2MW', -'Norte2') + 7350000X_('(v150.4, 2MW', -'Sur') + 7350000X_('(v150.4, 2MW', -'Sureste
 7350000X_('(v150.4, 2MW', -'Sureste2') + 7350000X_('(v150.4, 2MW', -'Sureste3') + 7350000X_('(v150.4, 2MW', -'Suroeste') + 7350000X_('(v150.4, 2MW',
 2000000000

Variables $0 \leq X_('(1.7.100', -'Centro')Integer$

$0 \leq X_('(1.7.100', -'Noreste')Integer$

$0 \leq X_('(1.7.100', -'Noreste2')Integer$

$0 \leq X_('(1.7.100', -'Noroeste')Integer$

$0 \leq X_('(1.7.100', -'Noroeste2')Integer$

$0 \leq X_('(1.7.100', -'Norte')Integer$

$0 \leq X_('(1.7.100', -'Norte2')Integer$

$0 \leq X_('(1.7.100', -'Sur')Integer$

$0 \leq X_('(1.7.100', -'Sureste')Integer$

$0 \leq X_('(1.7.100', -'Sureste2')Integer$

$0 \leq X_('(1.7.100', -'Sureste3')Integer$

$0 \leq X_('(1.7.100', -'Suroeste')Integer$

$0 \leq X_('(1.7.100', -'Suroeste2')Integer$

$0 \leq X_('(1.7.103', -'Centro')Integer$

$0 \leq X_('(1.7.103', -'Noreste')Integer$

$0 \leq X_('(1.7.103', -'Noreste2')Integer$

$0 \leq X_('(1.7.103', -'Noroeste')Integer$

$0 \leq X_('(1.7.103', -'Noroeste2')Integer$

$0 \leq X_('(1.7.103', -'Norte')Integer$

$0 \leq X_('(1.7.103', -'Norte2')Integer$

$0 \leq X_('(1.7.103', -'Sur')Integer$

$0 \leq X_('(1.7.103', -'Sureste')Integer$

$0 \leq X_('(1.7.103', -'Sureste2')Integer$

$0 \leq X_('(1.7.103', -'Sureste3')Integer$

$0 \leq X_('(1.7.103', -'Suroeste')Integer$

$0 \leq X_('(1.7.103', -'Suroeste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('1.85.82.5', -'Centro')Integer$

$0 \leq X_{-}('1.85.82.5', -'Noreste')Integer$

$0 \leq X_{-}('1.85.82.5', -'Noreste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('1.85.82.5', -'Noroeste')Integer$

$0 \leq X_{-}('1.85.82.5', -'Noroeste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('1.85.82.5', -'Norte')Integer$

$0 \leq X_{-}('1.85.82.5', -'Norte2')Integer$

$0 \leq X_{-}('1.85.82.5', -'Sur')Integer$

$0 \leq X_{-}('1.85.82.5', -'Sureste')Integer$

$0 \leq X_{-}('1.85.82.5', -'Sureste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('1.85.82.5', -'Sureste3')Integer$

$0 \leq X_{-}('1.85.82.5', -'Suroeste')Integer$

$0 \leq X_{-}('1.85.82.5', -'Suroeste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('1.85.87', -'Centro')Integer$

$0 \leq X_{-}('1.85.87', -'Noreste')Integer$

$0 \leq X_{-}('1.85.87', -'Noreste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('1.85.87', -'Noroeste')Integer$

$0 \leq X_{-}('1.85.87', -'Noroeste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('1.85.87', -'Norte')Integer$

$0 \leq X_{-}('1.85.87', -'Norte2')Integer$

$0 \leq X_{-}('1.85.87', -'Sur')Integer$

$0 \leq X_{-}('1.85.87', -'Sureste')Integer$

$0 \leq X_{-}('1.85.87', -'Sureste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('1.85.87', -'Sureste3')Integer$

$0 \leq X_{-}('1.85.87', -'Suroeste')Integer$

$0 \leq X_{-}('1.85.87', -'Suroeste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('2MW.116', -'Centro')Integer$

$0 \leq X_{-}('2MW.116', -'Noreste')Integer$

$0 \leq X_{-}('2MW.116', -'Noreste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('2MW.116', -'Noroeste')Integer$

$0 \leq X_{-}('2MW.116', -'Noroeste2')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.116}', \cdot 'Norte')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.116}', \cdot 'Norte2')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.116}', \cdot 'Sur')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.116}', \cdot 'Sureste')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.116}', \cdot 'Sureste2')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.116}', \cdot 'Sureste3')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.116}', \cdot 'Suroeste')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.116}', \cdot 'Suroeste2')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.127}', \cdot 'Centro')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.127}', \cdot 'Noreste')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.127}', \cdot 'Noreste2')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.127}', \cdot 'Noroeste')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.127}', \cdot 'Noroeste2')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.127}', \cdot 'Norte')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.127}', \cdot 'Norte2')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.127}', \cdot 'Sur')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.127}', \cdot 'Sureste')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.127}', \cdot 'Sureste2')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.127}', \cdot 'Sureste3')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.127}', \cdot 'Suroeste')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.127}', \cdot 'Suroeste2')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.132}', \cdot 'Centro')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.132}', \cdot 'Noreste')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.132}', \cdot 'Noreste2')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.132}', \cdot 'Noroeste')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.132}', \cdot 'Noroeste2')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.132}', \cdot 'Norte')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.132}', \cdot 'Norte2')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.132}', \cdot 'Sur')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.132}', \cdot 'Sureste')Integer$

$0 \leq X_{\cdot}('2MW_{.132}', \cdot 'Sureste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('2MW.132', 'Sureste3')Integer$

$0 \leq X_{-}('2MW.132', 'Suroeste')Integer$

$0 \leq X_{-}('2MW.132', 'Suroeste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('4MW.158', 'Centro')Integer$

$0 \leq X_{-}('4MW.158', 'Noreste')Integer$

$0 \leq X_{-}('4MW.158', 'Noreste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('4MW.158', 'Noroeste')Integer$

$0 \leq X_{-}('4MW.158', 'Noroeste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('4MW.158', 'Norte')Integer$

$0 \leq X_{-}('4MW.158', 'Norte2')Integer$

$0 \leq X_{-}('4MW.158', 'Sur')Integer$

$0 \leq X_{-}('4MW.158', 'Sureste')Integer$

$0 \leq X_{-}('4MW.158', 'Sureste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('4MW.158', 'Sureste3')Integer$

$0 \leq X_{-}('4MW.158', 'Suroeste')Integer$

$0 \leq X_{-}('4MW.158', 'Suroeste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('5MW.158', 'Centro')Integer$

