

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



CURSO DE ESPECIALIZACIÓN: ENERGÍAS RENOVABLES
ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DEL POTENCIAL EÓLICO
EN CARRETERAS DE EL SALVADOR

PRESENTADO POR:
FRANCISCO ARMANDO PONCE BLANCO
WILFREDO ORELLANA DUEÑAS
WILBER ANTONIO FRANCO MENJÍVAR

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO DE 2026

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :
M.Sc. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL :

Lic. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

M.Sc. e Ing. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

SECRETARIO :

Arq. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR :

M.Sc. e Ing. GUSTAVO SALOMÓN TORRES RÍOS LAZO

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CURSO DE ESPECIALIZACIÓN: ENERGÍAS RENOVABLES

Trabajo de Aplicación previo a la opción al Grado de:
INGENIERO MECÁNICO

Título:

**ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DEL POTENCIAL EÓLICO
EN CARRETERAS DE EL SALVADOR**

Presentado por:

**FRANCISCO ARMANDO PONCE BLANCO
WILFREDO ORELLANA DUEÑAS
WILBER ANTONIO FRANCO MENJÍVAR**

Trabajo de Aplicación aprobado por:

Docente asesor:

M.Sc. ALBERTO ANTONIO ROSA LUE

San Salvador, febrero de 2026

Trabajo de Aplicación Aprobado por:

Docente Asesor:

M.Sc. ALBERTO ANTONIO ROSA LUE

Tribunal Calificador:

F. _____

M.Sc. Miguel Tomás Amaya Gómez

F. _____

M.Sc. Alberto Antonio Rosa Lue

F. _____

Ing. Francisco Alfredo De León Torres

Índice General

INTRODUCCIÓN.....	I
OBJETIVOS.....	II
OBJETIVO GENERAL	II
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	II
ANTECEDENTES	III
LIMITACIONES DEL ESTUDIO.....	V
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	VI
ALCANCES.....	VII
JUSTIFICACIÓN.....	VIII
1 MARCO TEÓRICO: ENERGÍA EÓLICA Y SU APROVECHAMIENTO.....	1
1.1 Energía eólica y su aprovechamiento.....	1
1.1.1 Antecedentes	1
1.1.2 Turbina eólica moderna.	3
1.2 Viento inducido por tráfico vehicular.	5
1.3 Tipos de aerogeneradores.....	6
1.3.1 Descripción de aerogeneradores de eje vertical	7
1.3.2 Aerogeneradores Savonius	7
1.3.3 Funcionamiento del rotor Savonius.	11
1.3.4 Factores que modifican el Rendimiento	12
1.3.5 Aerogeneradores Darrieus.	15
1.3.6 Principio de funcionamiento	15
1.4 Sitios óptimos para la medición y aprovechamiento del potencial energético del viento en carreteras	20
1.4.1 Criterios para selección de sitios de medición y aprovechamiento	21
1.5 Caso de estudio en México	22
1.5.1 Introducción y Objetivo del Estudio.....	22
1.5.2 Diseño Experimental	22
1.5.3 Resultados Principales:	24
1.5.4 Implicaciones para el Diseño de Turbinas	25
1.5.5 Estimación de Potencial Energético	25

1.6	Aplicaciones de la micro generación eólica en entornos urbanos	26
1.6.1	Aplicaciones	27
1.6.2	Aplicaciones de la micro generación eólica en entornos urbanos	27
1.7	Normativas y Regulaciones Sobre Energía Renovable En El Salvador.....	33
1.7.1	Ley de Incentivos Fiscales para el Fomento de Energías Renovables en la Generación de Electricidad (D.L. No. 462).....	33
1.7.2	Ley General de Electricidad (D.L. No. 843)	34
1.7.3	Política Energética Nacional 2020–2050	34
1.7.4	Ley de Medio Ambiente (D.L. No. 233)	34
1.7.5	Ley de Ordenamiento y Desarrollo Territorial	35
1.7.6	Reglamento de Operación del Sistema de Transmisión y del Mercado Mayorista	35
1.7.7	Permisos requeridos para implementación	36
1.7.8	Recomendaciones para el cumplimiento normativo.....	36
2	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	38
2.1	Enfoque de la investigación.....	38
2.2	Diseño del estudio.	38
2.3	Técnicas de recopilación de datos.....	39
2.3.1	Medición y tratamiento de los datos eólicos	39
2.4	Selección de la altura de medición	41
2.4.1	Velocidad del viento	42
2.4.2	Tratamiento estadístico del viento	43
2.5	Herramientas y equipos utilizados	45
2.5.1	Medición de las magnitudes del viento: el anemómetro.	46
2.5.2	Medición de la dirección del viento: la veleta.....	48
2.5.3	Colocación de los instrumentos de medida.	49
2.6	Análisis y procedimiento de datos.....	50
2.7	Aplicación de la estadística a cálculos eólicos	57
2.7.1	Tratamiento estadístico de los datos del viento.....	62
2.8	Validación de los resultados.....	64
2.9	Selección de la Carretera	65
2.9.1	Tramos de carretera evaluados	66
2.9.2	Criterios de selección.....	69

2.9.3	Análisis de flujo Vehicular y Tipo de Vehículos	70
2.9.4	Selección de carretera	72
2.9.5	Sitio ganador	72
3	DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DISPONIBLE	73
3.1	Diseño de la campaña de medición:.....	73
3.2	Equipo de medición	74
3.3	Procesamiento de datos	75
3.4	Distribución de Weibull.....	75
3.5	Rosa de los vientos	81
3.6	Condiciones ambientales durante la campaña de medición de velocidad.	84
3.7	Estaciones meteorológicas.....	88
3.8	Software de apoyo para la estimación del potencial eólico	90
3.8.1	Uso de Google Maps como herramienta de apoyo logístico y geoespacial 90	
3.8.2	Wind Navigator como herramienta para el análisis preliminar del recurso eólico 91	
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	97
4.1	Selección del aerogenerador.....	98
4.2	Análisis de la viabilidad del aprovechamiento energético.....	102
4.2.1	Comportamiento del recurso eólico inducido	103
4.2.2	Evaluación energética del aerogenerador seleccionado	104
4.3	Discusión de resultados.....	105
5	PRESUPUESTO PARA LA INVESTIGACIÓN.	107
5.1	Costos estimados de materiales y equipos.....	107
5.2	Factores que pueden afectar la viabilidad económica de la realización del proyecto.....	111
	CONCLUSIONES.....	113
	Conclusiones generales del estudio	113
	RECOMENDACIONES PARA INVESTIGACIONES FUTURAS	115
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117
	ANEXOS	119
	ANEXO A: FOTOS SITIOS EVALUADOS CA-2	119
	ANEXO B: FOTOS SITIOS RN-5.....	126

ANEXO C: FOTOS CA-12.....	135
ANEXO D: FOTOS CA-8.....	141

Índice de Figuras.

Figura n.º 1.1 Comparación del coeficiente de potencia para distintos tipos de rotores, Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición.	6
Figura n.º 1.2 Esquema Típico de un rotor Savonius, Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición.	8
Figura n.º 1.3 Diagrama de Torque Estático para Savonius de dos y tres aspas, Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición	9
Figura n.º 1.4 Rotor Savonius Clásico, vista tridimensional del rotor. Vista superior, flujo de viento alrededor de las palas, Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición	10
Figura n.º 1.5 Funcionamiento de una Turbina Savonius. Fuente: es.scribd.com/AEROGENERADORES-VERTICALES.....	11
Figura n.º 1.6 Esquema que muestra la relación de Superposición en un Aerogenerador de Eje Vertical.....	12
Figura n.º 1.7 Relación de Torque-Turbulencia en un Aerogenerador de eje vertical...	13
Figura n.º 1.8 Relación de Aspecto en rotores de Eje Vertical.	13
Figura n.º 1.9 Relación de aspecto en diseños VAWT. Fuente: es.scribd.com/document/632532574/AEROGENERADORES-VERTICALES.....	14
Figura n.º 1.10 Estructura de la Turbina Darrieus con Álabes de perfil Troposkein, Fuente: es.scribd.com/document/632532574/AEROGENERADORES-VERTICALES.	17
Figura n.º 1.11 Datps de dlseño de Turbina Quiet Revolution (Izq.) y Turbina Giromil tipo H (Der.), Fuente: brighthub.com/environment/renewable-energy.	18
Figura n.º 1.12 Aerogenerador Windside (Izq.) Aerogenerador Sea Hawk (Der.), Fuente: brighthub.com/environment/renewable-energy	19
Figura n.º 1.13 Factores comparativos por cada tipo de Aerogenerador, Fuente: Ingeniería de la energía eólica, Miguel Villarrubia López Edición en español 2012.	20
Figura n.º 1.14 Sitios evaluados caso de estudio en México, Fuente: Designs México IPN.....	23
Figura n.º 1.15 Instrumento utilizado caso de México, Fuente: Designs México IPN....	23
Figura n.º 1.16 Proyecto Wind Road, Módulos metálicos para aerogeneradores. Fuente: Wind Road.com	31
Figura n.º 2.1 Tipos de anemómetros de cazoletas Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición	47
Figura n.º 2.2 Conjunto de anemómetro de hélice y veleta Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición	47
Figura n.º 2.3 Influencia de un obstáculo en la circulación del viento Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición	49
Figura n.º 2.4 Volumen de influencia de un obstáculo. El sensor debe situarse fuera de ese volumen Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición.....	49

Figura n.º 2.5 Rosa de direcciones de frecuencias porcentuales. Porcentaje de tiempo anual durante el que el viento procede de una dirección, Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición	53
Figura n.º 2.6 Velocidades medias y frecuencias en porcentaje temporal (Valores anuales) correspondiente a los valores de la tabla 2.3 Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición	55
Figura n.º 2.7 Rosas de los vientos de 8 rumbos par los valores de la Tabla 2.3. Velocidad media del viento (m/s) para cada dirección (Izq.) y Frecuencia para cada dirección (Der.) Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición	55
Figura n.º 2.8 Rosas de direcciones de ocho rumbos del ejemplo 2 Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición	56
Figura n.º 2.9 Histograma de frecuencias relativas (ejemplo 3) Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición	61
Figura n.º 2.10 Frecuencias relativas acumuladas "menor o igual que" (ejemplo 3) Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición	61
Figura n.º 2.11 Frecuencia relativa acumuladas "mayor que" (ejemplo 3) Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición	62
Figura n.º 2.12 Curva de la duración de la velocidad o curva de velocidades frente a frecuencias acumuladas Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición	62
Figura n.º 2.13 Curva de frecuencia de la velocidad horaria del viento. Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición.	63
Figura n.º 2.14 Curva de duración de la velocidad (el punto P indica que durante el año hay 2000 horas en las que la velocidad del viento es igual o mayor que 9,2 m/s), Fuente:	64
Figura n.º 2.15 Tramo de carretera RN-5, Fuente: Google Maps.....	66
Figura n.º 2.16 Ilustración de Carretera CA-8, Fuente: Google Maps.....	66
Figura n.º 2.17 Imagen que muestra la carretera CA-2. Fuente: Google Maps.	67
Figura n.º 2.18 Imagen que ilustra la carretera CA-12. Fuente: Google Maps.	68
Figura n.º 2.19 Número de vehículos observado durante 12 horas en 20 estaciones estratégicas del país, Fuente JICA Study Team, 2003.....	70
Figura n.º 2.20 Imagen del sitio ganador utilizando la Matriz de Pugh, Fuente: Propia.	72
Figura n.º 3.1 Imagen del sitio ganador, Fuente: Google Earth.....	73
Figura n.º 3.2 Campaña de medición equipados con herramientas y EPP, Fuente: Propia.	74
Figura n.º 3.3 Veleta que muestra las direcciones del viento, Fuente: Propia.	74
Figura n.º 3.4 Distribución de Weibull global del viento inducido ($k= 12.92$; $c= 3.93$ m/s), Fuente: Propia.	76
Figura n.º 3.5 Distribución de Weibull promedio cada 10 min: 6 a.m. global del viento inducido ($k= 8.46$; $c= 3.91$ m/s) , Fuente: Propia.....	77
Figura n.º 3.6 Distribución de Weibull promedio cada 10 min: 9 a.m. global del viento inducido ($k= 33.78$.; $c= 3.89$ m/s) , Fuente: Propia.	77
Figura n.º 3.7 Distribución de Weibull promedio cada 10 min: 5 a.m. global del viento inducido ($k= 35.22$.; $c= 3.9$ m/s) , Fuente: Propia.....	78

Figura n.º 3.8 Distribución de Weibull promedio cada 10 min: 7 a.m. global del viento inducido (k= 25.92.; c= 4.04 m/s), Fuente: Propia.....	78
Figura n.º 3.9 Distribución de Weibull promedio cada 10 min: 8 a.m. global del viento inducido (k= 35. 78.; c= 3.89 m/s) , Fuente: Propia.....	79
Figura n.º 3.10 Distribución de Weibull promedio cada 10 min: 12 a.m. global del viento inducido (k= 25. 70.; c= 4.04 m/s), Fuente: Propia.	79
Figura n.º 3.11 Distribución de Weibull promedio cada 10 min: 8 a.m. global del viento inducido (k= 9.14.; c= 3.74 m/s), Fuente: Propia.....	80
Figura n.º 3.12 Distribución de Weibull promedio cada 10 min: 8 a.m. global del viento inducido (k= 27. 62.; c= 4.21 m/s), Fuente: Propia.	80
Figura n.º 3.13 Rosa de los vientos, frecuencia de vientos predominante en 16 días, Fuente: Propia.	81
Figura n.º 3.14 Rosa de los vientos, velocidad promedio de 16 días, Fuente: Propia. .	82
Figura n.º 3.15 Rosa de los vientos, densidad de potencia de 16 días, Fuente: Propia.	82
Figura n.º 3.16 Rosa de los vientos, porcentaje de energía en 16 días, Fuente: Propia.	83
Figura n.º 3.17 Rosa de los vientos, densidad de energía en 16 días, Fuente: Propia.	83
Figura n.º 3.18 Condiciones aproximadas durante la campaña de medición, Fuente: sitesatlas.	84
Figura n.º.3.19 Ejemplo de estación meteorológica del Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC), la ya cuenta con seis estaciones en El Salvador. Fuente: icc.org.gt	89
Figura n.º 3.20 Las estaciones meteorológicas de Grupo CASSA, en El Salvador son parte de la Red de Estaciones Meteorológicas y Sistema de Información Meteorológico -REDMET- administrada por el ICC. Fuente: icc.org.gt	89
Figura n.º 3.21 Ajuste de coordenadas y las condiciones de la zona de carretera CA-2, Fuente: Wind Navigator.	94
Figura n.º 3.23 Velocidad de viento esperado en tramo de carretera CA-2, Fuente: Wind Navigator.	95
Figura n.º 3.24 Datos que pueden ser obtenidos a partir de Software en línea, Fuente: Wind Navigator.	96
Figura n.º 4.1 Esquema de aerogenerador con mejores características, Fuente: Propia.	99
Figura n.º 4.2 Curva de Potencia-Velocidad de Egenwaywind, Fuente: Propia.....	100

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Tabla de permisos y entidades responsables en implementación de proyectos relacionados, Fuente: Propia.....	36
Tabla 2.1 Tabla que muestra las direcciones de donde procede el viento, Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición	43
Tabla 2.2 Velocidad media y dirección dominante mensual del viento Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición	51

Tabla 2.3 Frecuencia por dirección y grupo de velocidad (velocidad media anual) Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición.	54
Tabla 2.4 Tabla de frecuencia de dirección de vientos del ejemplo 2 Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición	57
Tabla 2.5 Número de clases en función del número de datos Fuente: Ingeniería Eólica- Miguel Villarrubia López- 1ra Edición	58
Tabla 2.6 Velocidades medias diarias. Frecuencia relativas y acumuladas (ejemplo 3) Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición	60
Tabla 2.7 Criterios para la selección de carreteras para la investigación, Fuente: Propia.	69
Tabla 2.8 Herramienta para seleccionar carretera más óptima, Matriz de Pugh, Fuente: Propia.	72
Tabla 3.1 Datos registrados en campaña de medición en los primeros 3 minutos de medición para los primeros días de campaña de medición. Fuente propia.....	85
Tabla 3.2 Parte de la tabla que contiene la base de datos de las mediciones promedio que se utilizó para la investigación. Fuente: Propia.	87
Tabla 3.3 Comparativa de los datos que podríamos encontrar tomando como punto de partida el Software Wind Navigator y la que se obtuvo con el anemómetro., Fuente: Propia.	96
Tabla 4.1 Datos de aerogeneradores con sus especificaciones, Fuente: Propia.	98
Tabla 4.2 Velocidades de operación para 4 aerogeneradores, Fuente: Propia.	98
Tabla 4.3 Dimensiones de diseño para los cuatro aerogeneradores en estudio. , Fuente: Propia.	98
Tabla 4.4 Producción de energía resultante por cada aerogenerador, Fuente: Propia.	99
Tabla 4.5 Aplicación de datos obtenidos al Aerogenerador Savonius 800 W, Fuente: Propia.	100
Tabla 4.6 Datos obtenidos a partir de la frecuencia de orientación de la velocidad del viento en las mediciones, Fuente: Propia.	101
Tabla 4.7 Producción de energía en kWh, Fuente: Propia.....	101
Tabla 5.1 Costos de herramientas, materiales y equipos de la investigación, Fuente: Propia.	108
Tabla 5.2 Alimentación e hidratación consumida durante la campaña de mediciones, Fuente: Propia.	109
Tabla 5.3 Presupuesto de costo de horas hombres durante la campaña de mediciones, Fuente: Propia.	109
Tabla 5.4 Costos asociados a el desplazamiento hacia puntos de medición., Fuente: Propia.	110
Tabla 5.5 Costos directos de la investigación, Fuente: Propia.	110
Tabla 5.6 Costos indirectos de la investigación., Fuente: Propia.	111
Tabla 5.7 Total general del proyecto, Fuente: Propia.....	111

Índice de Anexos.

Anexo 0.1 CA-2, Fuente: Propia.....	119
Anexo 0.2 CA-2, Fuente: Propia.....	120
Anexo 0.3 CA-2, Fuente: Propia.....	120
Anexo 0.4 CA-2, Fuente: Propia.....	121
Anexo 0.5 CA-2, Fuente: Propia.....	121
Anexo 0.6 CA-2, Fuente: Propia.....	121
Anexo 0.7 CA-2, Fuente: Propia.....	122
Anexo 0.8 CA-2, Fuente: Propia.....	122
Anexo 0.9 CA-2, Fuente: Propia.....	123
Anexo 0.10 CA-2, Fuente: Propia.....	123
Anexo 0.11 CA-2, Fuente: Propia.....	124
Anexo 0.12 CA-2, Fuente: Propia.....	124
Anexo 0.13 CA-2, Fuente: Propia.....	125
Anexo 0.14 CA-2, Fuente: Propia.....	125
Anexo 0.15 RN-5, Fuente: Propia.....	126
Anexo 0.16 RN-5, Fuente: Propia.....	127
Anexo 0.17 RN-5, Fuente: Propia.....	128
Anexo 0.18 RN-5, Fuente: Propia.....	129
Anexo 0.19 RN-5, Fuente: Propia.....	130
Anexo 0.20 RN-5, Fuente: Propia.....	131
Anexo 0.21 RN-5, Fuente: Propia.....	131
Anexo 0.22 RN-5, Fuente: Propia.....	132
Anexo 0.23 RN-5, Fuente: Propia.....	132
Anexo 0.24 RN-5, Fuente: Propia.....	133
Anexo 0.25 RN-5, Fuente: Propia.....	133
Anexo 0.26 RN-5, Fuente: Propia.....	134
Anexo 0.27 RN-5, Fuente: Propia.....	134
Anexo 0.28 RN-5, Fuente: Propia.....	135
Anexo 0.29 CA-12, Fuente: Propia.....	135
Anexo 0.30 CA-12, Fuente: Propia.....	136
Anexo 0.31 CA-12, Fuente: Propia.....	136
Anexo 0.32 CA-12, Fuente: Propia.....	137
Anexo 0.33 CA-12, Fuente: Propia.....	137
Anexo 0.34 CA-12, Fuente: Propia.....	138
Anexo 0.35 CA-12, Fuente: Propia.....	138
Anexo 0.36 CA-12, Fuente: Propia.....	139
Anexo 0.37 CA-12, Fuente: Propia.....	139
Anexo 0.38 CA-12, Fuente: Propia.....	140
Anexo 0.39 CA-12, Fuente: Propia.....	140
Anexo 0.40 CA-12, Fuente: Propia.....	141
Anexo 0.41 CA-8, Fuente: Propia.....	141
Anexo 0.42 CA-8, Fuente: Propia.....	142

Anexo 0.43 CA-8, Fuente: Propia.....	142
Anexo 0.44 CA-8, Fuente: Propia.....	143
Anexo 0.45 CA-8, Fuente: Propia.....	143
Anexo 0.46 CA-8, Fuente: Propia.....	144
Anexo 0.47 CA-8, Fuente: Propia.....	144
Anexo 0.48 CA-8, Fuente: Propia.....	145
Anexo 0.49 Base de datos suavizada con las mediciones promedio tomadas en la campaña de medición. Fuente: Propia.....	146
Anexo 0.50 Continuación de Base de datos suavizada con las mediciones promedio tomadas en la campaña de medición. Fuente: Propia.....	147

GENERALIDADES

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la demanda energética y la necesidad de reducir la dependencia de fuentes fósiles han impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles para la generación de electricidad. La energía eólica ha demostrado ser una opción viable y eficiente. Sin embargo, el aprovechamiento de este recurso no se limita únicamente a las corrientes de viento naturales, sino que también pueden considerarse flujos de aire generados por actividades humanas, como el tránsito vehicular.

Este estudio de prefactibilidad analiza el potencial del recurso eólico generado por la circulación vehicular en algunas carreteras de El Salvador. Se busca determinar si las corrientes de aire inducidas por el tráfico pueden ser utilizadas como una fuente alternativa de energía. Para ello, se evalúan aspectos como la velocidad y dirección del flujo de aire, las condiciones meteorológicas de la zona y la viabilidad técnica y económica de implementar sistemas de generación eólica.

La investigación pretende proponer soluciones para el aprovechamiento eficiente de recurso eólico que suelen ser desaprovechados.

Actualmente existen una serie de configuraciones de aerogeneradores, pero dependiendo de las condiciones así será el aerogenerador para seleccionar.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- ✓ Evaluar el potencial del recurso eólico en un sector específico de una de las carreteras de El Salvador con el fin de determinar su viabilidad para la generación de energía.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Realizar una revisión de fuentes de información sobre metodologías y técnicas de medición del recurso eólico en infraestructuras viales.
- ✓ Identificar y seleccionar ubicaciones idóneas en carreteras de El Salvador para la medición del recurso eólico.
- ✓ Recolectar información para la selección de la carretera más idónea sujeta a estudio.
- ✓ Delimitar el tramo específico de carretera seleccionada, que será sometido a medición de velocidades de viento.
- ✓ Diseñar e implementar un sistema de medición para recopilar datos de velocidad y dirección del viento en el tramo de la carretera seleccionada.
- ✓ Analizar el flujo vehicular y las velocidades promedio en carreteras seleccionadas.

- ✓ Evaluar el potencial energético disponible, evaluando la capacidad teórica de conversión de las corrientes de aire en energía aprovechable

ANTECEDENTES

La energía eólica constituye una de las fuentes renovables de mayor crecimiento a nivel mundial, impulsada por la necesidad de diversificar las matrices energéticas y disminuir la dependencia de los combustibles fósiles. Tradicionalmente, su aprovechamiento se ha concentrado en zonas con elevados regímenes de viento natural, tales como llanuras abiertas, áreas costeras y regiones montañosas. Sin embargo, en las últimas décadas ha surgido un interés creciente por explorar nuevas alternativas de generación distribuida, entre ellas la micro generación eólica en entornos urbanos y periurbanos, donde se utilizan aerogeneradores de baja potencia capaces de operar con vientos turbulentos y de magnitud moderada.

En el caso de El Salvador en 2024 entró en operación el Parque Eólico Metapán (Parque Eólico Ventus), ubicado en el departamento de Santa Ana, el cual se convirtió en el primer proyecto eólico de escala comercial en el país. En El Salvador, la generación eólica es incipiente, pero ya cuenta con un hito importante: el Parque Eólico Ventus (Metapán), el primer parque eólico comercial del país. Este parque tiene una capacidad instalada de 54 MW, según el Ministerio de Economía. Está compuesto por 15 turbinas Vestas V136-3.6 (cada una de ~3,6 MW). Se estima que este parque produce alrededor de 170 GWh al año. Así mismo, instituciones como el Consejo Nacional de Energía (CNE) y la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL) han impulsado estudios preliminares de viento en sectores estratégicos, orientados a identificar nuevas áreas aptas para futuras inversiones.

A pesar de estos avances, no existen estudios en El Salvador orientados a evaluar el potencial eólico no convencional asociado a corrientes inducidas por la circulación vehicular en carreteras, lo cual representa un vacío de información relevante para el desarrollo de soluciones innovadoras de microgeneración. La exploración de este tipo de recurso es particularmente pertinente en la infraestructura vial del país, donde el creciente flujo de automóviles, autobuses y transporte de carga genera corrientes de aire con magnitudes que podrían ser aprovechadas para alimentar sistemas de iluminación, señalización o dispositivos de monitoreo vial.

La Carretera de El Salvador se configura como un corredor estratégico para este análisis debido a su alto nivel de tránsito, características geométricas y disponibilidad de espacio para la posible instalación de equipos experimentales o piloto. La caracterización del viento inducido por vehículos en este tipo de entorno permitiría conocer la variabilidad, estabilidad y magnitud del recurso, aspectos esenciales para determinar su viabilidad energética.

En este contexto, se vuelve necesario desarrollar un estudio de prefactibilidad del recurso eólico generado por corrientes vehiculares, con el propósito de estimar su potencial aprovechamiento a través de microturbinas eólicas de eje vertical. La ausencia de investigaciones previas en el país sobre esta temática otorga relevancia científica y tecnológica al presente trabajo, que busca sentar las bases para futuros proyectos de innovación en energías renovables aplicadas a infraestructura vial.

LIMITACIONES DEL ESTUDIO

- ✓ El estudio se enfocará en un número limitado de carreteras seleccionadas, por lo que los resultados no serán representativos de todo el país.
- ✓ Se implementará una metodología de medición basada en instrumentos adecuados para la recopilación de datos de velocidad y dirección del viento en los puntos seleccionados.
- ✓ La estimación del viento inducido se realizará mediante mediciones directas y cálculos teóricos, lo que implica cierto margen de error debido a la instrumentación utilizada y las suposiciones del modelo matemático.
- ✓ La investigación se desarrollará dentro de un periodo determinado, el cual incluirá la planificación, recolección de datos, análisis y evaluación de resultados.
- ✓ No se incluirá un estudio detallado sobre el impacto ambiental, la factibilidad económica ni el diseño de sistemas eólicos para su implementación en carretera.
- ✓ Los resultados servirán como referencia para la evaluación preliminar del aprovechamiento eólico en infraestructura vial, sin abordar diseños específicos ni estudios económicos detallados.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El crecimiento de la demanda energética en El Salvador y la necesidad de diversificar la matriz eléctrica han impulsado la búsqueda de fuentes alternativas y sostenibles de generación de energía. La energía eólica es una opción prometedora, pero su aprovechamiento en el país ha sido limitado a zonas con condiciones naturales favorables. Sin embargo, existen flujos de aire generados por la circulación vehicular que podrían representar un recurso energético aún no explorado.

El Salvador tiene carreteras con un alto volumen de tráfico diario. La constante circulación de vehículos genera corrientes de aire cuyo potencial energético no ha sido evaluado. A pesar de que estudios en otros países han demostrado la viabilidad de captar esta energía con sistemas eólicos adaptados, en El Salvador no se han desarrollado investigaciones que analicen su aplicabilidad en el contexto local.

El problema radica en la falta de estudios que determinen la factibilidad técnica y económica de aprovechar el viento inducido por el tráfico vehicular como fuente de generación eléctrica. La ausencia de datos concretos sobre la velocidad y dirección de estos flujos de aire, así como su impacto en la eficiencia de los aerogeneradores, dificulta la toma de decisiones para su implementación.

Por ello, esta investigación busca determinar el potencial energético en algunas carreteras de El Salvador. Para ello, se realizará un análisis de prefactibilidad que permitirá evaluar el potencial de este recurso y su posible contribución a la generación de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables en el país.

ALCANCES

- ✓ El estudio se llevará a cabo durante un período mínimo de 9 meses, en donde se espera obtener la recolección de datos, análisis de estos y redacción del informe final.
- ✓ No se considerará un análisis a nivel nacional, sino en puntos estratégicos previamente definidos según criterios de accesibilidad y relevancia.
- ✓ La investigación se enfocará en carreteras específicas dentro de El Salvador, priorizando aquellas con alto flujo vehicular y condiciones propicias para el aprovechamiento del viento. Así como, por ejemplo, la RN-5 conocida como “Carretera a Comalapa”, que es una de las principales carreteras de la red vial de El Salvador, identificada por su alto tráfico vehicular.
- ✓ Se recopilarán datos de velocidad y dirección del viento en diferentes condiciones de tráfico y horarios.
- ✓ Se emplearán metodologías de estimación del recurso eólico basadas en datos meteorológicos históricos y/o mediciones en campo.
- ✓ Se realizará un análisis del comportamiento del viento en carreteras seleccionadas de El Salvador, en base a las condiciones geográficas del entorno.
- ✓ Se discutirá el potencial del recurso eólico en carreteras como una fuente alternativa de energía, pero sin realizar un estudio de factibilidad financiera detallado.

JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, la demanda de energía renovable ha crecido considerablemente debido a la necesidad de reducir la dependencia de fuentes fósiles y mitigar el impacto ambiental de la generación eléctrica. En este contexto, es fundamental explorar nuevas formas de aprovechamiento energético, especialmente en países como El Salvador, donde las fuentes tradicionales de energía renovable aún tienen limitaciones en su expansión.

Uno de los sectores con mayor consumo energético y mayor impacto ambiental es el transporte, ya que el tráfico vehicular genera no solo emisiones contaminantes, sino también flujos de aire que actualmente se desaprovechan. Este estudio se realiza porque existe la hipótesis de que el viento inducido por la circulación vehicular en carreteras podría representar un recurso energético potencial, capaz de ser aprovechado mediante sistemas de micro generación eólica.

La falta de estudios previos en el país sobre este tipo de recurso motiva la necesidad de investigar si realmente es viable captar y transformar esta energía en electricidad de manera eficiente y sostenible.

Este estudio permitirá:

- ✓ Cuantificar el potencial eólico generado por el tráfico vehicular en carreteras estratégicas de El Salvador.
- ✓ Determinar si este flujo de aire tiene características adecuadas para la generación de energía
- ✓ Explorar tecnologías que podrían adaptarse a este contexto para convertir el viento inducido en electricidad útil.

Además, la investigación es relevante porque podría sentar las bases para el desarrollo de sistemas de energía limpia en infraestructura vial, con aplicaciones en alumbrado público, señalización y carga de dispositivos eléctricos.

Desde una perspectiva ambiental y social, este estudio contribuye a la sostenibilidad, al proponer alternativas que optimicen la infraestructura existente sin requerir grandes inversiones ni generar impactos negativos en el entorno.

1 MARCO TEÓRICO: ENERGÍA EÓLICA Y SU APROVECHAMIENTO

1.1 Energía eólica y su aprovechamiento.

1.1.1 Antecedentes

Un molino es una máquina que transforma el viento en energía aprovechable, que proviene de la acción de la fuerza del viento sobre unas aspas oblicuas unidas a un eje común. El eje giratorio puede conectarse a varios tipos de maquinaria para moler grano, bombear agua o generar electricidad. Cuando el eje se conecta a una carga, como una bomba, recibe el nombre de molino de viento. Si se usa para producir electricidad se le denomina generador de turbina de viento.

Siglo XII D.C.

En este siglo ya se construyen molinos de viento en Europa. Este tipo de molino de viento se fabricaba sobre un poste vertical, con un sistema rotacional de manera que el molino pudiera moverse con la dirección del viento. Estos molinos verticales eran comúnmente utilizados para moler maíz o bombear agua.

Siglo XIII D.C.

Los molinos de torre, fueron el diseño más novedoso en el oeste de Europa durante este siglo. Estos molinos se construían en grandes torres de piedra, tenían aspas y un rotor montado en el techo de la torre. Se colocaba también una veleta detrás de las aspas, para guiarlas en la dirección del viento.

Siglo XIX D.C.

En 1887, el inventor estadounidense Charles Brush, construyó la primera turbina eólica automática. Se le llamó "turbina eólica" por primera vez y no "molino de viento" ya que se utilizaba para generar electricidad. La turbina eólica pesaba 4 toneladas y alimentaba a un generador de 12 kW de potencia.

1922

La turbina eólica Savonius, es una turbina de ejes verticales inventada por el ingeniero finlandés Sigurd Johannes Savonius. La turbina Savonius es un dispositivo de arrastre, es decir que la energía rotacional se genera por el empuje del viento y no por sustentación aerodinámica, como la mayoría de las turbinas modernas.

1927

La turbina eólica Giromill, es una turbina de eje vertical con diseño Darrieus. La turbina Giromill utiliza sustentación en vez de arrastre y es habitualmente fabricada con dos o tres aspas que rotan alrededor de un eje central. La turbina Giromill es una turbina de baja eficiencia ya que necesita de vientos de alta velocidad para comenzar a rotar.

1931

La turbina eólica Darrieus es también conocida como la turbina "batidora de huevos". Inventada por el ingeniero francés Georges Jean Marie Darrieus. El diseño de esta turbina usualmente consta de dos aspas que giran en torno a una torre de eje vertical, con un generador eléctrico cerca de la base de la máquina.

1931

La turbina eólica Darrieus es también conocida como la turbina “batidora de huevos”. Inventada por el ingeniero francés Georges Jean Marie Darrieus. El diseño de esta turbina usualmente consta de dos aspas que giran en torno a una torre de eje vertical, con un generador eléctrico cerca de la base de la máquina.

1941

En 1941 la turbina eólica Smith-Putnam, fue la primera turbina eólica de tamaño mega watt. Era una turbina con dos aspas de 53 metros de diámetro y construida sobre una torre de celosía de 36 metros de alto. Sólo operó por 1100 horas, hasta que una de las aspas falló.

el gran interés por esta energía renovables vino con la primera crisis del petróleo (1973), y en los años 80, surgió el boom industrial y tecnológico para los generadores modernos.

1.1.2 Turbina eólica moderna.

La turbina eólica moderna, es el resultado de años de desarrollo e investigación científica. Hoy en día, la mayoría de las turbinas modernas provienen de la familia de las turbinas con ejes horizontales y tienen 3 aspas. Las aspas o palas de las turbinas eólicas tienen un diseño similar a las alas de los aviones y utilizan el sustento aerodinámico del viento para rotar. Las turbinas modernas fueron desarrolladas a comienzos de 1980, si bien, los diseños continúan en desarrollo. La industria de la energía eólica en tiempos modernos comenzó en 1979 con la producción en serie de turbinas de viento por los fabricantes Kuriant, Vestas, Nordtank, y Bonus. Aquellas turbinas eran pequeñas para los estándares actuales, con capacidades de 20 a 30 kW cada una. Desde entonces, la talla de

las turbinas ha crecido enormemente, y la producción se ha expandido a muchos países.

La energía eólica, es la energía cinética en las masas de aire en movimiento (viento). Este tipo de energía renovable es aprovechada mediante aerogeneradores, que transforman el movimiento del viento en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica.

El aprovechamiento de la energía eólica sucede. Cuando el viento incide sobre las palas del rotor de un aerogenerador, estas giran, accionando un eje conectado a un generador eléctrico. Este sistema convierte la energía mecánica del movimiento rotacional en electricidad útil.

La cantidad de energía que puede obtenerse del viento depende de varios factores, entre ellos:

- La velocidad del viento, siendo la energía disponible proporcional al cubo de esta.
- La densidad del aire, que varía según la altitud y la temperatura.
- El área barrida por el rotor del aerogenerador, que influye directamente en el volumen de aire aprovechado.

La energía eólica ofrece numerosas ventajas: es una fuente limpia, inagotable y no contaminante. Sin embargo, también presenta desafíos, como la intermitencia del viento, el impacto visual y los requerimientos de espacio para los parques eólicos.

Actualmente, la energía eólica es una de las fuentes renovables más desarrolladas y extendidas en el mundo, desempeñando un papel clave en la transición hacia un modelo energético sostenible.

1.2 Viento inducido por tráfico vehicular.

El viento generado por los vehículos depende de factores como el tamaño, forma y velocidad del vehículo, esta energía cinética del viento se puede aprovechar para generar electricidad.

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A v_w^3, \quad (1)$$

P : potencia

C_p : Limite Betz

ρ : Densidad del viento

A : Área de sección transversal de la turbina

v_w : Velocidad del viento

λ es conocida como relación de velocidad periférica (TSR)

$$\lambda = TSR = \frac{(\text{Velocidad periférica del álabe})}{\text{Velocidad del viento}}, \quad (2)$$

La ley de Betz describe la máxima potencia que puede extraer la turbina eólica, Esta ley concluye que ningún aerogenerador puede convertir más de 59,3% de la energía cinética del viento en energía mecánica.

1.3 Tipos de aerogeneradores

El tipo de turbina más utilizado para aprovechar la energía eólica en carreteras son los aerogeneradores de eje vertical como Savonius (arrastre) o Darrieus (sustentación) ya que estos funcionan bien con vientos turbulentos y cambiantes además de ser compactos y silenciosos.

Las turbinas Savonius, trabajan a velocidades de viento menores, poseen un mayor torque de arranque y menor rendimiento aerodinámico en comparación a las de sustentación.

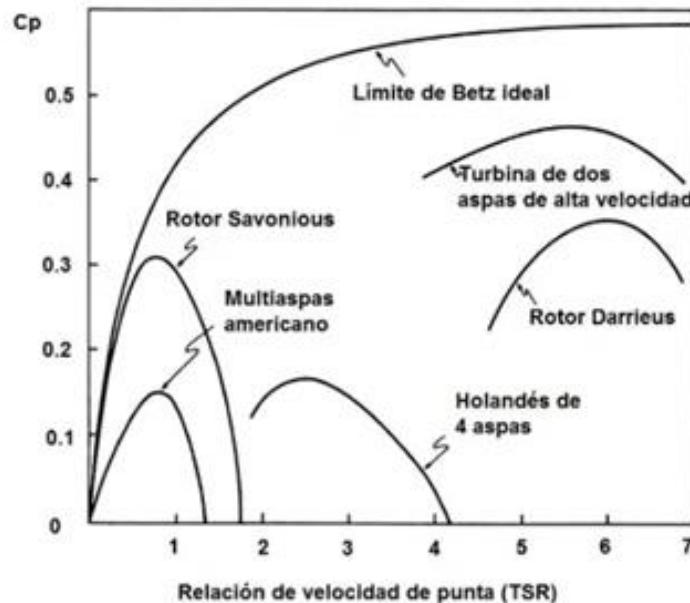


Figura n.º 1.1 Comparación del coeficiente de potencia para distintos tipos de rotores, Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición.

1.3.1 Descripción de aerogeneradores de eje vertical

Los aerogeneradores de eje vertical giran perpendicularmente al suelo y el eje está orientado de forma vertical. Este tipo de turbina funciona gracias al arrastre, elevación o una combinación de ambos para funcionar, existen dos tipos de aerogeneradores VAWT y ambos modelos funcionan con principios diferentes. El primero es Savonius que usa la fuerza de arrastre del viento, una analogía correcta sería una rueda hidráulica que usa el agua para moverse. El segundo modelo es el Darrieus que usa una pala aerodinámica para generar elevación y así generar una rotación en el eje. Estos aerogeneradores no han recibido tanta atención en el desarrollo e investigación como los HAWT, pero tiene algunas ventajas sobre estas, la primera es que es omnidireccional, es decir no es afectado por los cambios de dirección del viento, la segunda es que no requiere fuertes vientos por ello es posible la instalación de estas en áreas urbanas. El tercero que la estructura es más sencilla y de más fácil mantenimiento y facilita el control de esta y por último son más silenciosos donde un HAWT produce un nivel de ruido de 95 dB un VAWT produce 38 dB.

1.3.2 Aerogeneradores Savonius

Sigurd J Savonius fue un inventor finlandés conocido principalmente por haber desarrollado el rotor Savonius en el campo de la energía eólica, en la década de 1920 Savonius se concentró especialmente en el control de los flujos de aire y usó la energía eólica para llevar a cabo su idea, en 1924 Sigurd desarrolló un rotor común cilindro abierto a la circulación de aire. El Savonius se utiliza mayormente para la producción de energía a pequeña escala. Se caracteriza por aspas cuya forma se asemeja a barriles cortados por la mitad es extremadamente silencioso, no requiere de sistemas de orientación y puede soportar vientos fuertes sin sufrir daños. Al no requerir sistemas de orientación se evitan mecanismos de direccionamiento complejos y se eliminan los esfuerzos a los que se ven

sometidas las aspas ante los cambios de orientación del rotor. Tienen un alto par de arranque, pero su eficiencia es pobre, se emplean en aplicaciones que requieren bajas potencias como es el caso de extractores de aire en grandes edificios industriales y en bombeo de agua.