$0 \leq X_{-}('5MW.158', 'Noreste')Integer$

$0 \leq X_{-}('5MW.158', 'Noreste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('5MW.158', 'Noroeste')Integer$

$0 \leq X_{-}('5MW.158', 'Noroeste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('5MW.158', 'Norte')Integer$

$0 \leq X_{-}('5MW.158', 'Norte2')Integer$

$0 \leq X_{-}('5MW.158', 'Sur')Integer$

$0 \leq X_{-}('5MW.158', 'Sureste')Integer$

$0 \leq X_{-}('5MW.158', 'Sureste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('5MW.158', 'Sureste3')Integer$

$0 \leq X_{-}('5MW.158', 'Suroeste')Integer$

$0 \leq X_{-}('5MW.158', 'Suroeste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('S111', 'Centro')Integer$

$0 \leq X_{-}('S111', 'Noreste')Integer$

$0 \leq X_{-}('S111', 'Noreste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('S111', 'Noroeste')Integer$

$0 \leq X_{-}('S111', 'Noroeste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('S111', 'Norte')Integer$

$0 \leq X_{-}('S111', 'Norte2')Integer$

$0 \leq X_{-}('S111', 'Sur')Integer$

$0 \leq X_{-}('S111', 'Sureste')Integer$

$0 \leq X_{-}('S111', 'Sureste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('S111', 'Sureste3')Integer$

$0 \leq X_{-}('S111', 'Suroeste')Integer$

$0 \leq X_{-}('S111', 'Suroeste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('S120', 'Centro')Integer$

$0 \leq X_{-}('S120', 'Noreste')Integer$

$0 \leq X_{-}('S120', 'Noreste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('S120', 'Noroeste')Integer$

$0 \leq X_{-}('S120', 'Noroeste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('S120', 'Norte')Integer$

$0 \leq X_{-}('S120', 'Norte2')Integer$

$0 \leq X_{-}('S120', 'Sur')Integer$

$0 \leq X_{-}('S120', 'Sureste')Integer$

$0 \leq X_{-}('S120', 'Sureste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('S120', 'Sureste3')Integer$

$0 \leq X_{-}('S120', 'Suroeste')Integer$

$0 \leq X_{-}('S120', 'Suroeste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('S128', 'Centro')Integer$

$0 \leq X_{-}('S128', 'Noreste')Integer$

$0 \leq X_{-}('S128', 'Noreste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('S128', 'Noroeste')Integer$

$0 \leq X_{-}('S128', 'Noroeste2')Integer$

$0 \leq X_{-}('S128', 'Norte')Integer$

$0 \leq X_{-}('S128', 'Norte2')Integer$

$0 \leq X_{-}('S128', 'Sur')Integer$
 $0 \leq X_{-}('S128', 'Sureste')Integer$
 $0 \leq X_{-}('S128', 'Sureste2')Integer$
 $0 \leq X_{-}('S128', 'Sureste3')Integer$
 $0 \leq X_{-}('S128', 'Suroeste')Integer$
 $0 \leq X_{-}('S128', 'Suroeste2')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V105-3, 45MW', 'Suroeste2')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V116-2, 1MW', 'Centro')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V116-2, 1MW', 'Noreste')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V116-2, 1MW', 'Noreste2')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V116-2, 1MW', 'Noroeste')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V116-2, 1MW', 'Noroeste2')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V116-2, 1MW', 'Norte')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V116-2, 1MW', 'Norte2')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V116-2, 1MW', 'Sur')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V116-2, 1MW', 'Sureste')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V116-2, 1MW', 'Sureste2')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V116-2, 1MW', 'Sureste3')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V116-2, 1MW', 'Suroeste')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V116-2, 1MW', 'Suroeste2')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V120-2, 2MW', 'Centro')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V120-2, 2MW', 'Noreste')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V120-2, 2MW', 'Noreste2')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V120-2, 2MW', 'Noroeste')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V120-2, 2MW', 'Noroeste2')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V120-2, 2MW', 'Norte')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V120-2, 2MW', 'Norte2')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V120-2, 2MW', 'Sur')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V120-2, 2MW', 'Sureste')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V120-2, 2MW', 'Sureste2')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V120-2, 2MW', 'Sureste3')Integer$

$0 \leq X_{-}(V120.2, 2MW', \text{'Suroeste'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(V120.2, 2MW', \text{'Suroeste2'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(V138.3, 0MW', \text{'Centro'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(V138.3, 0MW', \text{'Noreste'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(V138.3, 0MW', \text{'Noreste2'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(V138.3, 0MW', \text{'Noroeste'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(V138.3, 0MW', \text{'Noroeste2'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(V138.3, 0MW', \text{'Norte'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(V138.3, 0MW', \text{'Norte2'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(V138.3, 0MW', \text{'Sur'})Integer$
 ...
 $0 \leq X_{-}(v136.3, 45MW', \text{'Sureste2'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(v136.3, 45MW', \text{'Sureste3'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(v136.3, 45MW', \text{'Suroeste'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(v136.3, 45MW', \text{'Suroeste2'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Centro'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Noreste'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Noreste2'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Noroeste'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Noroeste2'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Norte'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Norte2'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Sur'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Sureste'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Sureste2'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Sureste3'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Suroeste'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Suroeste2'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(v150.4, 2MW', \text{'Centro'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(v150.4, 2MW', \text{'Noreste'})Integer$
 $0 \leq X_{-}(v150.4, 2MW', \text{'Noreste2'})Integer$

$$0 \leq X_{\cdot}('v150.4, 2MW', \cdot'Noroeste')Integer$$

$$0 \leq X_{\cdot}('v150.4, 2MW', \cdot'Noroeste2')Integer$$

$$0 \leq X_{\cdot}('v150.4, 2MW', \cdot'Norte')Integer$$

$$0 \leq X_{\cdot}('v150.4, 2MW', \cdot'Norte2')Integer$$

$$0 \leq X_{\cdot}('v150.4, 2MW', \cdot'Sur')Integer$$

$$0 \leq X_{\cdot}('v150.4, 2MW', \cdot'Sureste')Integer$$

$$0 \leq X_{\cdot}('v150.4, 2MW', \cdot'Sureste2')Integer$$

$$0 \leq X_{\cdot}('v150.4, 2MW', \cdot'Sureste3')Integer$$

$$0 \leq X_{\cdot}('v150.4, 2MW', \cdot'Suroeste')Integer$$

$$0 \leq X_{\cdot}('v150.4, 2MW', \cdot'Suroeste2')Integer$$

A.5 TERCER MODELO DE OPTIMIZACIÓN IMPLEMENTANDO PULP - MATRIZ BINARIA

Maximizar función objetivo:

$$\begin{aligned}
 & 1.7 * X_{(1.7.100', 'Noroeste2')} + 1.7 * X_{(1.7.100', 'Noroeste')} + 1.7 * X_{(1.7.100', 'Noroeste2')} + 1.7 * X_{(1.7.100', 'Sureste')} + \\
 & 1.7 * X_{(1.7.100', 'Suroeste')} + 1.7 * X_{(1.7.103', 'Noroeste')} + 1.7 * X_{(1.7.103', 'Noroeste2')} + 1.7 * X_{(1.7.103', 'Noroeste')} + \\
 & 1.7 * X_{(1.7.103', 'Suroeste2')} + 1.7 * X_{(1.7.103', 'Sureste')} + 1.7 * X_{(1.7.103', 'Suroeste')} + 1.85 * X_{(1.85.82.5', 'Noroeste2')} + \\
 & 1.85 * X_{(1.85.87', 'Noroeste2')} + 2.7 * X_{(2MW.116', 'Noroeste')} + 2.7 * X_{(2MW.116', 'Noroeste2')} + 2.69630184354048 * \\
 & X_{(2MW.116', 'Sureste')} + 2.8 * X_{(2MW.127', 'Noroeste2')} + 2.8 * X_{(2MW.127', 'Noroeste')} + 2.8 * X_{(2MW.127', 'Noroeste2')} + \\
 & 2.8 * X_{(2MW.127', 'Sureste')} + 2.8 * X_{(2MW.127', 'Suroeste')} + 2.7 * X_{(2MW.132', 'Noroeste')} + 2.7 * X_{(2MW.132', 'Noroeste2')} + \\
 & 2.7 * X_{(2MW.132', 'Noroeste')} + 2.7 * X_{(2MW.132', 'Noroeste2')} + 2.7 * X_{(2MW.132', 'Sureste')} + 2.7 * X_{(2MW.132', 'Suroeste')} + \\
 & 4.8 * X_{(4MW.158', 'Noroeste')} + 4.8 * X_{(4MW.158', 'Noroeste2')} + 4.8 * X_{(4MW.158', 'Sureste')} + 5.3 * X_{(5MW.158', 'Noroeste')} + \\
 & 5.3 * X_{(5MW.158', 'Noroeste2')} + 2.1 * X_{(S111', 'Noroeste2')} + 2.1 * X_{(S111', 'Noroeste')} + 2.1 * X_{(S111', 'Noroeste2')} + \\
 & 2.1 * X_{(S111', 'Sureste')} + 2.1 * X_{(S120', 'Noroeste')} + 2.1 * X_{(S120', 'Noroeste2')} + 2.1 * X_{(S120', 'Noroeste')} + 2.1 * \\
 & X_{(S120', 'Noroeste')} + 2.1 * X_{(S120', 'Noroeste2')} + 2.1 * X_{(S120', 'Sureste')} + 2.1 * X_{(S120', 'Suroeste')} + 2.7 * \\
 & X_{(S128', 'Noroeste2')} + 2.7 * X_{(S128', 'Noroeste')} + 2.7 * X_{(S128', 'Noroeste2')} + 2.7 * X_{(S128', 'Sureste')} + 2.7 * \\
 & X_{(S128', 'Suroeste')} + 2.1 * X_{(SG.2.1.114', 'Noroeste2')} + 2.1 * X_{(SG.2.1.114', 'Noroeste')} + 2.1 * X_{(SG.2.1.114', 'Noroeste2')} + \\
 & 2.1 * X_{(SG.2.1.114', 'Sureste')} + 2.1 * X_{(SG.2.1.114', 'Suroeste')} + 2.2 * X_{(SG.2.2.122', 'Noroeste')} + 2.2 * X_{(SG.2.2.122', 'Noroeste2')} + \\
 & 2.2 * X_{(SG.2.2.122', 'Noroeste')} + 2.2 * X_{(SG.2.2.122', 'Noroeste2')} + 2.2 * X_{(SG.2.2.122', 'Sureste')} + 2.2 * X_{(SG.2.2.122', 'Suroeste')} + \\
 & 2.625 * X_{(SG.2.6.114', 'Noroeste')} + 2.625 * X_{(SG.2.6.114', 'Noroeste2')} + 2.6041969073635203 * X_{(SG.2.6.114', 'Sureste')} + \\
 & 2.9 * X_{(SG.2.9.129', 'Noroeste2')} + 2.9 * X_{(SG.2.9.129', 'Noroeste')} + 2.9 * X_{(SG.2.9.129', 'Noroeste2')} + 2.9 * X_{(SG.2.9.129', 'Sureste')} + \\
 & 2.9 * X_{(SG.2.9.129', 'Suroeste')} + 3.465 * X_{(SG.3.4.132', 'Noroeste')} + 3.465 * X_{(SG.3.4.132', 'Noroeste2')} + 3.465 * \\
 & X_{(SG.3.4.132', 'Sureste')} + 5.0 * X_{(SG.5.0.132', 'Noroeste2')} + 5.0 * X_{(SG.5.0.145', 'Noroeste')} + 5.0 * X_{(SG.5.0.145', 'Noroeste2')} + \\
 & 5.753691145323236 * X_{(SG.5.8.155', 'Noroeste')} + 5.8 * X_{(SG.5.8.155', 'Noroeste2')} + 5.8 * X_{(SG.5.8.170', 'Noroeste')} + \\
 & 5.8 * X_{(SG.5.8.170', 'Noroeste2')} + 5.79112975441728 * X_{(SG.5.8.170', 'Sureste')} + 3.9 * X_{(SWT.DD.120', 'Noroeste2')} + \\
 & 3.9 * X_{(SWT.DD.130', 'Noroeste')} + 3.9 * X_{(SWT.DD.130', 'Noroeste2')} + 3.5 * X_{(SWT.DD.142', 'Noroeste2')} + 3.5 * \\
 & X_{(SWT.DD.142', 'Noroeste')} + 3.5 * X_{(SWT.DD.142', 'Noroeste2')} + 3.5 * X_{(SWT.DD.142', 'Sureste')} + 3.5 * X_{(SWT.DD.142', 'Suroeste')} + \\
 & 2.0 * X_{(V100.1.2, 0MW', 'Noroeste2')} + 2.0 * X_{(V100.1.2, 0MW', 'Noroeste')} + 2.0 * X_{(V100.1.2, 0MW', 'Noroeste2')} + \\
 & 2.0 * X_{(V100.1.2, 0MW', 'Sureste')} + 2.0 * X_{(V100.1.2, 0MW', 'Suroeste')} + 2.0 * X_{(V100.2, 0MW', 'Noroeste')} + 2.0 * \\
 & X_{(V100.2, 0MW', 'Noroeste2')} + 2.0 * X_{(V100.2, 0MW', 'Sureste')} + 2.1 * X_{(V116.2, 1MW', 'Noroeste')} + 2.1 * X_{(V116.2, 1MW', 'Noroeste2')} + \\
 & 2.1 * X_{(V116.2, 1MW', 'Noroeste')} + 2.1 * X_{(V116.2, 1MW', 'Noroeste2')} + 2.1 * X_{(V116.2, 1MW', 'Sureste')} + 2.1 * \\
 & X_{(V116.2, 1MW', 'Suroeste')} + 2.2 * X_{(V120.2, 2MW', 'Noroeste')} + 2.2 * X_{(V120.2, 2MW', 'Noroeste2')} + 2.2 * X_{(V120.2, 2MW', 'Noroeste')} + \\
 & 2.2 * X_{(V120.2, 2MW', 'Noroeste2')} + 2.2 * X_{(V120.2, 2MW', 'Sureste')} + 2.2 * X_{(V120.2, 2MW', 'Suroeste')} + 3.0 * \\
 & X_{(V138.3, 0MW', 'Noroeste')} + 3.0 * X_{(V138.3, 0MW', 'Noroeste2')} + 3.0 * X_{(V138.3, 0MW', 'Noroeste')} + 3.0 * X_{(V138.3, 0MW', 'Noroeste2')} + \\
 & 3.0 * X_{(V138.3, 0MW', 'Sureste')} + 3.0 * X_{(V138.3, 0MW', 'Suroeste')} + 5.6 * X_{(V150.5, 6MW', 'Noroeste2')} + 5.6 * \\
 & X_{(V162.5, 6MW', 'Noroeste')} + 5.6 * X_{(V162.5, 6MW', 'Noroeste2')} + 2.0 * X_{(V90.2, 0MW', 'Noroeste2')} + 3.45 * X_{(v112.3, 45MW', 'Noroeste2')} + \\
 & 3.45 * X_{(v117.3, 45MW', 'Noroeste2')} + 4.0 * X_{(v117.4, 2MW', 'Noroeste2')} + 3.45 * X_{(v126.3, 45MW', 'Noroeste')} + \\
 & 3.45 * X_{(v126.3, 45MW', 'Noroeste2')} + 3.45 * X_{(v136.3, 45MW', 'Noroeste')} + 3.45 * X_{(v136.3, 45MW', 'Noroeste2')} + \\
 & 3.45 * X_{(v136.3, 45MW', 'Sureste')} + 4.2 * X_{(v136.4, 2MW', 'Noroeste')} + 4.2 * X_{(v136.4, 2MW', 'Noroeste2')} + 4.2 * \\
 & X_{(v150.4, 2MW', 'Noroeste')} + 4.2 * X_{(v150.4, 2MW', 'Noroeste2')} + 4.2 * X_{(v150.4, 2MW', 'Sureste')}
 \end{aligned}$$