Está constituido por dos semicilindros desplazados entre sí, este desplazamiento hace que el cambio en la dirección del fluido sea más fácil, adicionalmente se aprovecha de la cantidad de movimiento del fluido

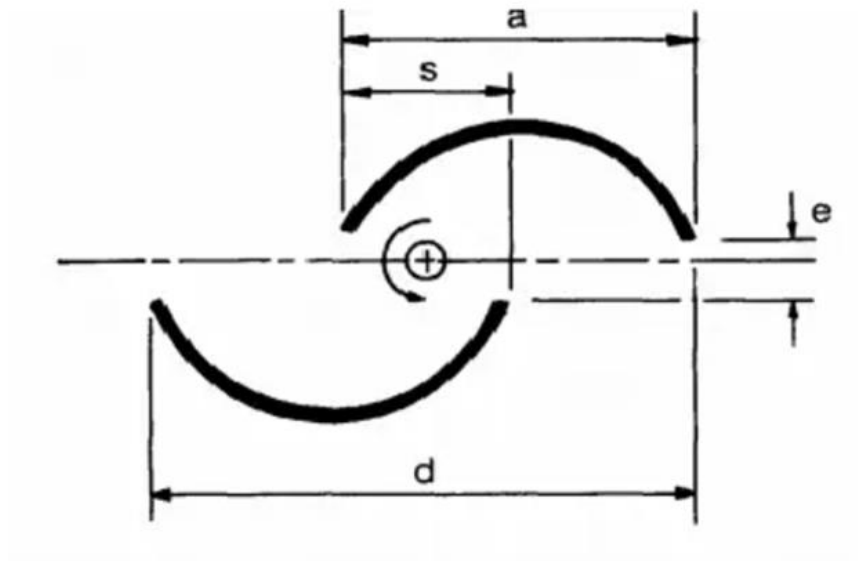


Figura n.º 1.2 Esquema Típico de un rotor Savonius, Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición.

El (C_p) es el coeficiente potencia generada por el viento, los parámetros mas importantes para el rotor savonius, siendo S el traslapo y d la distancia comprendida entre los puntos extremos de un alabe. Se ha determinado, por los ensayos de los diversos modelos, que el numero optimo de aspas es de dos.

Sivase garam, Shankar y Sandia laboratorios hallaron que el coeficiente de potencia máximo para un rotor de 2 aspas es de 30 a 50% mayor que el de 3 aspas.

Experimentos han mostrado que para alcanzar un C_p máximo las relaciones geométricas deben ser: $s/a = 1/6$; s/d entre $1/10$ y $1/20$; el cruzamiento de las aspas igual a cero, Relación de la altura del rotor y d debe ser 2, los extremos del rotor deben estar cubiertos y la curvatura de los alabes debe ser simétrica.

Aunque originalmente la turbina tenía un espaciado entre las palas que correspondía a $1/3$ del diámetro de una pala, lo más común hoy es utilizar un espaciado de $1/6$ de pala. En otras palabras, la pala se superpone cubriendo $1/6$ del diámetro de la otra (distancia e). La relación diámetro y altura es debatida. Algunos recomiendan que la altura sea el doble del diámetro (total), otros señalan que la eficiencia es mayor a razones $1:4$ o $1:6$. Con 3 aspas o más disminuye rendimiento, pero también disminuye las variaciones del torque.

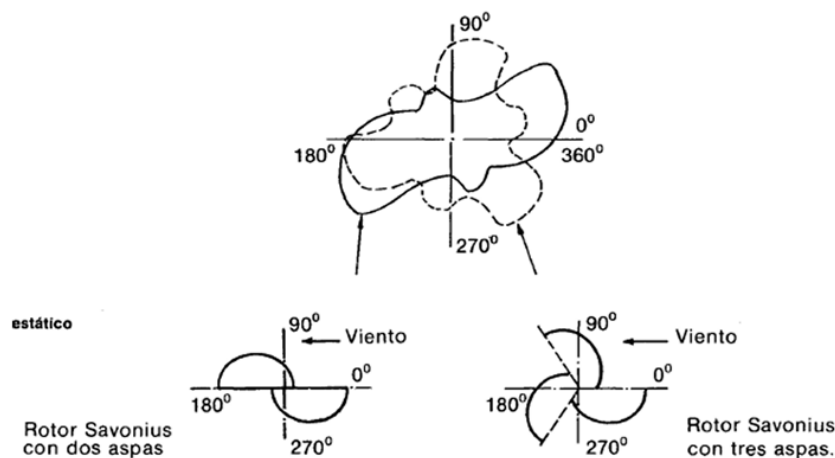


Figura n.º 1.3 Diagrama de Torque Estático para Savonius de dos y tres aspas, Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición

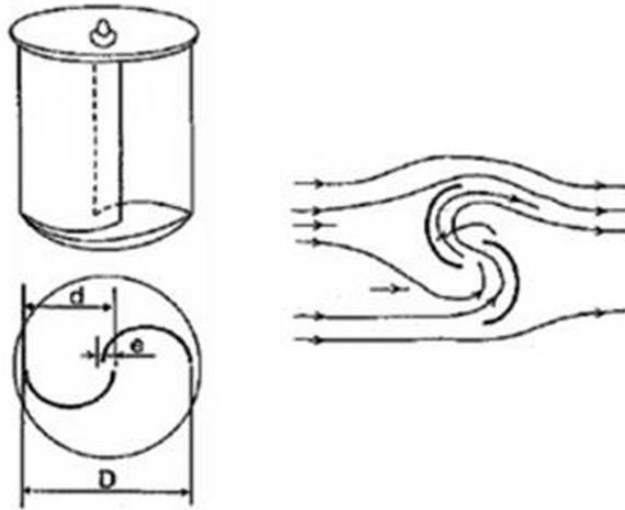


Figura n.º 1.4 Rotor Savonius Clásico, vista tridimensional del rotor. Vista superior, flujo de viento alrededor de las palas, Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición

Un rotor de 3 módulos desfasados 120° , los módulos deben estar aislados uno del otro para prevenir flujos secundarios que reduzcan el coeficiente de potencia. La eficiencia del rotor de 3 aspas disminuye a consecuencia de la separación del flujo, turbulencia, vórtices y flujos secundarios, pero el torque es menos cíclico.

Este aerogenerador funciona gracias a la fuerza aerodinámica que ejerce el flujo del aire sobre distintas superficies

Las Savonius son dispositivos de arrastre o resistencia que constan de dos o tres palas. Mirando el rotor desde arriba, las palas forman la figura de una *S*. Debido a la curvatura, las palas experimentan menos resistencia cuando se mueven en contra del viento que a favor de él. Esta diferencia causa que la turbina Savonius gire. Como es un artefacto de arrastre, la Savonius extrae mucho menos de la fuerza del viento que las turbinas de sustentación con similar tamaño. Por otro lado, no necesitan orientarse en la dirección del viento, soportan mejor las

turbulencias y pueden empezar a girar con vientos de baja velocidad. Es una de las turbinas más económicas y más fáciles de usar.

1.3.3 Funcionamiento del rotor Savonius.

El rotor Savonius es un tipo de aerogenerador de eje vertical que aprovecha la diferencia de fuerzas producida por el viento al impactar en sus palas curvas. Cuando el flujo de aire incide sobre la pala cóncava, genera mayor presión y empuje, mientras que la pala convexa ofrece menor resistencia. Esta diferencia crea un par de giro que hace rotar al rotor alrededor de su eje. Su funcionamiento se basa en el arrastre (drag), por lo cual opera eficientemente a bajas velocidades de viento y arranca fácilmente sin mecanismos auxiliares. Es especialmente útil en entornos urbanos debido a su simplicidad, estabilidad y capacidad para captar viento desde cualquier dirección.

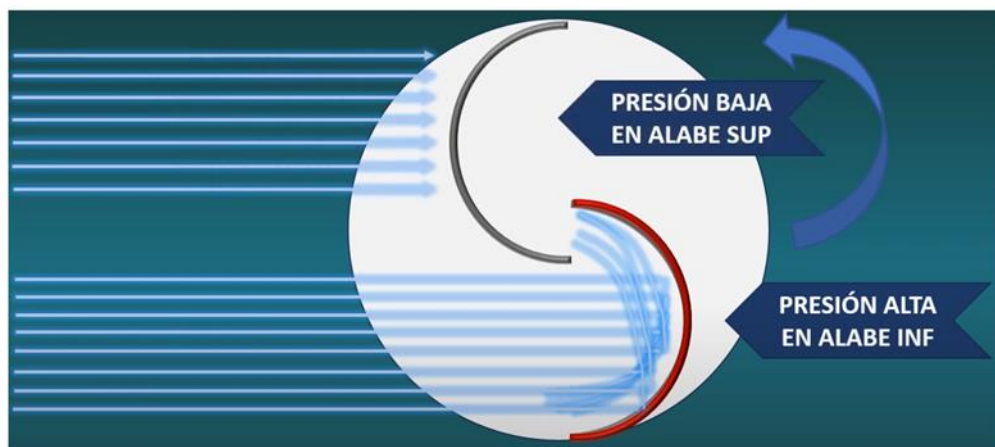


Figura n.º 1.5 Funcionamiento de una Turbina Savonius. Fuente: es.scribd.com/
AEROGENERADORES-VERTICALES

Por la geometría de los alabes el viento en el alabe superior genera mayor presión que en el alabe inferior, la diferencia de presión genera la rotación

1.3.4 Factores que modifican el Rendimiento

✓ Relación de superposición.

La superposición, o “overlap”, se refiere a la cantidad en que las palas del rotor se superponen entre sí. En un diseño típico, la superposición puede ser aproximadamente 1/6 del diámetro de una pala, lo que significa que una pala cubre parte de la otra. Esta configuración es crucial para el rendimiento del rotor, ya que ayuda a optimizar la captura de energía del viento.

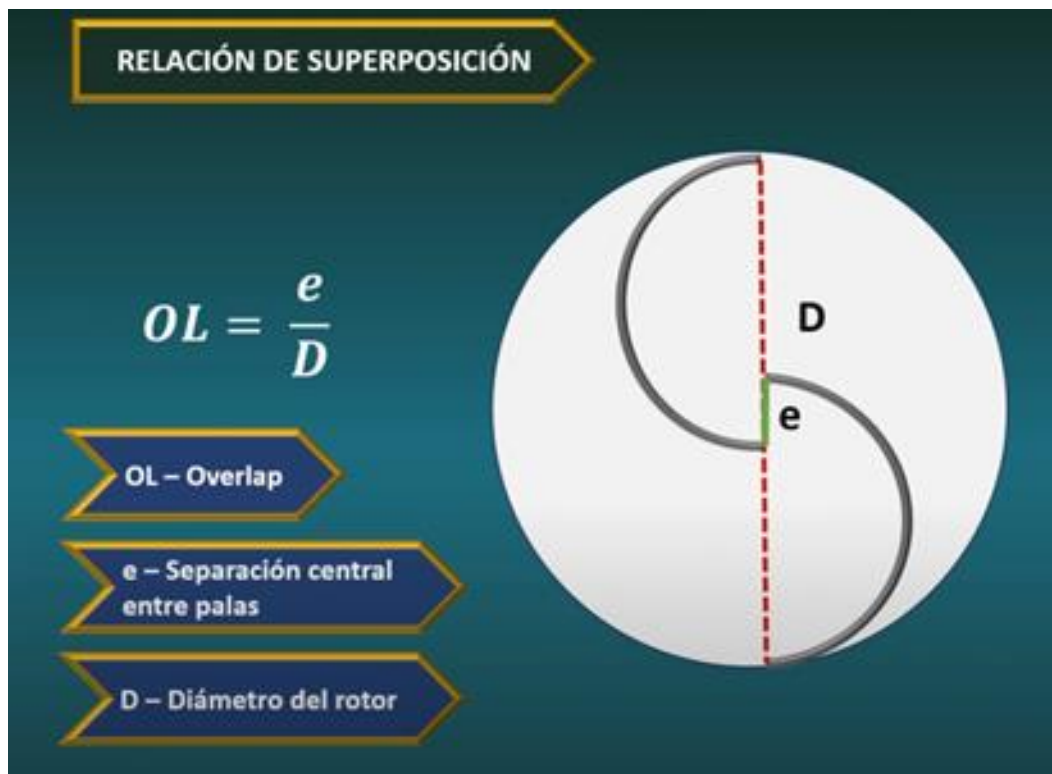


Figura n.º 1.6 Esquema que muestra la relación de Superposición en un Aerogenerador de Eje Vertical



Figura n.º 1.7 Relación de Torque-Turbulencia en un Aerogenerador de eje vertical.

✓ **Relación de aspecto**

La relación de aspecto se basa en la siguiente expresión:

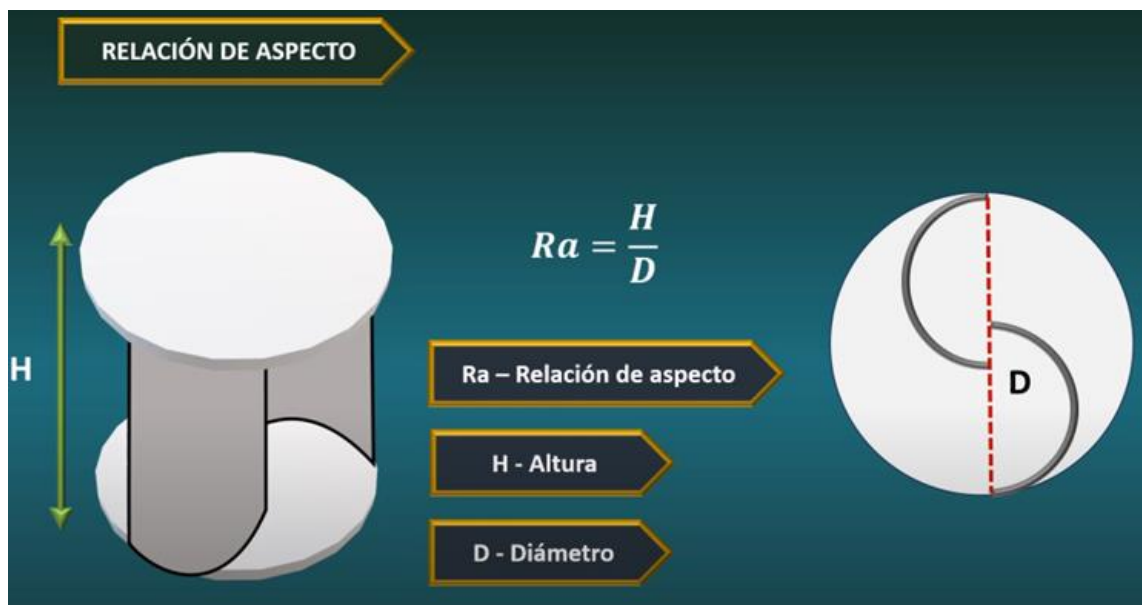


Figura n.º 1.8 Relación de Aspecto en rotores de Eje Vertical.

Se basa en la proporción entre su altura y su diámetro, y se utiliza para evaluar cómo la geometría del rotor afecta su eficiencia aerodinámica, el torque generado, la estabilidad estructural y la captación de viento. Esta relación permite optimizar el diseño del rotor según el tipo de aplicación y las condiciones del recurso eólico disponible.

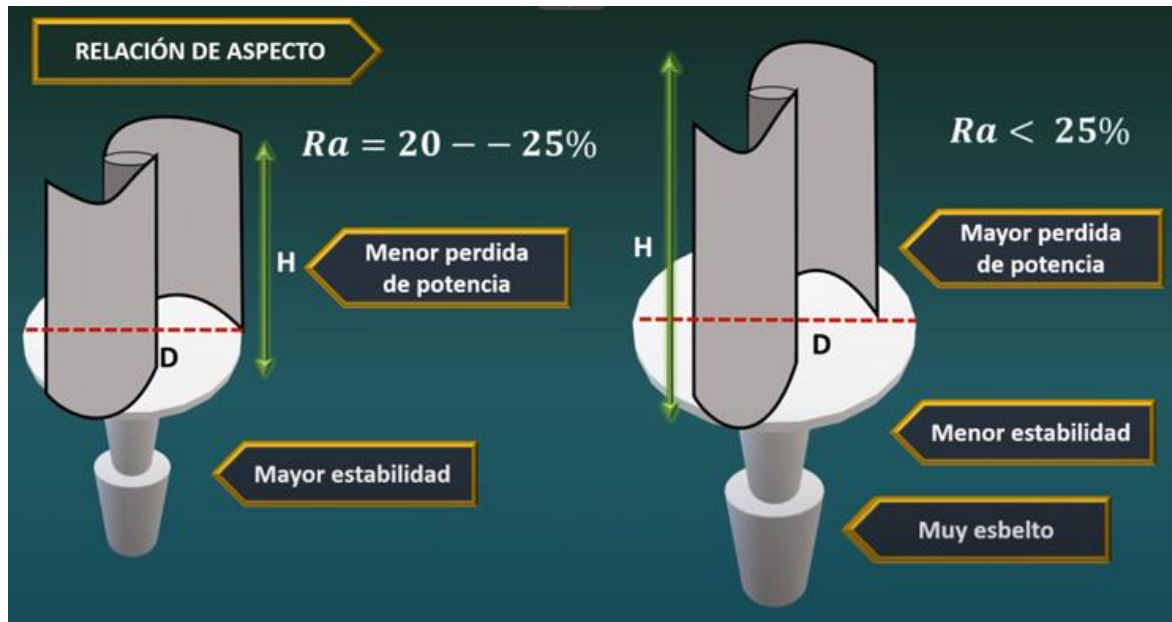


Figura n.º 1.9 Relación de aspecto en diseños VAWT. Fuente: es.scribd.com/document/632532574/AEROGENERADORES-VERTICALES

✓ Número de palas

El número de palas es un parámetro clave en el diseño de aerogeneradores de eje vertical porque determinan el torque inicial, la suavidad del giro y el rendimiento (coeficiente de potencia, C_p) del rotor.

De dos a tres palas, entre más palas el rendimiento disminuye, pero mejora la variación de torque.

1.3.5 Aerogeneradores Darrieus.

Los aerogeneradores Darrieus son turbinas eólicas de eje vertical (VAWT) que utilizan palas curvadas en forma de “C”, diseñadas para aprovechar la fuerza aerodinámica de sustentación. Fueron desarrolladas por el ingeniero francés Georges Darrieus en la década de 1930.

A diferencia de las turbinas de eje horizontal, los Darrieus pueden recibir viento desde cualquier dirección, lo que elimina la necesidad de mecanismos de orientación.

1.3.6 Principio de funcionamiento

El funcionamiento del rotor Darrieus se basa principalmente en:

Sustentación aerodinámica:

Las palas, al moverse, generan sustentación debido a su perfil aerodinámico. Esta fuerza tiene un componente tangencial que produce el torque de giro. Permiten alcanzar altas velocidades de rotación comparadas con otras turbinas de eje vertical.

Movimientos auto incluido

Una vez iniciado el giro (generalmente mediante un motor o una ráfaga de viento fuerte), las palas continúan girando debido a la sustentación generada. Suelen no arrancar por sí mismas a bajas velocidades del viento.

Aprovechamiento del viento en todo el ciclo

Las palas reciben el viento desde todos los ángulos al rotar alrededor del eje. Aunque existen zonas con menor torque, el diseño curvado ayuda a equilibrar el esfuerzo

Ventajas

- ✓ Independencia de la dirección del viento
- ✓ Alta eficiencia para u VAWT debido al uso de sustentación
- ✓ Bajo nivel de ruido
- ✓ Componentes pesados (generador, multiplicadora) pueden ubicarse en la base, facilitando mantenimiento
- ✓ Adecuados para entornos urbanos o con espacio reducido.

Desventajas

- ✓ No arrancan solos; requieren un empuje inicial.
- ✓ Fuerzas cíclicas elevadas generan fatiga estructural, lo que demanda materiales resistentes
- ✓ Menor rendimiento comparado con los aerogeneradores de eje horizontal en campo abierto.