Subjeto a:

$$\begin{aligned}
 C1 : & 70686X{(1.7.100', 'Sureste')} + 76454X_{(1.7.103', 'Sureste')} + 95115X_{(2MW.116', 'Sureste')} + 115812X_{(2MW.127', 'Sureste')} + \\
 & 123163X_{(2MW.132', 'Sureste')} + 176460X_{(4MW.158', 'Sureste')} + 88668X_{(S111', 'Sureste')} + 101788X_{(S120', 'Sureste')} + \\
 & 119459X_{(S128', 'Sureste')} + 91863X_{(SG.2.1.114', 'Sureste')} + 105209X_{(SG.2.2.122', 'Sureste')} + 91863X_{(SG.2.6.114', 'Sureste')} + \\
 & 119459X_{(SG.2.9.129', 'Sureste')} + 123163X_{(SG.3.4.132', 'Sureste')} + 204282X_{(SG.5.8.170', 'Sureste')} + 142531X_{(SWT.DD.142', 'Sureste')} + \\
 & 85530X_{(V100.1.2, 0MW', 'Sureste')} + 70686X_{(V100.2, 0MW', 'Sureste')} + 95115X_{(V116.2, 1MW', 'Sureste')} + 101788X_{(V120.2, 2MW', 'Sureste')} + \\
 & 134614X_{(V138.3, 0MW', 'Sureste')} + 130741X_{(v136.3, 45MW', 'Sureste')} + 159043X_{(v150.4, 2MW', 'Sureste')} \leq 140000
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C2 : & 76454X{(1.7.103', 'Noroeste')} + 123163X_{(2MW.132', 'Noroeste')} + 101788X_{(S120', 'Noroeste')} + 105209X_{(SG.2.2.122', 'Noroeste')} + \\
 & 95115X_{(V116.2, 1MW', 'Noroeste')} + 101788X_{(V120.2, 2MW', 'Noroeste')} + 134614X_{(V138.3, 0MW', 'Noroeste')} \leq 86800000
 \end{aligned}$$

$$_C3 : 0 \leq 1500000$$

$$_C4 : 70686X_{(1.7.100', 'Noroeste')} + 76454X_{(1.7.103', 'Noroeste')} + 95115X_{(2MW.116', 'Noroeste')} + 115812X_{(2MW.127', 'Noroeste')}$$

123163X₋('2MW_132', 'Noroeste')+176460X₋('4MW_158', 'Noroeste')+176460X₋('5MW_158', 'Noroeste')+88668X₋('S111', 'Noroeste')+
 101788X₋('S120', 'Noroeste')+119459X₋('S128', 'Noroeste')+91863X₋('SG_2.1.114', 'Noroeste')+105209X₋('SG_2.2.122', 'Noroeste')+
 91863X₋('SG_2.6.114', 'Noroeste')+119459X₋('SG_2.9.129', 'Noroeste')+123163X₋('SG_3.4.132', 'Noroeste')+150674X₋('SG_5.0.145', 'Noroeste')+
 172021X₋('SG_5.8.155', 'Noroeste')+204282X₋('SG_5.8.170', 'Noroeste')+119459X₋('SWT_DD_130', 'Noroeste')+142531X₋('SWT_DD_142', 'Noroeste')+
 85530X₋('V100.1.2, 0MW', 'Noroeste')+70686X₋('V100.2, 0MW', 'Noroeste')+95115X₋('V116.2, 1MW', 'Noroeste')+101788X₋('V120.2, 2MW', 'Noroeste')+
 134614X₋('V138.3, 0MW', 'Noroeste')+185508X₋('V162.5, 6MW', 'Noroeste')+112221X₋('v126.3, 45MW', 'Noroeste')+130741X₋('v136.3, 45MW', 'Noroeste')+
 130741X₋('v136.4, 2MW', 'Noroeste')+159043X₋('v150.4, 2MW', 'Noroeste') ≤ 110000

.C5 : 70686X₋('1.7.100', 'Suroeste')+76454X₋('1.7.103', 'Suroeste')+115812X₋('2MW_127', 'Suroeste')+123163X₋('2MW_132', 'Suroeste')+
 88668X₋('S111', 'Suroeste')+101788X₋('S120', 'Suroeste')+119459X₋('S128', 'Suroeste')+91863X₋('SG_2.1.114', 'Suroeste')+
 105209X₋('SG_2.2.122', 'Suroeste')+119459X₋('SG_2.9.129', 'Suroeste')+142531X₋('SWT_DD_142', 'Suroeste')+85530X₋('V100.1.2, 0MW', 'Suroeste')+
 95115X₋('V116.2, 1MW', 'Suroeste')+101788X₋('V120.2, 2MW', 'Suroeste')+134614X₋('V138.3, 0MW', 'Suroeste') ≤ 984500000

.C6 : 70686X₋('1.7.100', 'Noroeste2')+76454X₋('1.7.103', 'Noroeste2')+47529X₋('1.85.82.5', 'Noroeste2')+54739X₋('1.85.87', 'Noroeste2')+
 95115X₋('2MW_116', 'Noroeste2')+115812X₋('2MW_127', 'Noroeste2')+123163X₋('2MW_132', 'Noroeste2')+176460X₋('4MW_158', 'Noroeste2')+
 176460X₋('5MW_158', 'Noroeste2')+88668X₋('S111', 'Noroeste2')+101788X₋('S120', 'Noroeste2')+119459X₋('S128', 'Noroeste2')+
 91863X₋('SG_2.1.114', 'Noroeste2')+105209X₋('SG_2.2.122', 'Noroeste2')+91863X₋('SG_2.6.114', 'Noroeste2')+119459X₋('SG_2.9.129', 'Noroeste2')+
 123163X₋('SG_3.4.132', 'Noroeste2')+123163X₋('SG_5.0.132', 'Noroeste2')+150674X₋('SG_5.0.145', 'Noroeste2')+172021X₋('SG_5.8.155', 'Noroeste2')+
 204282X₋('SG_5.8.170', 'Noroeste2')+101788X₋('SWT_DD_120', 'Noroeste2')+119459X₋('SWT_DD_130', 'Noroeste2')+142531X₋('SWT_DD_142', 'Noroeste2')+
 85530X₋('V100.1.2, 0MW', 'Noroeste2')+70686X₋('V100.2, 0MW', 'Noroeste2')+95115X₋('V116.2, 1MW', 'Noroeste2')+
 101788X₋('V120.2, 2MW', 'Noroeste2')+134614X₋('V138.3, 0MW', 'Noroeste2')+159043X₋('V150.5, 6MW', 'Noroeste2')+
 185508X₋('V162.5, 6MW', 'Noroeste2')+57256X₋('V90.2, 0MW', 'Noroeste2')+88668X₋('v112.3, 45MW', 'Noroeste2')+98423X₋('v117.3, 45MW', 'Noroeste2')+
 98423X₋('v117.4, 2MW', 'Noroeste2')+112221X₋('v126.3, 45MW', 'Noroeste2')+130741X₋('v136.3, 45MW', 'Noroeste2')+
 130741X₋('v136.4, 2MW', 'Noroeste2')+159043X₋('v150.4, 2MW', 'Noroeste2') ≤ 1034000000

.C7 : 0 ≤ 207100000

.C8 : 70686X₋('1.7.100', 'Noreste2')+76454X₋('1.7.103', 'Noreste2')+115812X₋('2MW_127', 'Noreste2')+123163X₋('2MW_132', 'Noreste2')+
 88668X₋('S111', 'Noreste2')+101788X₋('S120', 'Noreste2')+119459X₋('S128', 'Noreste2')+91863X₋('SG_2.1.114', 'Noreste2')+
 105209X₋('SG_2.2.122', 'Noreste2')+119459X₋('SG_2.9.129', 'Noreste2')+142531X₋('SWT_DD_142', 'Noreste2')+85530X₋('V100.1.2, 0MW', 'Noreste2')+
 95115X₋('V116.2, 1MW', 'Noreste2')+101788X₋('V120.2, 2MW', 'Noreste2')+134614X₋('V138.3, 0MW', 'Noreste2') ≤ 239000000