El rotor Darrieus modelo Troposkein es un ejemplo que consta de unas finas palas con forma de ala de avión simétricas, que están unidas al eje sólo por los dos extremos, con una curva especial diseñada que al poseer una forma parecida a una cuerda para saltar en pura tensión hace que los alerones del Darrieus experimenten una fuerte fuerza centrífuga para un máximo rendimiento entre las dos uniones del eje. No necesita de un sistema de orientación, esta característica de captación omnidireccional le permite ser instalado en cualquier terreno sin necesidad de levantar altas torres, lo que trae consigo un ahorro en el costo de la máquina. Este rotor presenta el problema que no puede arrancar por sí mismo

debido al gran torque que necesita, por lo que se emplea un sistema de arranque secundario, aunque una vez en marcha es capaz de mantenerse gracias a la aerodinámica de sus palas. Una forma de facilitar el arranque de esta máquina es utilizando rotores

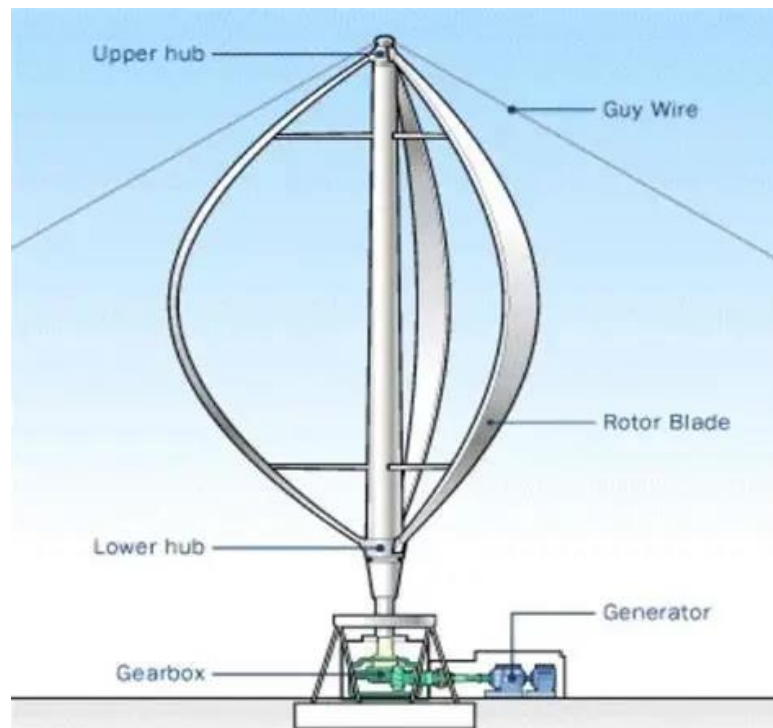


Figura n.º 1.10 Estructura de la Turbina Darrieus con Álabes de perfil Troposkein, Fuente: es.scribd.com/document/632532574/AEROGENERADORES-VERTICALES

Savonius, la otra forma es usar un sistema eléctrico. Usualmente se utiliza un generador de inducción conectado a la red. Una vez que el Troposkein se encuentra en velocidad de operación empieza a entregar potencia.

Partes principales de un rotor Darrieus de 25 kW, de 3 hojas de aluminio extruido, el alternador síncrono gira a 1500 rpm con una relación de velocidades (alternador-rotor darrieus) es de 16.78.

Algunas variantes de aerogenerador Darrieus y sus especificaciones de operación:

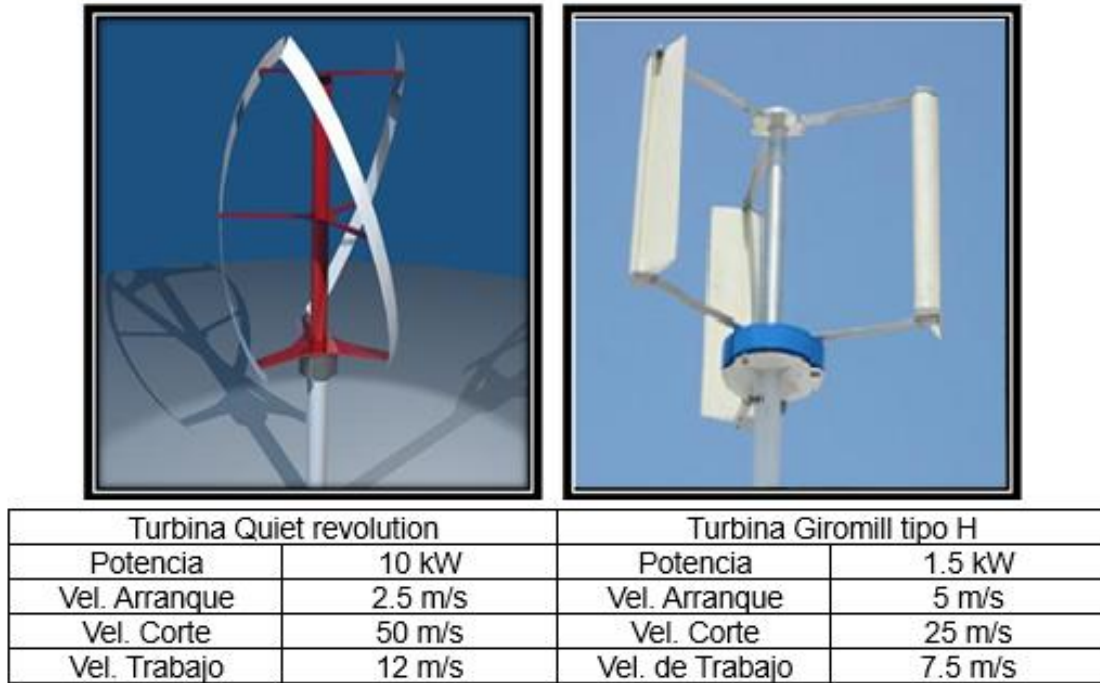
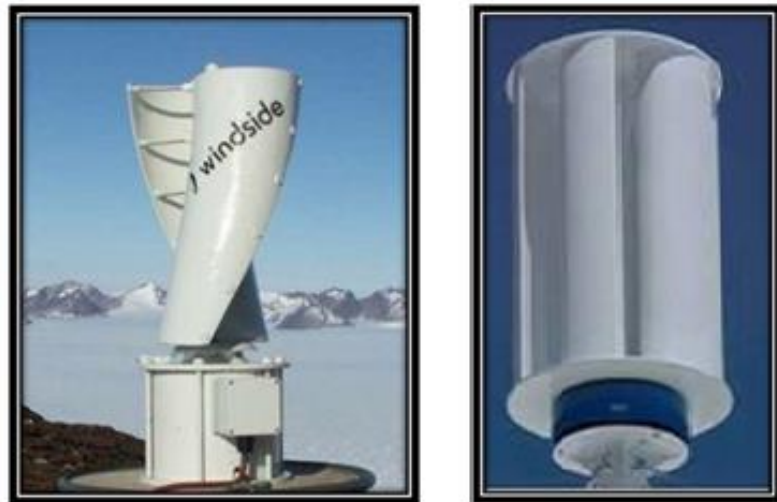


Figura n.º 1.11 Datos de diseño de Turbina Quiet Revolution (Izq.) y Turbina Giromil tipo H (Der.), Fuente: brighthub.com/environment/renewable-energy.

El modelo Darrieus necesita de un arranque inicial, mientras que el Savonius se puede poner en funcionamiento con una pequeña brisa; debido a ello se puede hacer una combinación sobre un mismo eje de ambas máquinas de forma que un rotor Savonius actúe durante el arranque y un rotor Darrieus sea el que genere la energía para mayores velocidades del viento.



Turbina Wildside		Turbina Sea Hawk	
Potencia	2 kW	Potencia	3.4 kW
Vel. Arranque	2.8 m/s	Vel. Arranque	2.5 m/s
Vel. Corte	25 m/s	Vel. Corte	25 m/s
Vel. Trabajo	15 m/s	Vel. de Trabajo	5 m/s

Figura n.º 1.12 Aerogenerador Windside (Izq.) Aerogenerador Sea Hawk (Der.), Fuente: brighthub.com/environment/renewable-energy

Las ventajas de los aerogeneradores de eje vertical frente a los de eje horizontal, son:

- ✓ No necesitan sistemas de orientación
- ✓ Los elementos que requieren un cierto mantenimiento pueden ir situados a nivel del suelo
- ✓ No requieren mecanismos de cambio de revoluciones, por cuanto no suelen emplearse en aplicaciones que precisen una velocidad angular constante

Las ventajas de los aerogeneradores de eje horizontal respecto de los de eje vertical son:

- ✓ Mayor rendimiento
- ✓ Mayor velocidad de giro (multiplicadores más sencillos)
- ✓ Menor superficie de pala S a igualdad de área barrida A
- ✓ Se pueden instalar a mayor altura, donde la velocidad del viento es más intensa.

TIPOS DE AEROGENERADORES	FACTORES COMPARATIVOS									
AEROGENERADORES HORIZONTALES	Capacidad de Generacion KW	DIFICULTAD DE OPERACIÓN	Complejidad Fabricacion	Complejidad Montaje	Necesidad Mantenimiento	Monto Inversion	SEGURIDAD NECESARIA	VELOCIDAD VIENTO	NIVEL DE RUIDO	OBSERVACIONES
HELICE MULTIPALA	0-5	MEDIA	MEDIA	MEDIA	MEDIA	MEDIA	MEDIA	MEDIA	BAJA	Altas perdidas
HELICE DE PALAS PIVOTANTES	30-50	MEDIA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	MEDIA ALTA	MEDIA ALTA	Diseño Ineficiente de las palas
HELICE DE PALAS ALABEADAS	0,5-3600	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	alto rendimiento
AEROGENERADORES VERTICALES	Capacidad de Generacion KW	DIFICULTAD DE OPERACIÓN	Complejidad Fabricacion	Complejidad Montaje	Necesidad Mantenimiento	Monto Inversion	SEGURIDAD NECESARIA	VELOCIDAD VIENTO	NIVEL DE RUIDO	OBSERVACIONES
AEROGENERADOR SAVONIUS	0-2	BAJA	SIMPLE	BAJA	BAJA	BAJA	BAJA	BAJA	BAJA	Trabaja a bajas velocidades
AEROGENERADOR DARRIEUX	5-500	MEDIA	MEDIA	MEDIA	ALTA	ALTA	MEDIA	MEDIA	MEDIA ALTA	No arranca solo
HELICE DE PALAS TIPO GIROMILL	2-300	MEDIA	MEDIA	MEDIA	BAJA	MEDIA	MEDIA	MEDIA	MEDIA	Puede tener 3 o 4 palas

Figura n.º 1.13 Factores comparativos por cada tipo de Aerogenerador, Fuente: Ingeniería de la energía eólica, Miguel Villarrubia López Edición en español 2012.

Debido a las características del aerogenerador Darrieus no es una buena opción para aprovechar viento ocasionado por el tráfico, el viento no es constante, debido a que no arranca solo o necesita de una velocidad del aire mucho mayor para el arranque, mientras el aerogenerador de Savonius necesita menos velocidad del aire para iniciar a funcionar.

1.4 Sitios óptimos para la medición y aprovechamiento del potencial energético del viento en carreteras

La evaluación del potencial eólico inducido por el tráfico vehicular requiere una cuidadosa selección de sitios que combinen condiciones aerodinámicas favorables, infraestructura existente y seguridad operacional. Esta selección no debe limitarse únicamente a la instalación de turbinas, sino también debe

responder a criterios que permitan medir de manera precisa el recurso energético disponible, ya sea para futuros sistemas de micro generación, o estudios de factibilidad técnica.

1.4.1 Criterios para selección de sitios de medición y aprovechamiento

Diversos estudios internacionales han identificado los siguientes factores clave: (Park et al., 2019; Rodríguez et al., 2020; Jiménez et al., 2021):

- Alta densidad vehicular: Las vías con tráfico constante especialmente con vehículos de carga generan flujos de aire con mayores velocidades, siendo esto fundamental para inducir energía cinética útil.
- Velocidades promedio altas: Tramos de carretera donde los vehículos mantienen velocidades superiores a 60 km/h generan estelas más estables y de mayor intensidad.
- Canalización del flujo de aire: Infraestructura como túneles, pasos elevados, cercos medianeros o paredes laterales crea un efecto Venturi natural que concentra el viento, aumentando su velocidad.
- Zonas con viento natural significativo: El potencial eólico puede provenir también del viento atmosférico natural. La combinación de ambas fuentes (natural + inducido) incrementa la viabilidad energética.
- Topografía favorable: Tramos en pendiente descendente o pasos por zonas abiertas favorecen la aceleración del flujo de aire.

1.5 Caso de estudio en México

1.5.1 Introducción y Objetivo del Estudio

Este estudio, desarrollado por investigadores del Instituto Politécnico Nacional (IPN), tuvo como objetivo evaluar el potencial energético del viento generado por el paso de vehículos en autopistas de alta velocidad, particularmente en medianas centrales, como una alternativa de microgeneración eólica en entornos urbanos y suburbanos. A través de un enfoque experimental riguroso, se caracterizó el perfil aerodinámico de las corrientes de aire inducidas por el tráfico y se proyectó su capacidad para alimentar turbinas de eje vertical (VAWT).

1.5.2 Diseño Experimental

Para la medición, se construyó una torre de 2.35 metros de altura equipada con ocho anemómetros termo-resistivos distribuidos verticalmente cada 25 cm. Esta torre se ubicó a menos de 0.50 metros de los carriles de circulación en cuatro sitios diferentes: tres en zonas urbanas de Ciudad de México (CDMX) y uno en un tramo periférico de la autopista México–Querétaro.

El sistema de adquisición de datos, basado en Arduino Mega 2560 y alimentado por batería, permitía medición simultánea en los ocho puntos verticales con una frecuencia de muestreo de 10 Hz. Las mediciones abarcaron condiciones diurnas y nocturnas, así como diferentes tipos de vehículos, desde compactos hasta SUV y sedanes.



Figura n.º 1.14 Sitios evaluados caso de estudio en México, Fuente: Designs México IPN.

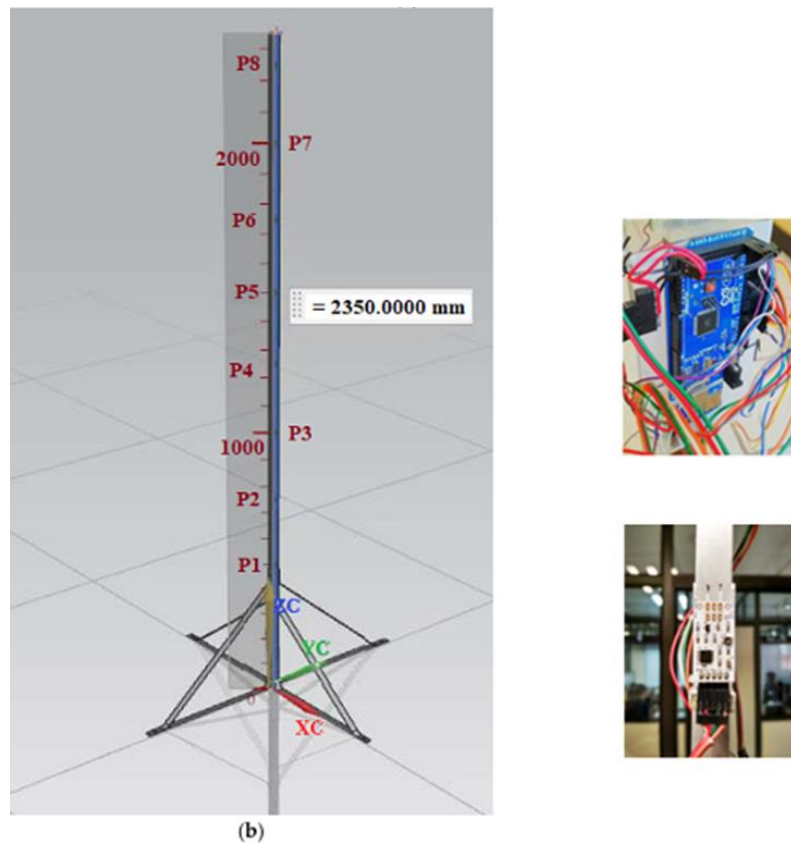


Figura n.º 1.15 Instrumento utilizado caso de México, Fuente: Designs México IPN.

1.5.3 Resultados Principales:

Velocidades Medidas

En zonas urbanas, las velocidades máximas registradas oscilaron entre 6 y 8 m/s.

En la autopista México–Querétaro (zona periférica), se registraron velocidades de hasta 19.5 m/s, siendo 5.375 m/s la velocidad media general.

El análisis probabilístico (distribución de Weibull) mostró que estas corrientes de aire eran aprovechables el 58% del tiempo.

Perfil Vertical de Velocidad

Se identificó un perfil no uniforme de velocidad vertical. La mayor velocidad se registró en el segundo sensor (a 0.75 m del suelo), con valores decrecientes hacia los extremos superior e inferior, lo que implica que las turbinas deben diseñarse considerando este gradiente para maximizar la captación efectiva del viento.

Análisis de Flujos y Tipos de Perturbaciones

Mediante pruebas con vehículos específicos (Pontiac Matiz, Ford EcoSport, Chevrolet Malibu), se identificaron tres tipos de patrones de flujo:

- ✓ Flujo pulsante (20–60 km/h): ráfagas breves, asociadas a autos compactos.
- ✓ Flujo pulsante seguido de estela (70–90 km/h): de mayor duración, típicamente generado por SUV o sedanes más grandes.

- ✓ Flujo pulsante intenso sin estela definida (>100 km/h): ráfagas concentradas con disipación rápida.
- ✓ Estos patrones permiten establecer relaciones entre la geometría/velocidad del vehículo y la magnitud del viento generado.

1.5.4 Implicaciones para el Diseño de Turbinas

Con base en las mediciones, se diseñó un modelo CAD de una turbina de eje vertical tipo Savonius utilizando Siemens NX, considerando:

- ✓ Proporción radial del viento para optimizar la geometría del rotor.
- ✓ Altura efectiva de barrido: 1.75 m.
- ✓ Simulaciones CFD y análisis estructural por elementos finitos (FEA).

El diseño propone una configuración modular de hasta 333 turbinas por kilómetro de carretera, con posibilidad de instalación en contra rotación para evitar interferencias de flujo.

1.5.5 Estimación de Potencial Energético

Potencia generada proyectada por km: entre 16,666 W y 36,666 W dependiendo del viento promedio (entre 50 y 110 km/h).

Ahorro energético estimado para 100 km de autopista: hasta USD 2,222.28 anuales por km, equivalente a alimentar más de 4,500 hogares si se considera el consumo medio por vivienda mexicana

1.6 Aplicaciones de la micro generación eólica en entornos urbanos

Son sistemas de generación de energía que utilizan la fuerza del viento para producir electricidad a pequeña escala. Este tipo de tecnología ha sido especialmente valiosa para proporcionar energía a zonas remotas o aisladas, donde la conexión a la red eléctrica convencional puede ser difícil o costosa.

Operan convirtiendo la energía cinética del viento en energía eléctrica, reduciendo la dependencia de la red y ofrecen ventajas como ahorro energético y beneficios ambientales. Sin embargo, su eficiencia depende de la ubicación y correcta instalación. Las tendencias actuales se orientan hacia turbinas de eje vertical y sistemas híbridos con energía solar.

Existen dos tipos de micro generadores eólicos:

- ✓ Generadores eólicos micro horizontales (HAWT): Tipo de generador con eje de rotación horizontal, paralelo al suelo. Son los más comunes y eficientes a gran escala.
- ✓ Generadores eólicos micro verticales (VATW): Generadores con eje de rotación vertical. Aunque su eficiencia es menor frente a los generadores horizontales, tienen la ventaja de que pueden capturar el viento desde cualquier dirección sin necesidad de orientarse hacia él.

Los generadores eólicos micro tiene una amplia gama de aplicaciones, desde la generación de energía para viviendas individuales hasta su uso en mini redes para comunidades rurales. Además, pueden ser útiles en situaciones de emergencia o para proporcionar energía en lugares remotos. Como estaciones de investigación o campamentos de montaña.

1.6.1 Aplicaciones

La micro generación eólica se puede usar para tres aplicaciones principales diferentes:

Sistemas aislados, sistemas híbridos y sistemas conectados a la red. Estos sistemas se ajustan a una configuración básica, requieren una unidad de control de potencia y, en algunos casos, según la aplicación, de unidades de almacenamiento.

- ✓ **Sistemas aislados:** no requieren almacenamiento, como en el caso de los sistemas de irrigación donde toda el agua bombeada es distribuida directamente.
- ✓ **Sistemas híbridos:** presentan más de una fuente de energía, como turbinas eólicas, generadores diésel, módulos fotovoltaicos, entre otros.
- ✓ **Los sistemas conectados a la red:** Estos no requieren sistemas de almacenamiento de energía porque toda la energía que se genera se entrega directamente a la red eléctrica. Estos sistemas representan una fuente complementaria al gran sistema eléctrico al que esta interconectados.

Los sistemas eólicos conectados a la red presentan ventajas respecto a los sistemas de generación distribuida, tales como: reducción de pérdidas, la reducción de costes relacionado con la ampliación de la red eléctrica y la generación a la hora punta cuando el régimen eólico coincide con el pico de la curva de carga

1.6.2 Aplicaciones de la micro generación eólica en entornos urbanos.

La energía eólica es una fuente renovable que se obtiene del aprovechamiento del viento mediante aerogeneradores. Tradicionalmente, ha sido utilizada a gran

escala en parques eólicos ubicados en zonas rurales o costeras. Sin embargo, el desarrollo tecnológico ha permitido miniaturizar los sistemas de generación, surgiendo así la microgeneración eólica, la cual se refiere a la instalación de turbinas de baja potencia (menores a 10 kW) destinadas al autoconsumo o aplicaciones urbanas (Khan & Iqbal, 2005).

Estos sistemas tienen la ventaja de ser instalables en espacios reducidos, como techos de edificios, postes, puentes o márgenes de carreteras, lo que representa una oportunidad para descentralizar la producción de energía y promover la sostenibilidad urbana.

✓ **Entornos urbanos y desafíos de integración**

A diferencia de los entornos rurales, las ciudades presentan condiciones más complejas para la captación eólica debido a la interferencia de edificaciones, vientos turbulentos, espacio limitado y la necesidad de compatibilizar tecnología con el entorno visual y auditivo. No obstante, las turbinas de eje vertical (VAWT) han demostrado mayor eficiencia en estos contextos al funcionar bien con flujos irregulares y sin necesidad de orientación hacia el viento (Stankovic et al., 2009).