.C9 : 0 ≤ 160000

.C10 : 0 ≤ 69000000

.C11 : 0 ≤ 1004400000

.C12 : 0 ≤ 180000

.C13 : 0 ≤ 150000

.C14 : 2975000X₋('1.7.100', 'Noreste2')+2975000X₋('1.7.100', 'Noroeste')+2975000X₋('1.7.100', 'Noroeste2')+2975000X₋('1.7.100', 'Suroeste')+
 2975000X₋('1.7.100', 'Suroeste')+2975000X₋('1.7.103', 'Noreste')+2975000X₋('1.7.103', 'Noreste2')+2975000X₋('1.7.103', 'Noroeste')+
 2975000X₋('1.7.103', 'Noroeste2')+2975000X₋('1.7.103', 'Suroeste')+2975000X₋('1.7.103', 'Suroeste2')+3237500X₋('1.85.82.5', 'Noroeste2')+
 3237500X₋('1.85.87', 'Noroeste2')+4725000X₋('2MW_116', 'Noroeste')+4725000X₋('2MW_116', 'Noroeste2')+4725000X₋('2MW_116', 'Suroeste')+
 4900000X₋('2MW_127', 'Noreste2')+4900000X₋('2MW_127', 'Noroeste')+4900000X₋('2MW_127', 'Noroeste2')+4900000X₋('2MW_127', 'Suroeste')+
 4900000X₋('2MW_127', 'Suroeste')+4725000X₋('2MW_132', 'Noreste')+4725000X₋('2MW_132', 'Noreste2')+4725000X₋('2MW_132', 'Noroeste')+
 4725000X₋('2MW_132', 'Noroeste2')+4725000X₋('2MW_132', 'Suroeste')+4725000X₋('2MW_132', 'Suroeste')+8400000X₋('4MW_158', 'Noroeste')+
 8400000X₋('4MW_158', 'Noroeste2')+8400000X₋('4MW_158', 'Suroeste')+9275000X₋('5MW_158', 'Noroeste')+9275000X₋('5MW_158', 'Noroeste2')+
 3675000X₋('S111', 'Noreste2')+3675000X₋('S111', 'Noroeste')+3675000X₋('S111', 'Noroeste2')+3675000X₋('S111', 'Suroeste')+
 3675000X₋('S111', 'Suroeste')+3675000X₋('S120', 'Noreste')+3675000X₋('S120', 'Noreste2')+3675000X₋('S120', 'Noroeste')+
 3675000X₋('S120', 'Noroeste2')+3675000X₋('S120', 'Suroeste')+3675000X₋('S120', 'Suroeste2')+4725000X₋('S128', 'Noreste2')+
 4725000X₋('S128', 'Noroeste')+4725000X₋('S128', 'Noroeste2')+4725000X₋('S128', 'Suroeste')+4725000X₋('S128', 'Suroeste2')+
 3675000X₋('SG_2.1.114', 'Noreste2')+3675000X₋('SG_2.1.114', 'Noroeste')+3675000X₋('SG_2.1.114', 'Noroeste2')+3675000X₋('SG_2.1.114', 'Suroeste')+
 3675000X₋('SG_2.1.114', 'Suroeste')+3850000X₋('SG_2.2.122', 'Noreste')+3850000X₋('SG_2.2.122', 'Noreste2')+3850000X₋('SG_2.2.122', 'Noroeste')+
 3850000X₋('SG_2.2.122', 'Noroeste2')+3850000X₋('SG_2.2.122', 'Suroeste')+3850000X₋('SG_2.2.122', 'Suroeste')+4593750X₋('SG_2.6.114', 'Noroeste')+
 4593750X₋('SG_2.6.114', 'Noroeste2')+4593750X₋('SG_2.6.114', 'Suroeste')+5075000X₋('SG_2.9.129', 'Noreste2')+5075000X₋('SG_2.9.129', 'Noroeste')+
 5075000X₋('SG_2.9.129', 'Noroeste2')+5075000X₋('SG_2.9.129', 'Suroeste')+5075000X₋('SG_2.9.129', 'Suroeste')+6063750X₋('SG_3.4.132', 'Noroeste')+
 6063750X₋('SG_3.4.132', 'Noroeste2')+6063750X₋('SG_3.4.132', 'Suroeste')+8750000X₋('SG_5.0.132', 'Noroeste2')+8750000X₋('SG_5.0.145', 'Noroeste')+
 8750000X₋('SG_5.0.145', 'Noroeste2')+10150000X₋('SG_5.8.155', 'Noroeste')+10150000X₋('SG_5.8.155', 'Noroeste2')+10150000X₋('SG_5.8.170', 'Noroeste')+
 10150000X₋('SG_5.8.170', 'Noroeste2')

$$\begin{aligned}
 &10150000X_{-}('SG.5.8.170', \text{'Noroeste2'}) + 10150000X_{-}('SG.5.8.170', \text{'Sureste'}) + 6825000X_{-}('SWT_DD.120', \text{'Noroeste2'}) + 6825000X_{-}('SWT_DD.130') \\
 &6825000X_{-}('SWT_DD.130', \text{'Noroeste2'}) + 6125000X_{-}('SWT_DD.142', \text{'Noroeste2'}) + 6125000X_{-}('SWT_DD.142', \text{'Noroeste'}) + \\
 &6125000X_{-}('SWT_DD.142', \text{'Noroeste2'}) + 6125000X_{-}('SWT_DD.142', \text{'Sureste'}) + 6125000X_{-}('SWT_DD.142', \text{'Suroeste'}) + \\
 &3500000X_{-}('V100.1.2, 0MW', \text{'Noroeste2'}) + 3500000X_{-}('V100.1.2, 0MW', \text{'Noroeste'}) + 3500000X_{-}('V100.1.2, 0MW', \text{'Noroeste2'}) + \\
 &3500000X_{-}('V100.1.2, 0MW', \text{'Sureste'}) + 3500000X_{-}('V100.1.2, 0MW', \text{'Suroeste'}) + 3500000X_{-}('V100.2, 0MW', \text{'Noroeste'}) + \\
 &3500000X_{-}('V100.2, 0MW', \text{'Noroeste2'}) + 3500000X_{-}('V100.2, 0MW', \text{'Sureste'}) + 3675000X_{-}('V116.2, 1MW', \text{'Noroeste'}) + \\
 &3675000X_{-}('V116.2, 1MW', \text{'Noroeste2'}) + 3675000X_{-}('V116.2, 1MW', \text{'Noroeste'}) + 3675000X_{-}('V116.2, 1MW', \text{'Noroeste2'}) + \\
 &3675000X_{-}('V116.2, 1MW', \text{'Sureste'}) + 3675000X_{-}('V116.2, 1MW', \text{'Suroeste'}) + 3850000X_{-}('V120.2, 2MW', \text{'Noroeste'}) + 3850000X_{-}('V120.2, 2MW') \\
 &3850000X_{-}('V120.2, 2MW', \text{'Noroeste'}) + 3850000X_{-}('V120.2, 2MW', \text{'Noroeste2'}) + 3850000X_{-}('V120.2, 2MW', \text{'Sureste'}) + \\
 &3850000X_{-}('V120.2, 2MW', \text{'Suroeste'}) + 5250000X_{-}('V138.3, 0MW', \text{'Noroeste'}) + 5250000X_{-}('V138.3, 0MW', \text{'Noroeste2'}) + \\
 &5250000X_{-}('V138.3, 0MW', \text{'Noroeste'}) + 5250000X_{-}('V138.3, 0MW', \text{'Noroeste2'}) + 5250000X_{-}('V138.3, 0MW', \text{'Sureste'}) + \\
 &5250000X_{-}('V138.3, 0MW', \text{'Suroeste'}) + 9800000X_{-}('V150.5, 6MW', \text{'Noroeste2'}) + 9800000X_{-}('V162.5, 6MW', \text{'Noroeste'}) + \\
 &9800000X_{-}('V162.5, 6MW', \text{'Noroeste2'}) + 3500000X_{-}('V90.2, 0MW', \text{'Noroeste2'}) + 6037500X_{-}('v112.3, 45MW', \text{'Noroeste2'}) + \\
 &6037500X_{-}('v117.3, 45MW', \text{'Noroeste2'}) + 7000000X_{-}('v117.4, 2MW', \text{'Noroeste2'}) + 6037500X_{-}('v126.3, 45MW', \text{'Noroeste'}) + \\
 &6037500X_{-}('v126.3, 45MW', \text{'Noroeste2'}) + 6037500X_{-}('v136.3, 45MW', \text{'Noroeste'}) + 6037500X_{-}('v136.3, 45MW', \text{'Noroeste2'}) + \\
 &6037500X_{-}('v136.3, 45MW', \text{'Sureste'}) + 7350000X_{-}('v136.4, 2MW', \text{'Noroeste'}) + 7350000X_{-}('v136.4, 2MW', \text{'Noroeste2'}) + \\
 &7350000X_{-}('v150.4, 2MW', \text{'Noroeste'}) + 7350000X_{-}('v150.4, 2MW', \text{'Noroeste2'}) + 7350000X_{-}('v150.4, 2MW', \text{'Sureste'}) \leq \\
 &2000000000
 \end{aligned}$$