✓ **Micro generación eólica en carreteras urbanas**

Las carreteras urbanas y periurbanas ofrecen un espacio estratégico para la instalación de microturbinas, especialmente en medianeras, pasos elevados, túneles, laterales de puentes y en postes de alumbrado público. Este entorno presenta ventajas particulares:

- Flujo constante de viento inducido por el paso de vehículos (efecto túnel).
- Infraestructura ya existente que puede ser adaptada.

- Posibilidad de alimentar sistemas auxiliares como iluminación, sensores, estaciones de carga o señalización vial (Wang & Li, 2017).

En países como Corea del Sur, China y Turquía, se han desarrollado proyectos piloto donde las turbinas eólicas verticales aprovechan el viento generado por el tráfico, convirtiéndose en una fuente de energía para alumbrado y señalización (Park et al., 2019).

✓ **Las principales tecnologías aplicadas en carreteras incluyen:**

- VAWTs (Vertical Axis Wind Turbines): Adecuadas para vientos turbulentos y omnidireccionales.
- Microturbinas modulares: De fácil instalación en postes o puentes.
- Sistemas híbridos solar-eólico: Combinan paneles solares y microturbinas para mayor eficiencia energética.
- Turbinas oscilantes (Vortex Bladeless): Una alternativa silenciosa y sin aspas, aún en etapa experimental (Rodríguez et al., 2020).

Integración de turbinas eólicas en infraestructuras existentes

La propuesta de integrar aerogeneradores en postes eléctricos y carreteras surge como una solución innovadora para mitigar algunos de los principales inconvenientes asociados a la energía eólica tradicional, como su impacto en entornos naturales y la distancia entre las zonas de generación y consumo. El proyecto Wind-it, desarrollado por los arquitectos franceses Nicola Delon, Julien Choppin y Raphaël Ménard, plantea incorporar turbinas de eje vertical en torres eléctricas, permitiendo aprovechar infraestructuras ya existentes para generar energía renovable de forma descentralizada.

Estudios preliminares sugieren que, solo en Francia, transformar un tercio de sus postes eléctricos podría generar una cantidad de energía comparable a la de dos reactores nucleares, cubriendo aproximadamente el 5% del consumo energético del país. Además, otras iniciativas similares han explorado el uso de autopistas para instalar turbinas, aprovechando tanto el viento natural como el generado por el tráfico vehicular. A pesar de su potencial, estas propuestas enfrentan retos técnicos, como la resistencia estructural de las torres, el mantenimiento de los equipos y la viabilidad económica. Sin embargo, en un contexto de creciente demanda de energías limpias, estos proyectos ofrecen alternativas prometedoras para una transición energética más sostenible.

Generación de Energía a partir del tráfico vehicular: El proyecto Wind Road Energy.

El proyecto piloto Wind Road Energy propone una innovadora solución para la generación de energía renovable aprovechando el viento producido por el tráfico vehicular en autovías y carreteras. Este proyecto piloto se basa en la observación del viento generado, especialmente por vehículos pesados, que hasta ahora había sido desaprovechado. El sistema consiste en la instalación de módulos metálicos en las proyecciones laterales de las carreteras, que servirán de soporte para aerogeneradores y, potencialmente, paneles solares.

El diseño de estos módulos, patentado en España (U202330455) y en proceso de patentado en Europa, es clave para aprovechar el viento sin interferir con el flujo de tráfico. Los estudios de campo han demostrado que las autovías de gran capacidad, al recibir miles de vehículos a diario, generan vientos con velocidades entre 6 y 10 m/s, lo que garantiza que los aerogeneradores puedan operar prácticamente durante todo el día. Además, se estima que un kilómetro de autovía podría generar hasta 10.3 GW de energía anualmente, cifra que podría cuadruplicarse dependiendo de la disposición y cantidad de módulos instalados.

La energía generada podría tener diversas aplicaciones, desde su almacenamiento en baterías para estaciones de carga de vehículos eléctricos en áreas remotas, hasta su inyección directa a la red eléctrica. Este enfoque no solo contribuiría a la producción de energía limpia, sino que también podría ayudar a reducir los costos de mantenimiento de las carreteras.

Con el objetivo de expandirse a toda la Unión Europea, el proyecto Wind Road Energy representa una forma innovadora de repensar las infraestructuras viales, transformándolas en generadores de energía sostenible. Este avance no solo marca un paso significativo en el campo de las energías renovables, sino que también ofrece un modelo replicable para el futuro de la generación de energía limpia en entornos urbanos y rurales.



Figura n.º 1.16 Proyecto Wind Road, Módulos metálicos para aerogeneradores. Fuente: Wind Road.com

Turbinas Eólicas en postes de luz: Aprovechando el viento del tráfico vehicular.

Un nuevo diseño de turbinas eólicas, que se conecta a postes de luz en las carreteras, ha sido propuesto como una solución innovadora para generar energía renovable aprovechando el viento producido por el tráfico vehicular. Esta tecnología, desarrollada por la empresa británica Alpha 311, no depende del viento natural, sino del aire generado por el paso de vehículos a alta velocidad.

El concepto tiene el potencial de transformar las infraestructuras viales existentes en generadores de energía limpia, proporcionando una respuesta simple al desafío de acumular grandes cantidades de energía renovable.

Según el director ejecutivo de Alpha 311, Barry Thompson, las turbinas instaladas en las farolas existentes podrían generar colectivamente hasta 6 MW por día, suficiente para abastecer una pequeña comunidad. La instalación de estas turbinas en las carreteras utilizaría el viento creado tanto por los vehículos que circulan a alta velocidad como por los camiones pesados, un fenómeno comúnmente percibido como un desplazamiento de aire al estar cerca de una carretera transitada.

Este enfoque, en lugar de instalar grandes turbinas eólicas, se basa en la adaptación de la infraestructura ya existente, lo que permite una integración sin alterar el paisaje o las áreas naturales. Además, se estima que cada turbina podría generar el equivalente a 21 metros cuadrados de paneles solares. El sistema está diseñado para ser discreto y eficiente, con turbinas de solo 2 metros de altura, lo que lo hace adecuado para entornos urbanos y rurales.

Actualmente, el proyecto está en fases de prueba, con conversaciones en curso con autoridades locales en el Reino Unido y pruebas piloto en pequeñas ciudades de Estados Unidos. Este avance representa una alternativa viable para aumentar la producción de energía renovable en un contexto donde la infraestructura vial ya existe, minimizando los costos de implementación y mejorando la eficiencia energética sin necesidad de alterar el paisaje.

1.7 Normativas y Regulaciones Sobre Energía Renovable En El Salvador

El marco legal salvadoreño establece bases importantes para el desarrollo de proyectos con fuentes de energía renovable, incluyendo la energía eólica. Aunque actualmente no existe una legislación específica sobre el aprovechamiento del viento inducido por tráfico vehicular, las normativas vigentes sí permiten explorar este tipo de innovaciones a través de figuras como la micro generación o la autogeneración de electricidad.

A continuación, se describen las leyes y políticas nacionales más relevantes para el presente estudio, junto con sus artículos clave y su aplicación directa al proyecto.

1.7.1 Ley de Incentivos Fiscales para el Fomento de Energías Renovables en la Generación de Electricidad (D.L. No. 462)

Artículo 1: establece que el objeto de esta ley es "promover la inversión en proyectos de generación de electricidad con fuentes renovables".

Artículo 3: otorga beneficios como la exención del Impuesto sobre la Renta por diez años, y la exención de aranceles de importación para equipos e infraestructura vinculada a energías renovables, aplicable a proyectos menores a 15 MW.

Esta ley representa una oportunidad clave para acceder a incentivos fiscales si el sistema de microturbinas eólicas en carreteras logra clasificarse como proyecto de microgeneración renovable.

1.7.2 Ley General de Electricidad (D.L. No. 843)

Artículo 1: regula las actividades de generación, transmisión, distribución y comercialización de electricidad.

Artículo 4: permite que tanto personas naturales como jurídicas puedan ser generadores, autogeneradores o micro generadores, siempre que cumplan con las condiciones técnicas y legales.

En caso de proyectarse la conexión a la red eléctrica nacional o el suministro a sistemas públicos, se deberá cumplir con los requisitos técnicos y legales establecidos en la Ley General de Electricidad.

1.7.3 Política Energética Nacional 2020–2050

Aunque no es una ley, esta política pública define los lineamientos estratégicos para diversificar la matriz energética, fomentar el uso de tecnologías emergentes y promover la eficiencia energética.

La instalación de microturbinas eólicas en carreteras está alineada con esta política, lo que podría facilitar apoyo técnico o institucional, tanto a nivel nacional como en cooperación internacional.

1.7.4 Ley de Medio Ambiente (D.L. No. 233)

Establece los mecanismos de Evaluación Ambiental (EIA) para proyectos que puedan impactar el entorno.

En nuestro proyecto, la evaluación ambiental puede ser necesaria si se modifican estructuras existentes o si las turbinas se ubican en zonas de interés ambiental o urbano.

1.7.5 Ley de Ordenamiento y Desarrollo Territorial

Regula el uso del espacio y las intervenciones en zonas públicas.

Se deberán gestionar los permisos correspondientes con alcaldías y el MOP para garantizar la legalidad de las instalaciones en zonas de uso público o infraestructura vial.

1.7.6 Reglamento de Operación del Sistema de Transmisión y del Mercado Mayorista

Emitido por la Unidad de Transacciones (UT), establece las condiciones técnicas y comerciales para participar en el mercado eléctrico.

Si se contempla una futura conexión a la red nacional, el proyecto debe ajustarse a estas disposiciones, incluyendo la instalación de equipos de medición certificados.

1.7.7 Permisos requeridos para implementación

Tabla 1.1 Tabla de permisos y entidades responsables en implementación de proyectos relacionados, Fuente: Propia.

Permiso o requisito	Entidad responsable	Aplicación en el proyecto
Permiso ambiental simplificado	Ministerio de medio ambiente	Para instalación de turbinas fijas en infraestructura vial
Licencia de construcción/ intervención	MOP/ Alcaldía local	Para instalar estructuras en bordes de carreteras o postes.
Registro como microgenerador	SIGET	En caso de conexión a red o autogeneración pública.
Solicitud de incentivos fiscales	Ministerio de Hacienda/ DGEHM	Para aplicar a exenciones tributarias establecidas en el D.L. 462
Coordinación Técnica	SIGET, MOP, DGEHM	Para asegurar compatibilidad técnica, normativa y operativa.

1.7.8 Recomendaciones para el cumplimiento normativo

- ✓ Coordinar desde la etapa de diseño con las alcaldías locales y el MOP para definir el tipo de permisos requeridos en función del lugar de instalación.
- ✓ Realizar una evaluación técnica con SIGET para definir si el proyecto califica como microgeneración.
- ✓ Consultar al Ministerio de Medio Ambiente si el proyecto requiere permiso ambiental simplificado o informe técnico ambiental.
- ✓ Iniciar el proceso de aplicación a incentivos fiscales si se contempla importar tecnología o instalar equipos permanentes.
- ✓ Diseñar el sistema respetando normativas de seguridad vial y estructural vigentes.

El marco regulatorio salvadoreño, si bien no contempla de forma específica el aprovechamiento del viento inducido por tráfico vehicular, ofrece múltiples

herramientas legales y normativas que permiten desarrollar proyectos de microgeneración eólica en carreteras. Será esencial que el diseño del proyecto se ajuste desde su etapa conceptual a las exigencias normativas y operativas del marco legal salvadoreño, garantizando su factibilidad regulatoria y técnica

CAPITULO 2:

2 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

2.1 Enfoque de la investigación.

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo, ya que se centra en la recolección, análisis e interpretación de datos numéricos relacionados con variables físicas y ambientales, tales como la velocidad del viento, el flujo vehicular, y las condiciones geográficas de diversas carreteras en El Salvador. Este enfoque permite una evaluación objetiva y medible del potencial eólico en las zonas seleccionadas, utilizando herramientas estadísticas y técnicas de análisis comparativo para identificar las ubicaciones más adecuadas para la instalación de sistemas de microgeneración eólica. De esta manera, se busca generar información precisa y confiable que sirva de base para futuras decisiones técnicas o proyectos de aprovechamiento energético.

2.2 Diseño del estudio.

La investigación tiene como objetivo estimar el potencial del recurso eólico disponible en diferentes tramos de carreteras de El Salvador, por medio de la recolección de datos meteorológicos y características físicas del entorno.

La información será recolectada en un único momento o periodo específico, sin realizar un seguimiento temporal. Además, tiene un carácter descriptivo, porque busca identificar, analizar y representar las condiciones del viento (velocidad, frecuencia y dirección) y otros factores relevantes como el flujo vehicular, el espacio físico disponible y la accesibilidad de los sitios evaluados, con el fin de establecer cuáles zonas presentan mayor viabilidad para la microgeneración eólica.

El diseño de estudio permite establecer una base técnica para futuras evaluaciones más profundas o la ejecución de proyectos piloto en las zonas con mayor potencial identificado.

2.3 Técnicas de recopilación de datos.

La recolección de datos se realizará mediante técnicas documentales y estadísticas, utilizando los siguientes instrumentos:

- ✓ Bases de datos meteorológicos (históricos de velocidad y dirección del viento).
- ✓ Informes técnicos y mapas de tráfico vehicular (frecuencia y tipo de tránsito).
- ✓ Imágenes satelitales y Sistemas de información geográfica para evaluar el espacio físico disponible.
- ✓ Matrices de evaluación para comparar tramos con base en los criterios definidos.

- ✓ También se puede aplicar una matriz de decisión multicriterio para ponderar jerarquizar los tramos con mayor potencial.

2.3.1 Medición y tratamiento de los datos eólicos.

El análisis de datos del viento como fuente de energía, requiere conocer sus características. Debido a su disponibilidad y aleatoriedad deben aplicarse técnicas estadísticas para su análisis. En el proceso de caracterización del viento intervienen los siguientes aspectos:

- ✓ Toma de datos: magnitudes a medir (velocidad, dirección), procedimientos de medición, frecuencia de muestreo, periodos de promedio, etc.
- ✓ Técnica de medición: aparatos de medida (anemómetro, veleta, etc.), colocación del instrumental de medida, etc.
- ✓ Métodos de tratamiento de datos: técnicas estadísticas, forma de presentación de los resultados (valores medios horarios, diarios, anuales, rosa de los vientos, etc.), distribuciones de probabilidad, etc.
- ✓ En la caracterización del viento, se debe atender a los siguientes aspectos:
- ✓ Análisis estadístico del viento, tanto en velocidad como en dirección.
- ✓ Distribución temporal de la velocidad y de la dirección del viento.
- ✓ Condiciones meteorológicas (temperatura, presión, humedad relativa, etc.).
- ✓ Perfil vertical de la velocidad del viento.
- ✓ Condiciones de turbulencia. Relación con la velocidad y la dirección
- ✓ Factores de ráfaga.

Los datos del viento se tratan estadísticamente, para determinar la distribución por frecuencias de las velocidades y por rumbos de las direcciones.

- ✓ La evaluación de los recursos eólicos de un lugar, presenta los siguientes problemas:
- ✓ La necesidad de disponer de medidas de velocidad y dirección del viento durante un periodo de tiempo suficientemente representativo, por ejemplo, varios años.
- ✓ La variabilidad y aleatoriedad del viento.
- ✓ Los efectos locales tales como la orografía, rugosidad del terreno y obstáculos.
- ✓ La extrapolación de las mediciones a una altura determinada en general 10 m, para diferentes alturas respecto al nivel del suelo.

2.4 Selección de la altura de medición

La medición se hará a una altura de 2 metros desde el suelo, fue seleccionada por encontrarse dentro de la zona de mayor influencia del flujo aerodinámico generado por el tráfico, coincidiendo con la altura promedio vehicular y la región donde se desarrollan los flujos de viento, también la altura de 2 metros es una altura de medición que muchos estudios toman como una posición de medición intermedia, además con el uso de ecuaciones podemos extrapolar velocidades a mayor altura.

Zona de mayor influencia del flujo vehicular

El viento generado por los vehículos se concentra principalmente en la capa de 1.5 a 4 metros, debido a:

- La altura típica de automóviles, buses y camiones (1.5 – 4 m).
- El chorro lateral y estela turbulenta que se forma a la altura de carrocería, espejos y laterales.
- A 2 metros intercepta directamente la región de máxima perturbación del flujo. Capta tanto el flujo lateral como la estela trasera de los vehículos.

Muy cerca del suelo (<1 m):

- El flujo está afectado por fricción del suelo, obstáculos.
- Las mediciones se distorsionan por el pavimento y la acera.

Por encima de (3–4 m):

- Disminuye la influencia directa del vehículo.
- El viento se mezcla con el flujo atmosférico natural.

- 2 metros es un equilibrio óptimo entre ambos efectos.

Extrapolación de datos

Con uso de ecuaciones podemos extrapolar datos de velocidad a diferentes alturas sabiendo la rugosidad del terreno.

$$V_2 = V_1 \frac{\ln(h_2/z_0)}{\ln(h_1/z_0)}, (3)$$

- h : Altura sobre el nivel de suelo (m)
- V_1 : Velocidad del viento a altura h_1 (m/s)
- V_2 : Velocidad del viento a altura h_2 (m/s)
- Z_0 : Rugosidad del terreno (m)

Disponibilidad de equipo

La máxima altura de trípode respecto al suelo disponible fue de hasta 2 metros.

2.4.1 Velocidad del viento

La magnitud vectorial de la velocidad del viento \vec{v} , para aplicaciones de energía eólica solo se consideran las componentes en el plano horizontal y en general, los aparatos de medida registran solo el módulo y la dirección de la componente en el plano horizontal.

La velocidad del viento se caracteriza por dos valores: el módulo de la componente de la velocidad en el plano horizontal (denominada velocidad o

intensidad del viento) y la dirección de donde sopla (figura 1). Los ejes x e y sobre el plano horizontal se toman según las direcciones E y N, respectivamente.

La dirección de donde procede el viento (θ), se indica de varias formas, todas ellas basadas en divisiones del horizonte circular de 360° . Se pueden considerar 8, 10, 12 o 16 divisiones y la dirección del viento se expresa en grados, correspondiendo a los cuatro puntos cardinales los valores: E= 90° , S= 180° , O= 270° y N= 360° .

Tabla 2.1 Tabla que muestra las direcciones de donde procede el viento, Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición

Dirección de donde procede	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
Ángulo (θ)	360° (0°)	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°

2.4.2 Tratamiento estadístico del viento

La velocidad del viento puede variar rápidamente tanto en modulo como en dirección. Los instrumentos de medida de velocidad (anemómetros) y de dirección (veleta) miden valores con una determinada frecuencia de muestreo (por ejemplo, cada 1 o 2 segundos) y estos valores se promedian para intervalos de algunos minutos (en general 10 minutos).

El tratamiento estadístico del viento se realiza a partir de series de mediciones de la velocidad y dirección del viento en el lugar de estudio. La frecuencia de muestreo y la amplitud del intervalo de tiempo de promedio dependen del instrumental disponible, su nivel de automatización, la capacidad de tratamiento de datos y los fines que se persiguen.

De esta forma se tiene:

- En observaciones meteorológicas y en evaluaciones de potencial eólico, interesa que la frecuencia de muestreo sea lo mayor posible. Se recomienda que el período de medición no exceda de 5 a 10 segundos (frecuencia de 0,1 a 0,2 Hz) y tomar intervalos de promedio cada 10 minutos, 30 minutos o 1 hora. En general, en anemometría meteorológica, la frecuencia de muestreo es de 1 medida por segundo (1 Hz), el intervalo de promedio es de 10 minutos y el valor resultante de promediar los N valores instantáneos de velocidad (N= 600) durante este intervalo de 10 minutos se conoce como viento medio, viento estacionario o viento meteorológico (velocidad estacionaria) y constituye el valor medio de la velocidad del viento durante ese intervalo de 10 minutos.
- En estudios de viabilidad para la instalación de parques eólicos o en el estudio de turbulencias o ráfagas de viento deben utilizarse altas frecuencias de muestreo de 1 Hz o incluso superiores e intervalos de promedio del orden de 1 minutos, además de la facilidad de la medición del viento con instrumentos análogos como la manga cónica, veleta.
- En general, debe medirse la velocidad del viento con una frecuencia de 1 Hz y promediar el conjunto de medidas durante un intervalo 10 minutos, durante el cual se dispone de N= 600 medidas, para obtener una velocidad media o estacionaria suficientemente representativa. A partir del tratamiento estadístico de las mediciones se definen las siguientes magnitudes:
 - Además de las medidas de la velocidad deben realizarse las de la dirección para obtener la dirección dominante, dirección media o estacionaria durante el intervalo de 10 minutos. La metodología a usar es la misma que para la velocidad.
 - Las medidas de velocidad y dirección deben realizarse a una altura de 2 metros y además no deben de existir obstáculos en las cercanías que puedan perturbar el flujo de aire.