Variables:

$$0 \leq X_{-}('1.7.100', \text{'Noroeste2'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}('1.7.100', \text{'Noroeste'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}('1.7.100', \text{'Noroeste2'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}('1.7.100', \text{'Sureste'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}('1.7.100', \text{'Suroeste'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}('1.7.103', \text{'Noroeste'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}('1.7.103', \text{'Noroeste2'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}('1.7.103', \text{'Noroeste'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}('1.7.103', \text{'Noroeste2'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}('1.7.103', \text{'Sureste'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}('1.7.103', \text{'Suroeste'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}('1.85.82.5', \text{'Noroeste2'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}('1.85.87', \text{'Noroeste2'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}('2MW.116', \text{'Noroeste'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}('2MW.116', \text{'Noroeste2'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}('2MW.116', \text{'Sureste'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}('2MW.127', \text{'Noroeste2'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}('2MW.127', \text{'Noroeste'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}('2MW.127', \text{'Noroeste2'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}('2MW.127', \text{'Sureste'})Integer$$

$0 \leq X_{-}('2MW.127', -'Suroeste')Integer$
 $0 \leq X_{-}('2MW.132', -'Noreste')Integer$
 $0 \leq X_{-}('2MW.132', -'Noreste2')Integer$
 $0 \leq X_{-}('2MW.132', -'Noroeste')Integer$
 $0 \leq X_{-}('2MW.132', -'Noroeste2')Integer$
 $0 \leq X_{-}('2MW.132', -'Sureste')Integer$
 $0 \leq X_{-}('2MW.132', -'Suroeste')Integer$
 $0 \leq X_{-}('4MW.158', -'Noroeste')Integer$
 $0 \leq X_{-}('4MW.158', -'Noroeste2')Integer$
 $0 \leq X_{-}('4MW.158', -'Sureste')Integer$
 $0 \leq X_{-}('5MW.158', -'Noroeste')Integer$
...
 $0 \leq X_{-}('V116.2, 1MW', -'Sureste')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V116.2, 1MW', -'Suroeste')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V120.2, 2MW', -'Noreste')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V120.2, 2MW', -'Noreste2')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V120.2, 2MW', -'Noroeste')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V120.2, 2MW', -'Noroeste2')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V120.2, 2MW', -'Sureste')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V120.2, 2MW', -'Suroeste')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V138.3, 0MW', -'Noreste')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V138.3, 0MW', -'Noreste2')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V138.3, 0MW', -'Noroeste')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V138.3, 0MW', -'Noroeste2')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V138.3, 0MW', -'Sureste')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V138.3, 0MW', -'Suroeste')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V150.5, 6MW', -'Noroeste2')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V162.5, 6MW', -'Noroeste')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V162.5, 6MW', -'Noroeste2')Integer$
 $0 \leq X_{-}('V90.2, 0MW', -'Noroeste2')Integer$
 $0 \leq X_{-}('v112.3, 45MW', -'Noroeste2')Integer$

$$0 \leq X_{-}(v117.3, 45MW', \text{'Noroeste2'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}(v117.4, 2MW', \text{'Noroeste2'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}(v126.3, 45MW', \text{'Noroeste'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}(v126.3, 45MW', \text{'Noroeste2'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}(v136.3, 45MW', \text{'Noroeste'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}(v136.3, 45MW', \text{'Noroeste2'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}(v136.3, 45MW', \text{'Sureste'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Noroeste'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}(v136.4, 2MW', \text{'Noroeste2'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}(v150.4, 2MW', \text{'Noroeste'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}(v150.4, 2MW', \text{'Noroeste2'})Integer$$

$$0 \leq X_{-}(v150.4, 2MW', \text{'Sureste'})Integer$$

BIBLIOGRAFÍA

- ACKERMANN, T. y L. SÖDER (2002), «Renewable and Sustainable Energy Reviews», en *An overview of wind energy-status*, tomo 6, págs. 67–127.
- AMIR, G. y H. MURTAZA (2015), *Beyond the hype : Big data concepts, methods, and analytics.*, tomo 35, Elsevier, páginas 137-144.
- ASSAD ARJANG A, G. S. I. (2011), «Profiles in Operations Research: Pioneers and Innovators.», *Springer US*.
- BANUELOS, F. (2011), *Impacto de la generación eléctrica usando fuentes de energía eólica en la red eléctrica nacional.*, Tesis Doctoral.
- BBCNEWS (2019), 2019, URL <https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-50811389>.
- BLASCHKE, T., M. BIBERACHER, S. GADOCHA y I. SCHARDINGER (2013), en *Energy landscapes: Meeting energy demands and human aspirations*, págs. 3–16.
- BLOOMBERGNEF (2020), URL <https://about.bnef.com/blog/latin-america-hit-new-clean-energy-investment-record-2019/>.
- BRITISHPETROLEUM (2019), 2019, URL <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook/demand-by-fuel/oil.html>.
- BURTON, T., N. JENKINS, D. SHARPE y E. BOS (2011), *Wind Energy Handbook*, segunda edición, 978-0-470-69975-1.

CALAF, M., C. MENEVEAU y J. MEYERS (2010), «Large eddy simulation study of fully developed wind-turbine array boundary layers», *Physics of Fluids*, **22**(1), pág. 015 110, <https://doi.org/10.1063/1.3291077>, URL <https://doi.org/10.1063/1.3291077>.

CHALMERS, S., C. BOTHOREL y R. PICOT-CLÉMENTE (2013), *Big Data - State of the Art*, Tesis Doctoral.

CHAPRA STEVEN, C. R. (2015), *Métodos numéricos para ingenieros.*, mc graw-hill edición, Séptima edición.

CHATTERJEE, P. (2013), «Big data: the greater good or invasion of privacy?», The Guardian, URL <https://www.theguardian.com/commentisfree/2013/mar/12/big-data-greater-good-privacy-invasion>.

CHUVIECO, E. y M. MARTÍN (2015), *Cuidar la Tierra: Razones para conservar la Naturaleza*, Digital Reasons editorial.

CONSULTORA-AMBIENTALES (2015), URL <https://ideasmedioambientales.com/distancias-entre-aerogeneradores/>.

COP25 (2019), 2019, URL <https://unfccc.int/es/cop25>.

DEMCHENKO, Y., C. DE LAAT y P. MEMBREY (2014), *Defining architecture components of the Big Data Ecosystem*, IEEE International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS).