Los resultados deben analizarse junto con el comportamiento del viento en la zona obtenido a partir de series históricas de medidas procedentes de estaciones meteorológicas próximas. Las series históricas deben ser lo más largas posibles. Convendría disponer de datos con suficiente nivel de confianza. Si ello no es posible, y cuanto más corta sea la serie, con mayor prudencia se deben extraer conclusiones. Es muy importante contrastar los resultados con los encontrados mediante el uso de modelos de simulación y predicción del viento en el área de estudio.

➤ La duración de la campaña de medición depende de la finalidad. En estudios de prospección eólica se debe tener presente: medir durante un período de tiempo lo más largo que técnica y económicamente sea posible, medir en todas las estaciones del año, comparar los resultados con estaciones próximas y con las tendencias regionales a largo plazo y contrastarlos con los obtenidos a partir de modelos de predicción numérica del viento en el área considerada.

2.5 Herramientas y equipos utilizados

La velocidad del viento se mide con un anemómetro y la dirección con una veleta. Los sensores han de situarse en lugares despejados, sin obstáculos en los alrededores.

La altura estándar de medición es de 10 m sobre el suelo. Para evaluaciones de potencial eólico del proyecto será más acorde medir las velocidades de los vientos a una altura promedio de 2 metros máximo, aunque estas pueden interpolarse a mayores alturas para otros.

Además del anemómetro y veleta, se requieren termómetros y barómetros para medir la temperatura ambiente del aire y la presión atmosférica. En general, la señal captada por el sensor de medición se envía a un sistema de registro de datos que dispone de un integrador, de un indicador, de un sistema de grabación

y opcionalmente de un sistema de transmisión de datos a una estación de tratamiento de los mismos.

Los factores a considerar para la elección del instrumental de medición son:

- ✓ Coste
- ✓ Precisión, sensibilidad y calibración adecuada para la garantía de fiabilidad
- ✓ Robustez y condiciones de intemperie.
- ✓ Accesibilidad al emplazamiento

2.5.1 Medición de las magnitudes del viento: el anemómetro.

El anemómetro (del griego *anemos*, viento) sirve para medir la velocidad del viento. En general se mide la velocidad del viento a una altura de 2m para evitar la influencia del suelo. Los valores instantáneos de la velocidad se promedian cada 10 minutos.

Existen distintos tipos de anemómetros según su principio de operación:

- ✓ Medición por medios mecánicos: de rotación o de rueda alada
- ✓ Medición por diferencia de presión: anemómetros de tubo de Pitot
- ✓ Medición por ultrasonido, láser, o efecto Doppler (SODAR).
- ✓ Los anemómetros más utilizados son de rotación. Pueden ser de tipo cazoleta (figura nº 2.1) o de tipo hélice (figura nº 2.2).

Los de cazoleta tienen tres o cuatro cazoletas cónicas o semiesféricas distribuidas simétricamente alrededor de un eje vertical. Giran a su alrededor, dado que la fuerza que ejerce el viento es mayor en la cara cóncava que en la

convexa. La velocidad de giro es proporcional a la velocidad del viento. Su ventaja radica en que miden la componente horizontal del viento. El anemómetro de tres cazoletas es el más utilizado.

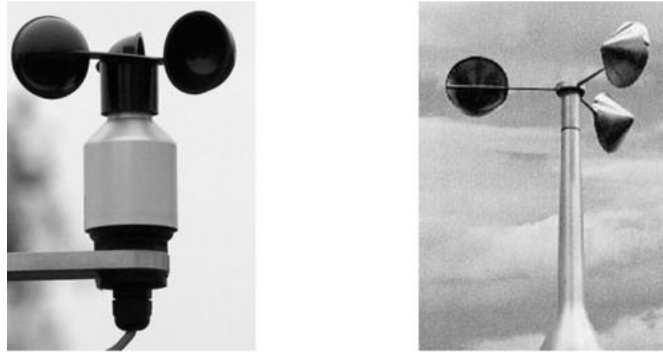


Figura n.º 2.1 Tipos de anemómetros de cazoletas Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición

El tipo hélice se utiliza cuando se quiere determinar la velocidad en una dirección particular. En general se utilizan asociados a una veleta que los orienta en la dirección de donde sopla el viento. Presentan una respuesta más rápida que los de cazoleta, pero en cambio las vibraciones de la veleta pueden afectar la medición.

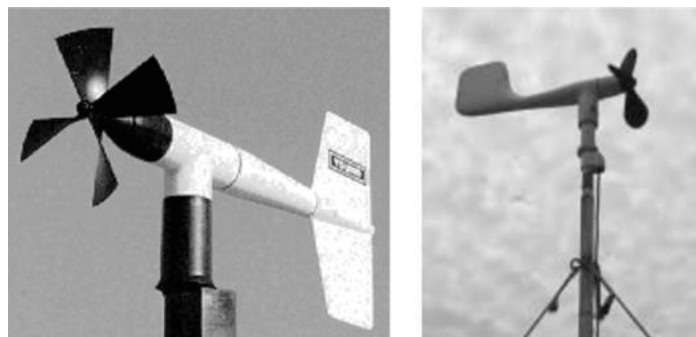


Figura n.º 2.2 Conjunto de anemómetro de hélice y veleta Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición

Los valores promedios instantáneos de la velocidad se promedian cada 10 minutos (en algunos casos cada 30 o 60 minutos). La velocidad media obtenida se asigna al viento medio. El límite inferior de la velocidad que es capaz de captar un anemómetro es insensible a velocidades del viento inferiores a 0,3 m/s, este es su umbral de calma). Algunos modelos de anemómetros también proporcionan los golpes o rachas de viento.

Es importante que el anemómetro presente las siguientes características:

- ✓ Linealidad entre velocidades del viento y la señal de salida.
- ✓ La medida de la velocidad no debe verse afectada por las variaciones de densidad, temperatura, presión y humedad del aire.
- ✓ Precisión. La potencia eólica es proporcional al cubo de la velocidad. Un error del 10% en la medición de la velocidad se traduce en un error del 33% en el cálculo de la energía. Este error puede aumentar si se extrapolan las mediciones a 10 m de altura a alturas superiores correspondientes al buje de la turbina.
- ✓ Calibración: el anemómetro debe calibrarse periódicamente para asegurar la fiabilidad y precisión de las medidas

2.5.2 Medición de la dirección del viento: la veleta.

la dirección se mide con una veleta (figura 2.3), colocada junto al anemómetro, instalándose todo el conjunto en una torre. Consiste en un dispositivo montado sobre un eje vertical y que puede girar libremente por acción del viento cuando este cambia de dirección. Es importante su alineación y evitar la acción de sombras del mástil.

La dirección sufre fluctuaciones. Se calcula una dirección media, promediando los valores instantáneos durante un período de tiempo. Por ejemplo 10 minutos.

2.5.3 Colocación de los instrumentos de medida.

La colocación de los sensores (anemómetro y veleta) debe ser en un lugar despejado, libre de perturbaciones provocadas por obstáculos próximos, ya que estos perturban notablemente la velocidad y dirección del viento, tal como se muestra en la figura 5.

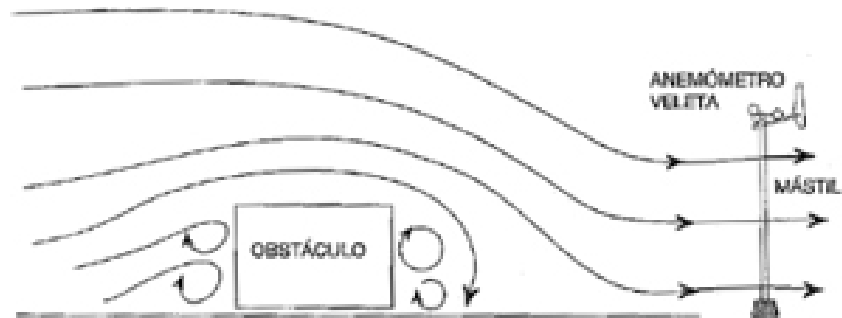


Figura n.º 2.3 Influencia de un obstáculo en la circulación del viento Fuente: Ingeniería Eólica- Miguel Villarrubia López- 1ra Edición

En un general un obstáculo de altura h , perturba el flujo de aire a una distancia $2h$ a barlovento y de $10h$ a $20h$ a sotavento. En la dirección vertical la perturbación puede alcanzar hasta una altura $2h$ (figura 2.4).

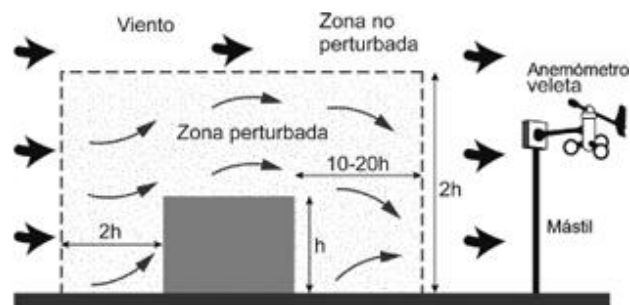


Figura n.º 2.4 Volumen de influencia de un obstáculo. El sensor debe situarse fuera de ese volumen Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición.

Los sensores de medición deben situarse fuera de la zona de perturbación. Interesaría colocarlos en un lugar despejado cuyo horizonte no presentase obstáculos de altura igual o superior al mástil en un radio de unos 300 m. La situación en zonas urbanas y en la proximidad de edificaciones, bosques o irregularidades del terreno puede provocar distorsiones importantes en las medidas de velocidad y dirección.

La colocación del conjunto anemómetro y veleta se realiza en un mástil. En estaciones meteorológicas fijas se coloca a una altura de 10 m sobre el suelo para minimizar las perturbaciones. Para minimizar el abrigo de viento, en lugar de una torre de celosía, se utilizan postes cilíndricos delgados, tensados con cables o vientos. Si el anemómetro se coloca en la parte lateral del mástil debe enfocarse en la dirección de viento dominante para minimizar el abrigo de la torre. En estaciones móviles o semipermanentes se aceptan alturas de 2 a 3 m.

2.6 Análisis y procedimiento de datos.

En la práctica hay diversas formas de presentación de los datos de viento. Conviene indicar que los resultados obtenidos en una campaña de medición de un año son poco representativos del comportamiento del viento, dada la variabilidad y aleatoriedad del mismo. Para tener un nivel significativo de representatividad, se debe disponer de series históricas lo más largas posibles. Serían deseables series históricas de más de 25 o 30 años para disponer de un “año tipo” o “año medio” representativo, aunque períodos entre 5 y 10 años ya comienzan a ser significativos, sin embargo, para nuestro caso la campaña será realizada en un periodo de 4 meses debido al alcance del estudio. En los Servicios Nacionales de Meteorología se puede obtener información sobre datos de viento.

- a) Datos de viento en forma de tablas o series numéricas

- ✓ Valores promedio durante 10 minutos de la velocidad y dirección instantáneas.
- ✓ Valores medios horarios de la velocidad y dirección: Se elaboran promediando para cada hora los seis valores horarios indicados en el apartado anterior.
- ✓ Valores medios trihorarios de la velocidad y dirección: se forman a partir de la media trihoraria de los valores anteriores, para las 0, 3, 6, ...21 horas de cada día. Para un año se tienen 2920 valores de velocidad y otros tantos de dirección.
- ✓ Valores medios diarios (365), decenales (36), mensuales (12) y anual (1) de la velocidad y dirección obtenidos por promedio de los anteriores. Se pueden encontrar resúmenes meteorológicos de la velocidad mensual y la dirección dominante, tal como se muestra en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Velocidad media y dirección dominante mensual del viento Fuente: Ingeniería Eólica- Miguel Villarrubia López- 1ra Edición

Mes	En	Fe	Mz	Ab	My	Jn	Jul	Ag	Se	Oc	No	Di	Año
Velocidad (m/s)	3,5	2,6	3,3	4,1	4,1	3,5	3,5	3,5	3,1	3,5	3,8	3,9	3,5
Dirección dominante	NE	SO	N	NE	SO	SO	N	SO	E	N	SO	N	SO

- ✓ En algunos observatorios se dispone de una tabla en la que se indica junto con la velocidad media anual, las frecuencias relativas de la velocidad media anual por intervalos de velocidad.
- ✓ En todos los casos, debe indicarse el umbral de calmas, que constituye el límite inferior de la velocidad que es capaz de medir el anemómetro.
- ✓ En la elaboración de un “año tipo” o “año medio” representativo, los resultados deben corresponder a promedios de medidas de varios años. Una serie de solo un año es poco fiable y es muy incierto elaborar a partir de ella conclusiones sobre el potencial eólico del lugar, si no se dispone de otros elementos de valoración.

b) Representaciones gráficas.

La representación gráfica (rosa de vientos) más usada es la denominada *rosa de los vientos*. Consiste en un diagrama polar en el cual se definen para diferentes direcciones o rumbos distintos valores relacionados con la velocidad y dirección del viento. El número de rumbos, cuyos valores principales se hacen corresponder con los puntos cardinales, suele ser 8, 12 o 16. El porcentaje de calmas se indica en el centro del diagrama.

La rosa de los vientos permite representar las direcciones dominantes de los vientos. En general, no coinciden la dirección dominante con la mayor intensidad del viento ya que en muchos casos los vientos más intensos no son los que soplan más horas al año procedentes de una determinada dirección. Este es un aspecto importante a tener en cuenta para una correcta colocación de los aerogeneradores.

Se pueden dibujar varios tipos de rosas de los vientos:

- ✓ Porcentaje del tiempo total que el viento sopla procedente de una determinada dirección. Así en la figura 7 se puede ver que la dirección dominante es la NO, de la cual sopla el viento el 23,64% de las horas anuales.

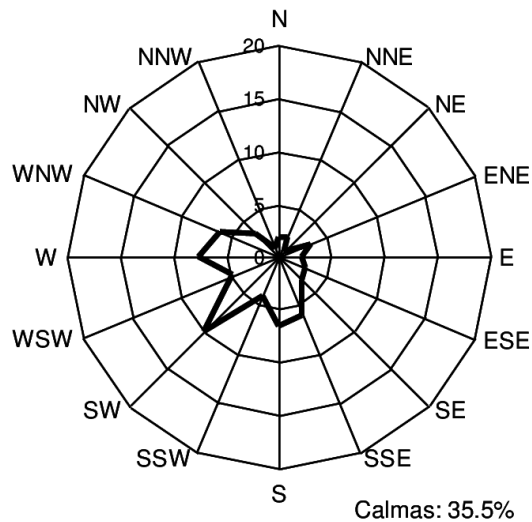


Figura n.º 2.5 Rosa de direcciones de frecuencias porcentuales. Porcentaje de tiempo anual durante el que el viento procede de una dirección, Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición

- ✓ Representación para cada dirección de porcentajes de tiempo total para los que la velocidad se mantiene en determinados intervalos de tiempo.
- ✓ Velocidad media del viento para cada dirección. Junto a cada segmento que representa a escala la velocidad, se indica el porcentaje de tiempo anual (frecuencia relativa porcentual) que sopla el viento procedente de una determinada dirección, tal como se muestra en el ejemplo 1

Ejemplo 1.

Para los datos de la tabla 3, se desea trazar distintas rosas de los vientos.

Tabla 2.3 Frecuencia por dirección y grupo de velocidad (velocidad media anual) Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición.

Lugar: Barcelona (Observatorio Fabra). Periodo: año 1997. Umbral de calmas: 0,2 m/s							
Dirección	V (m/s)	% (0,3-1,5)	% (1,6-3,3)	% (3,4-5,4)	% (5,5-10,7)	% (>10,7)	% Total
N	4.6	0.2	0.6	0.7	0.7	0.0	2.2
NNE	5.1	0.4	1.1	2.1	2.1	0.1	5.8
NE	5.5	0.5	1.7	2.6	4.0	0.5	9.4
ENE	4.5	0.9	2.5	2.2	2.4	0.2	8.2
E	2.5	0.7	2.1	0.7	0.0	0.0	3.6
ESE	2.5	0.4	1.2	0.4	0.0	0.0	2.0
SE	2.6	0.4	1.4	0.4	0.1	0.0	2.2
SSE	3.1	0.2	1.1	0.8	0.1	0.0	2.1
S	3.7	0.4	0.8	1.5	0.4	0.0	3.1
SSO	5.9	0.5	1.5	3.1	6.6	0.4	12.1
SO	5.2	0.7	2.2	4.2	4.5	0.4	12.0
OSO	5.4	0.4	1.6	3.2	4.6	0.1	9.9
O	5.7	0.3	0.9	1.9	3.7	0.0	6.8
ONO	6.3	0.2	0.8	1.5	3.4	0.4	6.3
NO	7.6	0.2	0.7	1.6	4.4	1.7	8.6
NNO	5.5	0.2	0.7	1.0	1.2	0.3	3.4
Total	5.2	6.6	20.9	27.9	38.2	4.1	97.7
Calma	2.3

Solución:

En la figura se representan los datos de la tabla 3. El viento más intenso (7.6 m/s) procede del NO y se presenta un 8,6% de las horas anuales (753 h/año), mientras que el más frecuente 12,1% (1.060 h/año) es el de SSW, de 5,9 m/s.

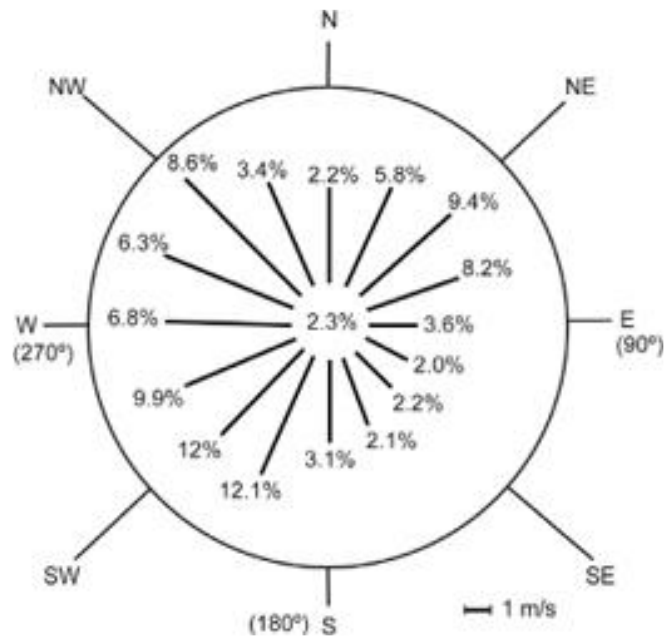


Figura n.º 2.6 Velocidades medias y frecuencias en porcentaje temporal (Valores anuales) correspondiente a los valores de la tabla 2.3 Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición

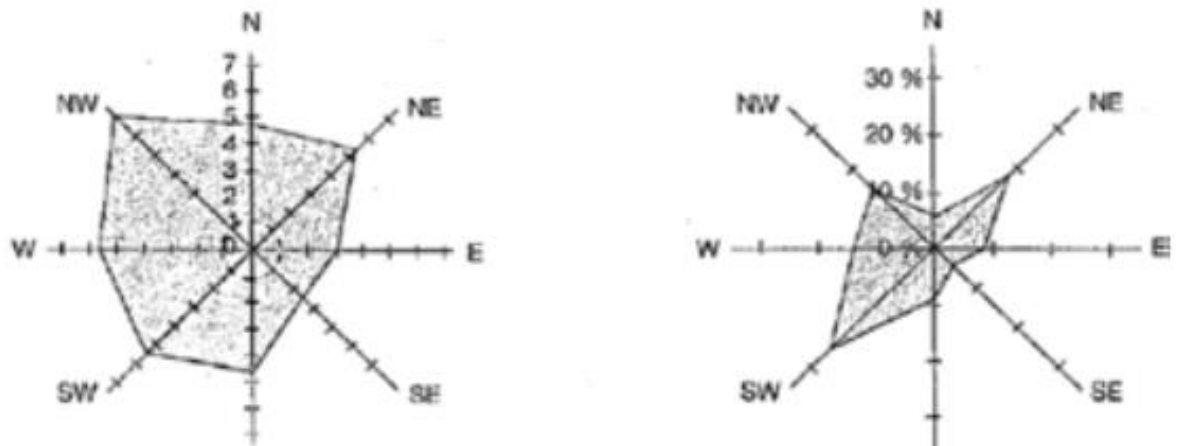


Figura n.º 2.7 Rosas de los vientos de 8 rumbos por los valores de la Tabla 2.3. Velocidad media del viento (m/s) para cada dirección (Izq.) y Frecuencia para cada dirección (Der.) Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición

Ejemplo 2.

En la figura 11 se representa una rosa de frecuencias de vientos de 8 rumbos correspondiente a datos promedio cada 10 minutos para un año. No se representan las velocidades inferiores a 1,5 m/s, que se consideran calmas y corresponden al 30% del conjunto de todos los datos del año. Determinar el viento dominante.