DIEBOLD, F. (2012), «On the Origin(s) and Development of the Term 'Big Data'», *SSRN Electronic Journal*, págs. 12–37.

DONG, X. L. y D. SRIVASTAVA (2013), *Big data integration*, IEEE 29th International Conference on Data Engineering (ICDE).

ELECONOMISTA (2019), URL <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Mexico-estima-inversiones-por-4000-millones-de-dolares-en-energias-limpas-par.html>.

- EOLIVERTICAL (2019), «EÓLICA ONSHORE VS OFFSHORE», [02-08-2019], URL <http://www.eolivertical.es/2019/08/28/eolica-onshore-vs-offshore/>.
- EREN (2015), URL <https://energia.jcyl.es/web/es/energias-renovables-ordenacion-energetica/parques-eolicos.html>.
- FORBES (2018a), URL https://www.forbes.com.mx/mexico-terreno-fertil-para-las-energias-renovables/?utm_source=DreamsPushNotifications&utm_medium=push_notifications&utm_campaign=dreams_push_notify.
- FORBES (2018b), URL <https://www.forbes.com.mx/la-inversion-en-energias-verdes-en-mexico-crecio-casi-9-veces-en-2017/>.
- GARCÍA, L. A. E. (2015), *Emplazamientos eólicos en la provincia de chimborazo aplicando modelos matemáticos.*, Tesis Doctoral.
- GARCÍA GARRIDO, S. (2018), *Aerogeneradores y su mantenimiento.*, AUTOR-EDITOR, eSPAÑA.
- GARTNER (2017), «Gartner Identifies the Top 10 Strategic Technology Trends for 2018», URL <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2017-10-04-gartner-identifies-the-top-10-strategic-technology-trends-for-2018>.
- GASS SAUL, A. A. (2005), «Research, An Annotated Timeline of Operations», *Springer US*, (213).
- GLOBALCARBONATLAS (2019), 2019, URL <http://www.globalcarbonatlas.org/es/CO2-emissions>.
- HILLIER FREDERICK, L. G. (2015), *Investigación de operaciones.*, mc graw-hill edición.

- HURACANES.FIU.EDU (), «Escala de vientos Saffir-Simpson», URL <https://huracanes.fiu.edu/aprende-sobre-huracanes/vientos-fuertes/saffir-simpson-hurricane/index.html>.
- INTERNACIONAL, C. E. (2019), «Internacional, Comisión Electrotécnica», URL <https://webstore.iec.ch/>.
- JIN, X., B. W. WAH, X. CHENG y Y. WANG (2014), *Significance and Challenges of Big Data Research*, tomo 2, Elsevier, páginas 59-64.
- JOHN B, R. (2015), «Metodología fundamental para la ciencia de datos.», *IBM Analytics*.
- LEON, J. I. V. (2013), *Optimización de un sistema eólico, mediante la caracterización de un régimen de viento en la localidad de lomas-arequipa.*, Tesis de Maestría.
- LOHR, S. (2013a), «Big Data Is Opening Doors, but Maybe Too Many.», The New York Times, URL <https://www.nytimes.com/2013/03/24/technology/big-data-and-a-renewed-debate-over-privacy.html>.
- LOHR, S. (2013b), «The Origins of Big Data: An Etymological Detective Story», The New York Times, URL <https://bits.blogs.nytimes.com/2013/02/01/the-origins-of-big-data-an-etymological-detective-story/>.
- LOKHANDE, A., R. CHALAPATHY, M. HE, E. JO, M. GANG, S. PAWAR, C. LOKHANDE y J. KIM (2016), «Development of Cu₂SnS₃ (CTS) Thin Film Solar Cells by Physical Techniques: A Status Review», *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **153**, págs. 84–107.
- LÓPEZ, M. V. (2012), *Ingeniería de la Energía Eólica*, marcombo edición, [ISBN 978-84-267-1856-3].
- MACAFEE, E., ANDREW; BRYNJOLFSSON (2012), «Big data: The management revolution», *Harvard Business Review*, págs. 61–68.

- MARR, B. (2015), *Big Data: Using SMART Big Data, Analytics And Metrics To Make Better Decisions And Improve Performance.*, teell edición.
- MARTÍN, E. P. (2011), *Aplicabilidad de los modelos de evaluación de inversiones en condiciones de riesgo al análisis de rentabilidad de centrales eólicas.*, Tesis de Maestría.
- MICROSOFT (2012), «Microsoft News Center, The Big Bang: How the Big Data Explosion Is Changing the World», [última vez accedido: 26-03-2020], URL <https://news.microsoft.com/2013/02/11/the-big-bang-how-the-big-data-explosion-is-changing-the-world/>.
- MILENIO (2020), junio 10 del 2020, URL <https://www.milenio.com/negocios/energias-renovables-superaron-282-mil-mdd-inversion-2019>.
- MORA, J. C. (2008), *Optimización global de parques eólicos mediante algoritmos evolutivos.*, Tesis de Maestría.
- MORABITO, V. (2015), *Big data and analytics: Strategic and organizational impacts.*, springer edición.
- POSPIECH, M. y C. FELDEN (2012), «Big Data - A State-of-the-Art», en *AMCIS*.
- PULP (2020), URL <https://coin-or.github.io/pulp/>.
- RENOVETEC (2010), URL www.mantenimientodeaerogeneradores.com/index.php/parametros-caracteristicos-de-un-parque-eolico.
- REVELLE CHARLES, W. J., WHITLATCH EARL (1997), *Civil and enviromental systems engineering.*, pearson prentice hall edición.
- RUIZ, C. H. O. (2011), *Modelado de la generación eólica para estudios en redes eléctricas*, Tesis de Maestría.
- SAUL, G. (2011), «Model World: On the Evolution of Operations Research», *SSRN Electronic Journal*, **41**, págs. 389–393.

SCHMARZO, B. (2013), *Big Data. El Poder de los Datos.*, anaya. wiley. edición.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Mauricio Alejandro Ríos Palacio

Candidato para obtener el grado de
Doctor en ingeniería
especialidad en ingeniería de sistemas

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

MODELO HÍBRIDO DE ANÁLISIS DE DATOS Y OPTIMIZACIÓN PARA
LA PLANEACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA

Mauricio Alejandro Ríos Palacio (Abejorral, 27 de abril de 1984) Ingeniero de sistemas Colombiano, su padre Rodrigo de Jesús Ríos y madre Luz Dary Palacio Londoño. Mauricio es un ingeniero graduado de la Universidad Simón Bolívar de la ciudad de Barranquilla, cursó además una posgrado en la misma universidad obteniendo el título de magíster en ingeniería de sistemas y computación. Cuenta con más de 13 años experiencia como docente universitario en ingeniería de sistemas.