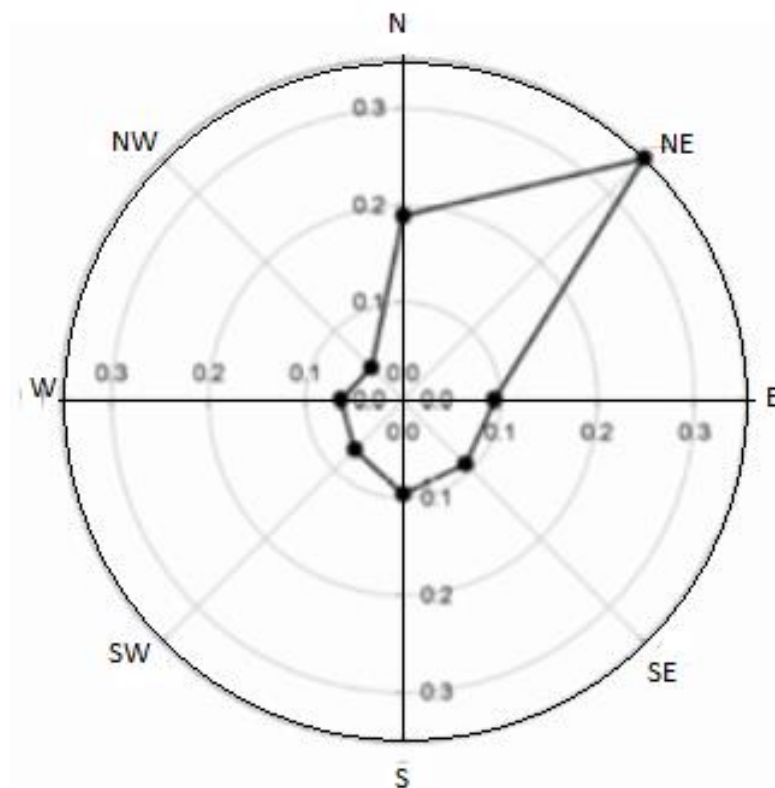


Figura n.º 2.8 Rosas de direcciones de ocho rumbos del ejemplo 2 Fuente: Ingeniería Eólica- Miguel Villarrubia López- 1ra Edición

Solución.

Tabla 2.4 Tabla de frecuencia de dirección de vientos del ejemplo 2 Fuente: Ingeniería Eólica- Miguel Villarrubia López- 1ra Edición

Dirección de donde procede	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
f (%)	19	34	10	9	9	7	5	5

El viento dominante tiene dirección NE (34%), seguido del N (19%). La orientación de un parque eólico debería ser NE. En este ejemplo se han considerado calmas todas las velocidades que no han alcanzado 1,5 m/s.

2.7 Aplicación de la estadística a cálculos eólicos

Se presentan los conceptos estadísticos más usados en el análisis del viento. Aunque la variable utilizada en las siguientes definiciones es la velocidad, todos los conceptos son aplicables a otras mediciones, como la dirección del viento.

a) Parámetros de centralización

Para un conjunto de N valores de velocidad (V_1, \dots, V_k) que se presentan (n_1, \dots, n_k) veces cada uno de ellos, se definen los siguientes parámetros de centralización:

- ✓ Frecuencia relativa f_i de la magnitud v_i :

$$f_i = \frac{n_i}{N}, \quad (5)$$

- ✓ Media aritmética o simplemente media $\langle v \rangle$ definida por:

$$\langle v \rangle = \sum_{i=1}^k \frac{n_i v_i}{N} = \sum_{i=1}^k f_i v_i, \quad (6)$$

- ✓ Mediana (\tilde{v}): en un conjunto de datos ordenados en magnitud es el valor medio de los dos valores que dividen al conjunto de datos en dos partes iguales.
- ✓ Moda (V_m): Valor que se presenta con la máxima frecuencia.

b) Tratamiento estadístico

El tratamiento de un conjunto de N valores de velocidad (V_1, \dots, V_k) que se presentan (n_1, \dots, n_k) veces respectivamente cada uno de ellos, se realiza según:

- ✓ Agrupación de los datos en clases o categorías, determinando *la frecuencia de clase*, es decir el número de ellos que pertenecen a cada clase. Cada clase viene definida por sus límites superior o inferior, que definen *el intervalo de clase (bin)* y su valor medio es la marca de clase. En cálculos eólicos que exigen un cierto grado de precisión se recomienda adoptar un intervalo de clase o bin no mayor de 0,5 m/s.
- ✓ El número de clases depende del número de datos, del intervalo del conjunto y de la precisión exigida. A título orientativo, el número de clases (N_c) y el número de datos (N) se indica en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Número de clases en función del número de datos Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición

Número de datos (N)	<50	50-100	100-250	>250
Número de clases (Nc)	5-7	6-7	7-12	10-20

- ✓ Elaboración de una tabla que incluya las clases o categorías y frecuencias. A partir de estos datos se calculan las frecuencias relativas, las frecuencias acumuladas, la velocidad media, la mediana, la moda y la desviación típica.

- ✓ Es útil el histograma de frecuencias relativas ya que permite esbozar la ley o función de distribución continua de probabilidad, a partir de la forma que adopta el *polígono de frecuencias* (línea que une los centros de los lados superiores de los rectángulos del histograma). Así mismo, conviene dibujar la curva de *frecuencias acumuladas* (“menor o igual que”) o bien su complementaria F' (“mayor que”), definida por: $F' = 1 - F$.
- ✓ La curva de duración de la velocidad se dibuja a partir de la curva de frecuencias acumuladas F' (“mayor que”), colocando en ordenadas la velocidad y en abscisas el número de horas acumuladas. Esta curva indica el tiempo durante el que la velocidad del viento se mantiene superior a un cierto valor.

Ejemplo 3.

A partir de las velocidades medias diarias del viento durante 65 días ($N=65$), tabla 2.6, trazar el histograma de frecuencias y las curvas de frecuencias acumuladas.

Solución.

Se procede a la agrupación y clasificación de los datos según las clases de la tabla 2.6 se incluyen también las frecuencias relativas (f_i) y acumuladas F_i y F'_i . En las figuras se muestran el histograma de frecuencias y las curvas de frecuencias relativas acumuladas.

Tabla 2.6 Velocidades medias diarias. Frecuencia relativas y acumuladas (ejemplo 3) Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición

Intervalo de la clase (m/s)	Centro de la clase	Frecuencia de la clase	Frecuencia relativa	Frecuencia relativa acumulada "menor o igual que"	Frecuencia relativa acumulada "mayor que"
	$V(m/s)$	n (días)	$f_i = \frac{n_i}{N}$	F	$F' = 1 - F$
$0 \leq v \leq 1$	0.5	8	0.123	0.123	0.877
$1 < v \leq 2$	1.5	10	0.154	0.277	0.723
$2 < v \leq 3$	2.5	16	0.246	0.523	0.477
$3 < v \leq 4$	3.5	14	0.215	0.738	0.262
$4 < v \leq 5$	4.5	10	0.154	0.892	0.108
$5 < v \leq 6$	5.5	5	0.077	0.969	0.031
$6 < v \leq 7$	6.5	2	0.031	1	0
Total		N=65	1		

- ✓ En la Tabla 2.6 se lee la fracción de días para los que la velocidad media diaria es menor o igual a un cierto valor (por ejemplo, el 52,3% de los días, 34 días de los 65 considerados, en los que es menor o igual a 3 m/s).
- ✓ En la Tabla 2.6 se lee la fracción de días del período considerando para los que la velocidad media diaria es mayor que un cierto valor (por ejemplo, el 47,7% de los días, 31 días de los 65 considerados, en los que es mayor que 3 m/s).
- ✓ En la Tabla 2.7 (curva de duración de la velocidad) se lee el número de días para los que la velocidad media diaria es mayor a un cierto valor (por ejemplo, hay 31 días cuya velocidad será mayor que 3 m/s).
- ✓ A los valores de la frecuencia relativa (f_i) se les hace corresponder el centro de la clase, mientras que a los de las frecuencias acumuladas, los límites superiores de las mismas. Por ejemplo, a la cuarta clase le corresponde una frecuencia relativa $f_i = 0,215$ (14 días) para una velocidad de 3,5 m/s, mientras que al cuarto valor de la frecuencia relativa acumulada $f_i = 0,738$ se le hace corresponder el límite superior de la clase, es decir a 4 m/s.

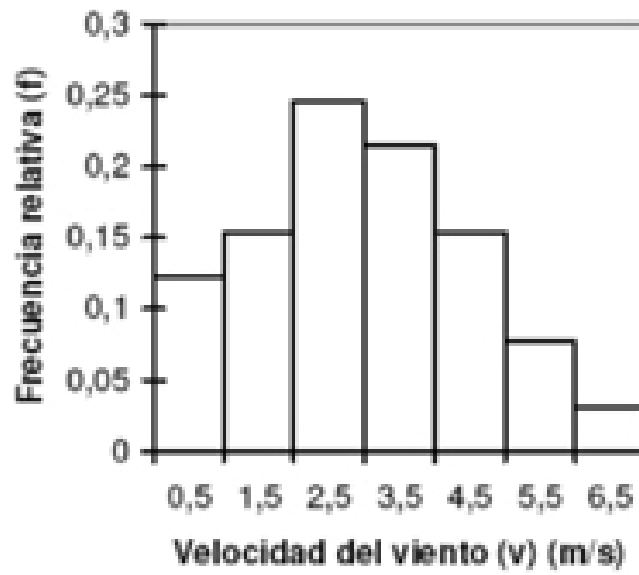


Figura n.º 2.9 Histograma de frecuencias relativas (ejemplo 3) Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición

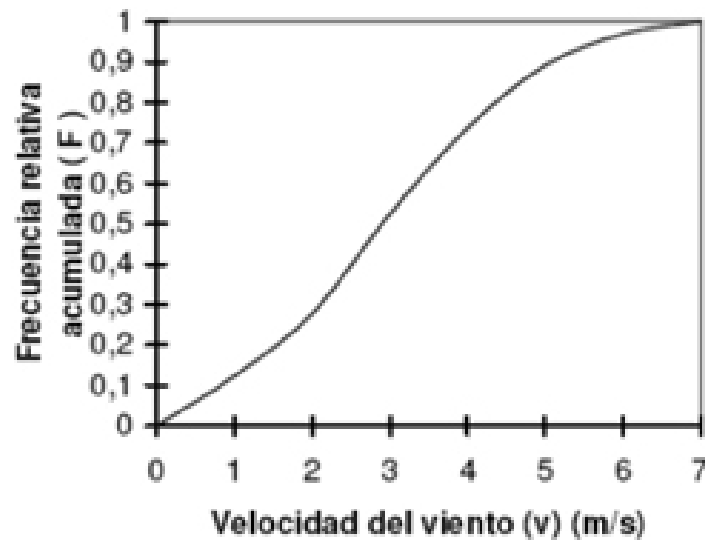


Figura n.º 2.10 Frecuencias relativas acumuladas "menor o igual que" (ejemplo 3) Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición

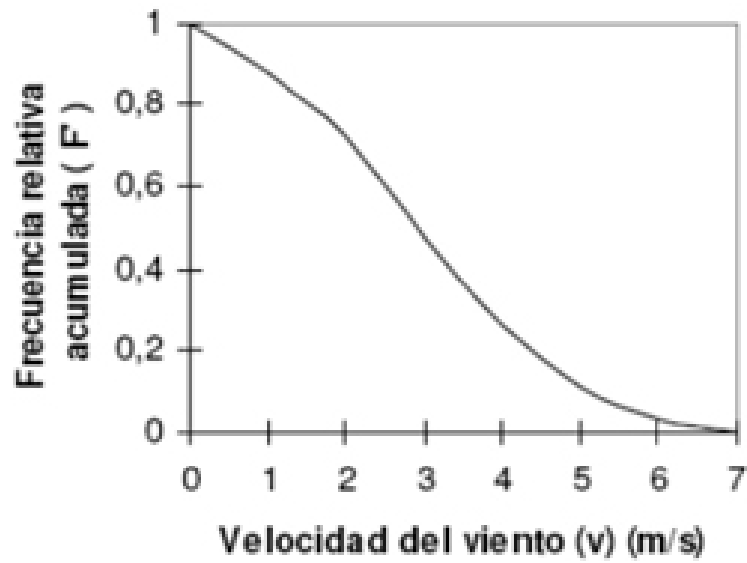


Figura n.º 2.11 Frecuencia relativa acumuladas "mayor que" (ejemplo 3) Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición

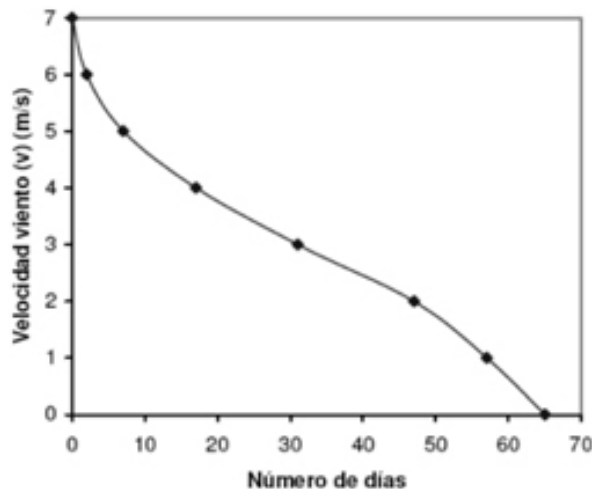


Figura n.º 2.12 Curva de la duración de la velocidad o curva de velocidades frente a frecuencias acumuladas Fuente: Ingeniería Eólica-Miguel Villarrubia López- 1ra Edición

2.7.1 Tratamiento estadístico de los datos del viento

Para estudios energéticos, las velocidades de un solo año, no son suficientemente representativas. Series de datos a partir de 25 a 30 años,

proporcionan resultados significativos. Si no se dispone de históricos tan largos, como mínimo deben manejarse períodos de 5 a 10 años. Además, se debe realizar una campaña de al menos un año de duración en donde se proyecta colocar el aerogenerador y relacionar las medidas encontradas con los resultados del tratamiento estadístico y de los posibles estudios de modelización numérica de predicción del viento.

El conjunto de valores históricos de varios años se resume en un “año tipo” o “año medio”, donde sus valores horarios de la velocidad (8.750 para el año), se obtienen como promedio para todos los años de los valores correspondientes a cada hora. Por ejemplo, si a las 12 horas del día 10 de junio del “año tipo” se tiene una velocidad de 8 m/s, este valor es el resultado de promediar todos los valores de las velocidades para las 12 horas de todos los días 10 de junio de cada año de la serie histórica.

Los histogramas de frecuencia de la velocidad del viento presentan un aspecto similar al de la figura n° 2.13. Su forma corresponde a una distribución de Weibull.

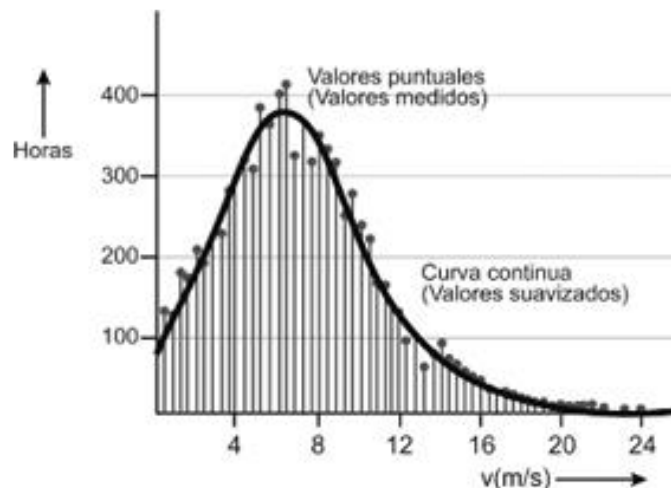


Figura n.º 2.13 Curva de frecuencia de la velocidad horaria del viento. Fuente: Ingeniería Eólica- Miguel Villarrubia López- 1ra Edición.

Las curvas de frecuencia acumuladas permiten trazar la curva de duración de las velocidades de la forma que se muestra en la Figura n° 2.14.

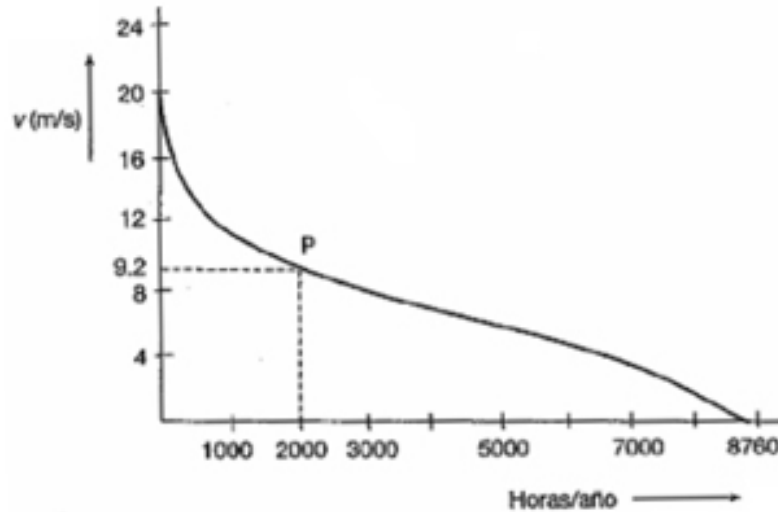


Figura n.º 2.14 Curva de duración de la velocidad (el punto P indica que durante el año hay 2000 horas en las que la velocidad del viento es igual o mayor que 9,2 m/s), Fuente:

2.8 Validación de los resultados.

Verificación del equipo de medición

Los anemómetros, veletas, termohigrómetros y otros sensores estén:

- ✓ Calibrados
- ✓ Instalados a la altura correcta
- ✓ Correctamente orientados

Validación inicial

- ✓ Detectar valores atípicos

- ✓ Velocidad de viento = 0 durante mucho tiempo puede indicar falla de sensor.
- ✓ Dirección sin sentido o valores fuera de rango
- ✓ Buscar datos faltantes o saltos bruscos.
- ✓ Comparar datos.

Validación estadística

Una vez limpias las series, se pueden calcular:

- ✓ Media, desviación estándar, frecuencia de viento por dirección.
- ✓ Rosa de vientos para ver predominancia de direcciones.
- ✓ Comparar con datos históricos

Validación espacial

- ✓ Usar Sistemas de Información Geográfica para mapear los sitios evaluados.
- ✓ Comparar con mapas eólicos nacionales si están disponibles.
- ✓ Identificar zonas con anomalías o inconsistencias geográficas

2.9 Selección de la Carretera

Para la identificación del sitio de estudio, se consideraron cuatro corredores viales de interés: CA-2, RN-5, CA-12 y CA-8, los cuales presentan condiciones representativas en cuanto a flujo vehicular, accesibilidad y características topográficas.

2.9.1 Tramos de carretera evaluados

En la carretera RN-5 se evaluó un tramo de 34.5 km, como se observa en la figura

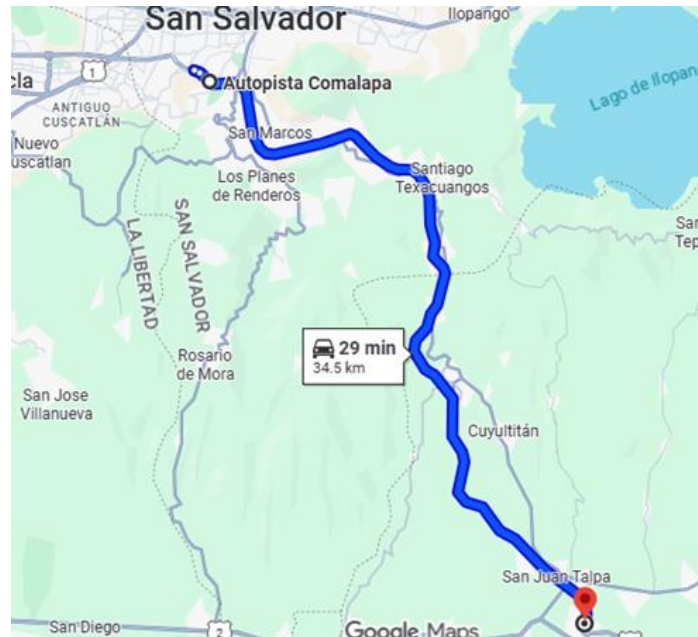


Figura n.º 2.15 Tramo de carretera RN-5, Fuente: Google Maps.

En la carretera CA-8, se evaluó el tramo de 39.5 km, comprendido desde Lourdes Colón hasta Sonsonate, como se observa en la figura siguiente

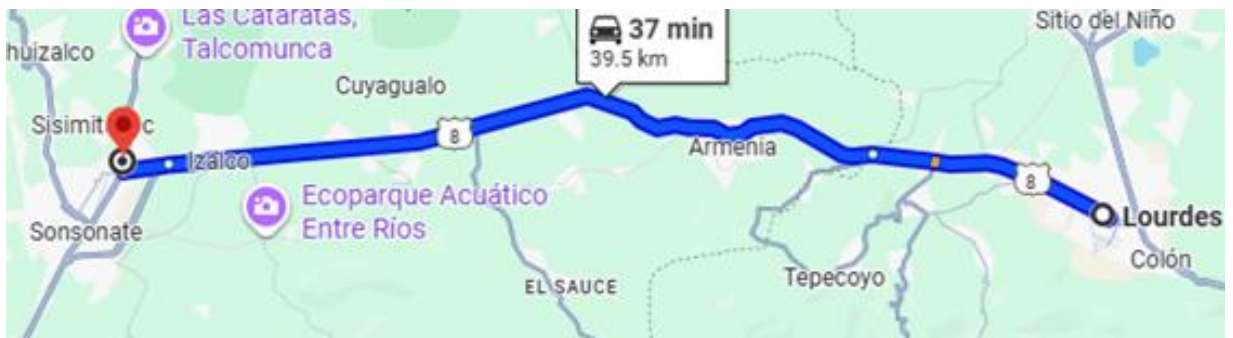


Figura n.º 2.16 Ilustración de Carretera CA-8, Fuente: Google Maps.

En la carretera CA-2, se evaluó el tramo de 26.5 km, comprendido desde Zacatecoluca hasta el desvío hacia el Aeropuerto Internacional de El Salvador, como se observa en la figura siguiente

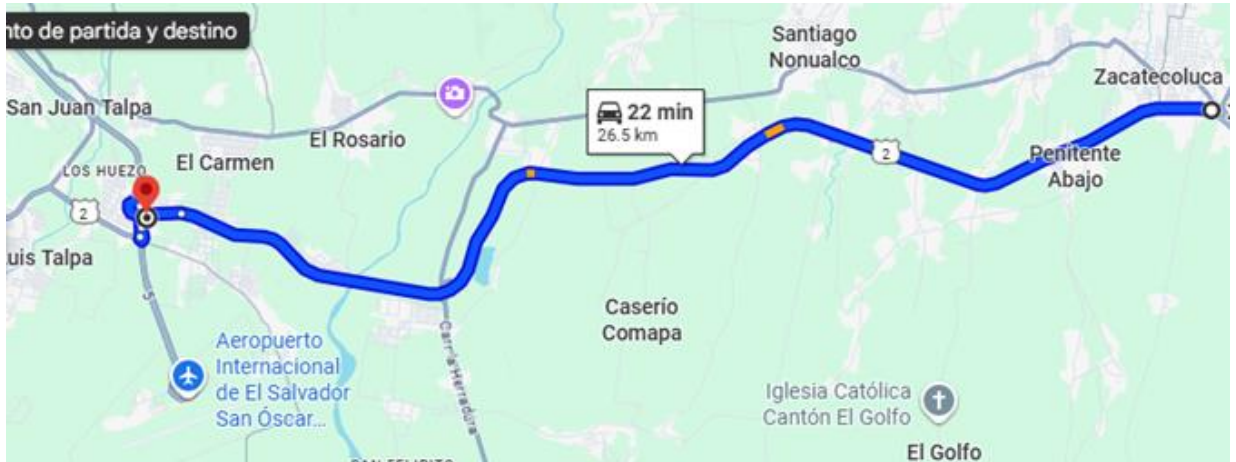


Figura n.º 2.17 Imagen que muestra la carretera CA-2. Fuente: Google Maps.

En la carretera CA-12, se evaluó el tramo de 21 km, comprendido Sonsonate hasta El Puerto de Acajutla, como se observa en la figura siguiente

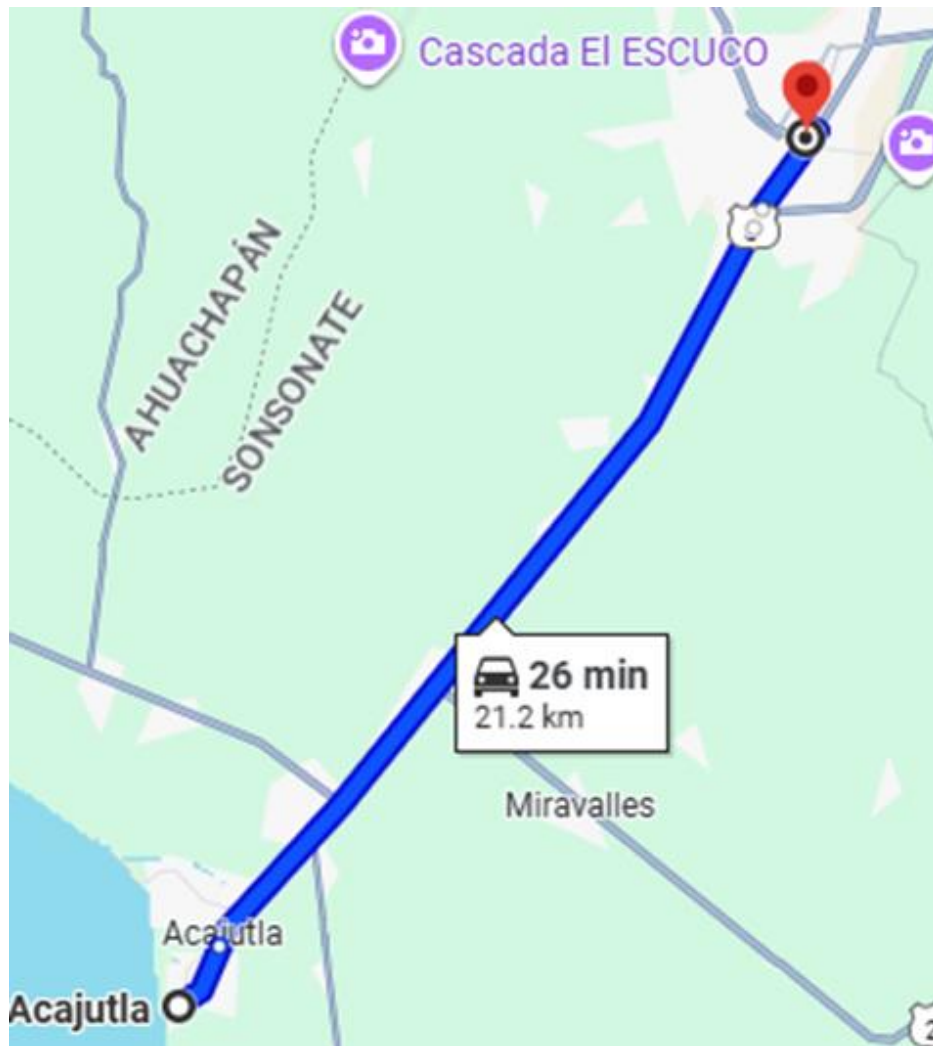


Figura n.º 2.18 Imagen que ilustra la carretera CA-12. Fuente: Google Maps.

2.9.2 Criterios de selección

Con el propósito de determinar la carretera más adecuada para la medición del recurso eólico inducido por el tráfico, se establecieron criterios técnicos y operativos de selección, tales como el flujo vehicular, velocidad promedio del tráfico, seguridad y acceso para medición, la disponibilidad de espacio para la instalación de equipos y las condiciones del entorno inmediato.

Tabla 2.7 Criterios para la selección de carreteras para la investigación, Fuente: Propia.

Criterio (Código)	Nombre del Criterio	Descripción	Puntuación Máxima
A	Flujo Vehicular	Volumen de vehículos por hora. Tramos con alto flujo tienen mayor probabilidad de generar viento constante	1
B	Velocidad promedio del tráfico	Sitios donde la velocidad de los vehículos es moderada-alta (ideal ≤ 60 km/h).	1
C	Entorno físico favorable	Presencia de canalización natural, pasos estrechos o taludes que intensifiquen el viento canalizado.	1
D	Seguridad y acceso para medición	Acceso peatonal o técnico seguro para colocar sensores sin riesgo para personas ni equipos.	1
E	Ausencia de interferencias físicas.	No existen árboles, estructuras elevadas, postes u obstáculos que perturben las mediciones del viento	1
F	Viabilidad técnica y legal	No existen impedimentos por parte del MOP, FOVIAL, alcaldías o medio ambiente para la instalación de sensores o estructuras temporales.	1
G	Potencial observado preliminar	Valoración inicial del viento inducido (observación cualitativa o medición básica con anemómetro portátil).	1
H	Doble flujo vehicular	Posibilidad de recibir flujo de aire por el paso vehicular en cada lado de la instalación del aerogenerador	1
I	Terreno nivelado y estable	Condiciones del terreno para montar trípodes o estructuras sin riesgo de inestabilidad.	1
J	Proximidad y necesidad de consumo eléctrico	Este criterio evalúa el potencial beneficio práctico del sitio en función de la posibilidad de utilizar la energía generada para aplicaciones locales, como el alumbrado público vial o el abastecimiento eléctrico a comunidades cercanas.	1

Estos criterios fueron organizados y ponderados dentro de una matriz de evaluación multicriterio Tabla 2.8, herramienta que permitió jerarquizar de

manera objetiva los corredores viales evaluados y, posteriormente, seleccionar tanto la carretera más representativa como los puntos específicos de medición. De este proceso se derivó la identificación del sitio final para el desarrollo de la campaña experimental de monitoreo del viento.

2.9.3 Análisis de flujo Vehicular y Tipo de Vehículos

Para el análisis del flujo vehicular se utilizaron datos secundarios provenientes del Traffic and Commodity Flow Survey elaborado por la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA). Dicho estudio realizó conteos de tránsito durante un período de 12 horas en 20 estaciones estratégicas de la red vial de El Salvador.

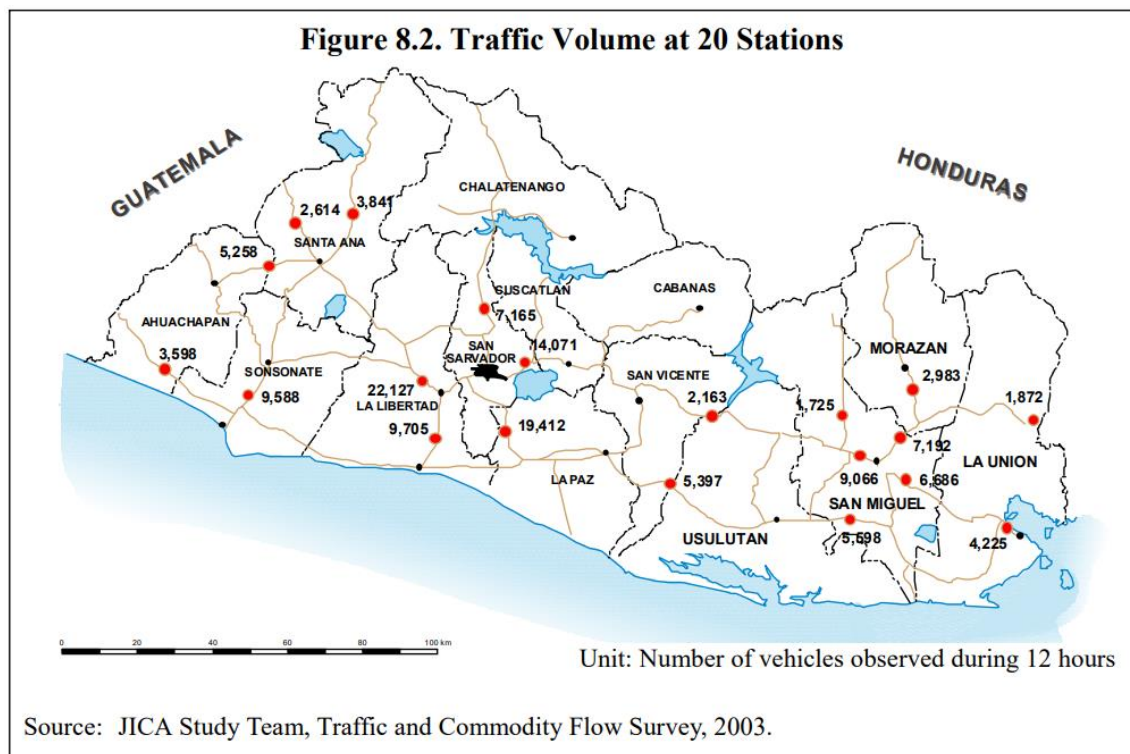


Figura n.º 2.19 Número de vehículos observado durante 12 horas en 20 estaciones estratégicas del país, Fuente JICA Study Team, 2003

Los resultados indican que las carreteras principales del país presentan volúmenes elevados de tránsito, especialmente aquellas que conectan centros urbanos, zonas productivas y corredores logísticos. En los corredores primarios se registran valores que oscilan entre 7,000 y más de 20,000 vehículos por cada 12 horas.

En el caso de carreteras que conectan con puertos, fronteras y la Región Oriental, los volúmenes se sitúan entre 6,000 y 10,000 vehículos por cada 12 horas, confirmando su importancia para el transporte de personas y mercancías.

Tipos de vehículos que circulan

- ✓ La composición vehicular promedio observada es la siguiente:
- ✓ 26% vehículos livianos (automóviles particulares)
- ✓ 16% autobuses de transporte colectivo
- ✓ 37% pickups
- ✓ 17% vehículos de carga pesada, incluyendo camiones y tráileres

En la carretera CA-2, en el tramo que conduce hacia el puerto de Acajutla, el volumen de tráfico alcanza aproximadamente 9,600 vehículos, de los cuales alrededor del 30% corresponde a transporte de carga.

Asimismo, de los dos principales puntos de acceso a la Región Oriental, el puente San Marcos sobre la CA-2 presenta un volumen de tráfico de 5,400 vehículos.

2.9.4 Selección de carretera

Tabla 2.8 Herramienta para seleccionar carretera más óptima, Matriz de Pugh, Fuente: Propia.

MATRIZ DE PUGH		Calificación	1 Cumple criterio		0 No cumple criterio				
Criterios de selección	Importancia (peso)	RN-5		CA-2		CA-12		CA-8	
		Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación
Flujo Vehicular	15%	1	0.15	1	0.15	1	0.15	1	0.15
Velocidad Promedio del Tráfico	15%	1	0.15	1	0.15	1	0.15	1	0.15
Entorno físico favorable	10%	0	0	1	0.1	1	0.1	1	0.1
Presencia de vehículos pesados	12%	0	0	1	0.12	1	0.12	0	0
Ausencia de interferencias físicas	10%	0	0	1	0.1	0	0	0	0
Viabilidad técnica y legal	7%	0	0	0	0	0	0	0	0
Potencial observado preliminar	10%	1	0.1	1	0.1	1	0.1	0	0
Doble flujo vehicular	6%	0	0	1	0.06	0	0	0	0
Carriles anchos	10%	1	0.1	1	0.1	0	0	0	0
Cercanía a estación meteorológica	5%	0	0	0	0	0	0	0	0
VALORACIÓN TOTAL	100%	4	0.5	8	0.88	5	0.62	3	0.4

2.9.5 Sitio ganador



Figura n.º 2.20 Imagen del sitio ganador utilizando la Matriz de Pugh, Fuente: Propia.

CAPITULO 3.

3 DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DISPONIBLE

3.1 Diseño de la campaña de medición:

- ✓ Altura de medición: 2 m sobre el nivel de la superficie.
- ✓ Altura de medición sobre el nivel de mar 160 (m s. n. m.)
- ✓ Distancia lateral respecto a los vehículos: 1.20 m desde ambos sentidos de circulación.
- ✓ Frecuencia de muestreo: cada 1 segundo.
- ✓ Duración de la campaña: 16 días.
- ✓ Horario de medición: de 5:00 a.m. a 5:00 p.m., cubriendo las principales horas de tránsito vehicular.

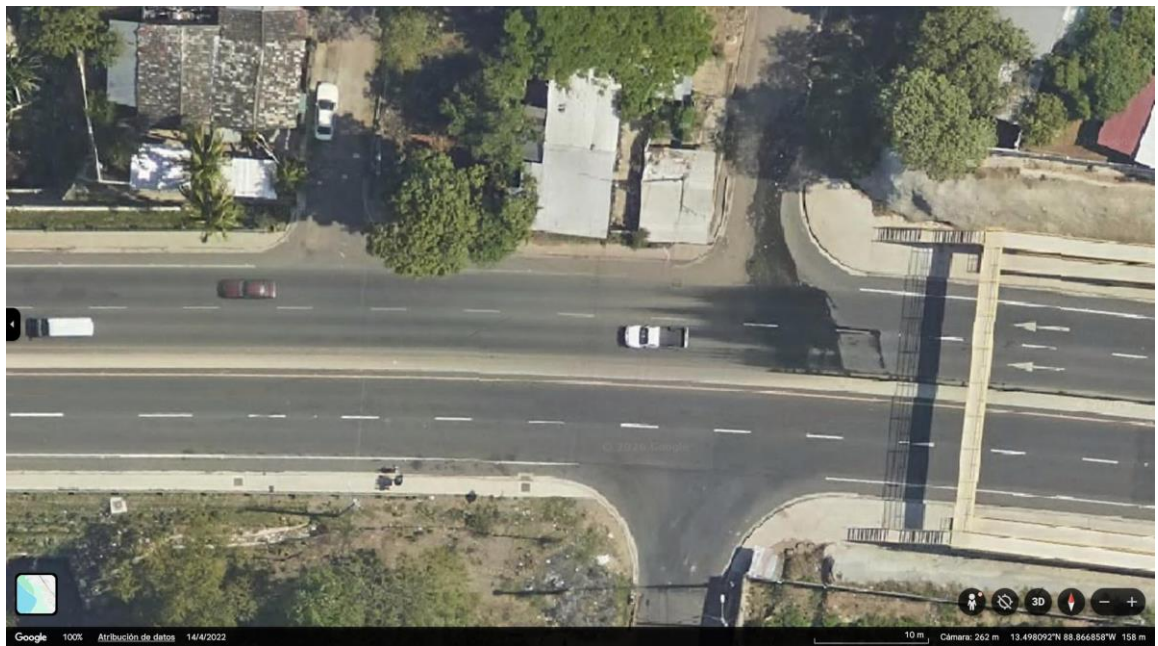


Figura n.º 3.1 Imagen del sitio ganador, Fuente: Google Earth.

3.2 Equipo de medición



Figura n.º 3.2 Campaña de medición equipados con herramientas y EPP, Fuente: Propia.

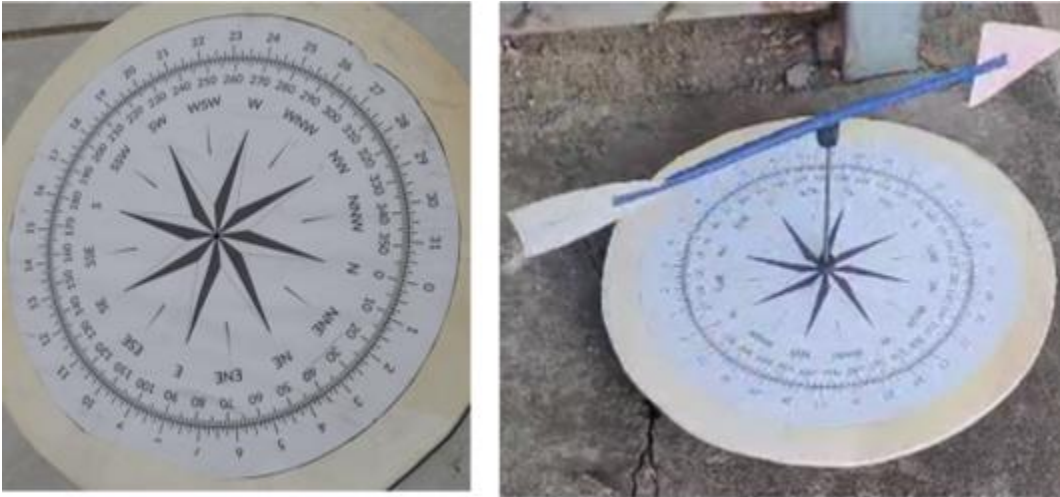


Figura n.º 3.3 Veleta que muestra las direcciones del viento, Fuente: Propia.

3.3 Procesamiento de datos

Los datos fueron organizados en intervalos de 10 minutos de promedio, de acuerdo con las recomendaciones internacionales para el análisis de series de viento.

Posteriormente, se ajustaron distribuciones de Weibull y se elaboraron rosas de viento, con el fin de caracterizar estadísticamente la variabilidad y el potencial energético del recurso eólico inducido por el tráfico vehicular en el sitio seleccionado.

3.4 Distribución de Weibull

Para reducir el ruido asociado a la señal original registrada a 1 Hz y obtener una representación más estable del comportamiento del viento inducido por el tráfico vehicular, las velocidades instantáneas fueron procesadas mediante promedios móviles de 10 minutos. Este intervalo es comúnmente utilizado en estudios anemométricos, ya que permite suavizar fluctuaciones de muy alta frecuencia sin perder la estructura general del flujo. A partir de esta serie promediada se construyó la distribución de Weibull global, obteniéndose parámetros $k = 12.92$ y $c = 3.93$ m/s, los cuales reflejan una variabilidad reducida y una alta concentración de las velocidades alrededor de su valor característico. Esta distribución se presenta en la Figura X.

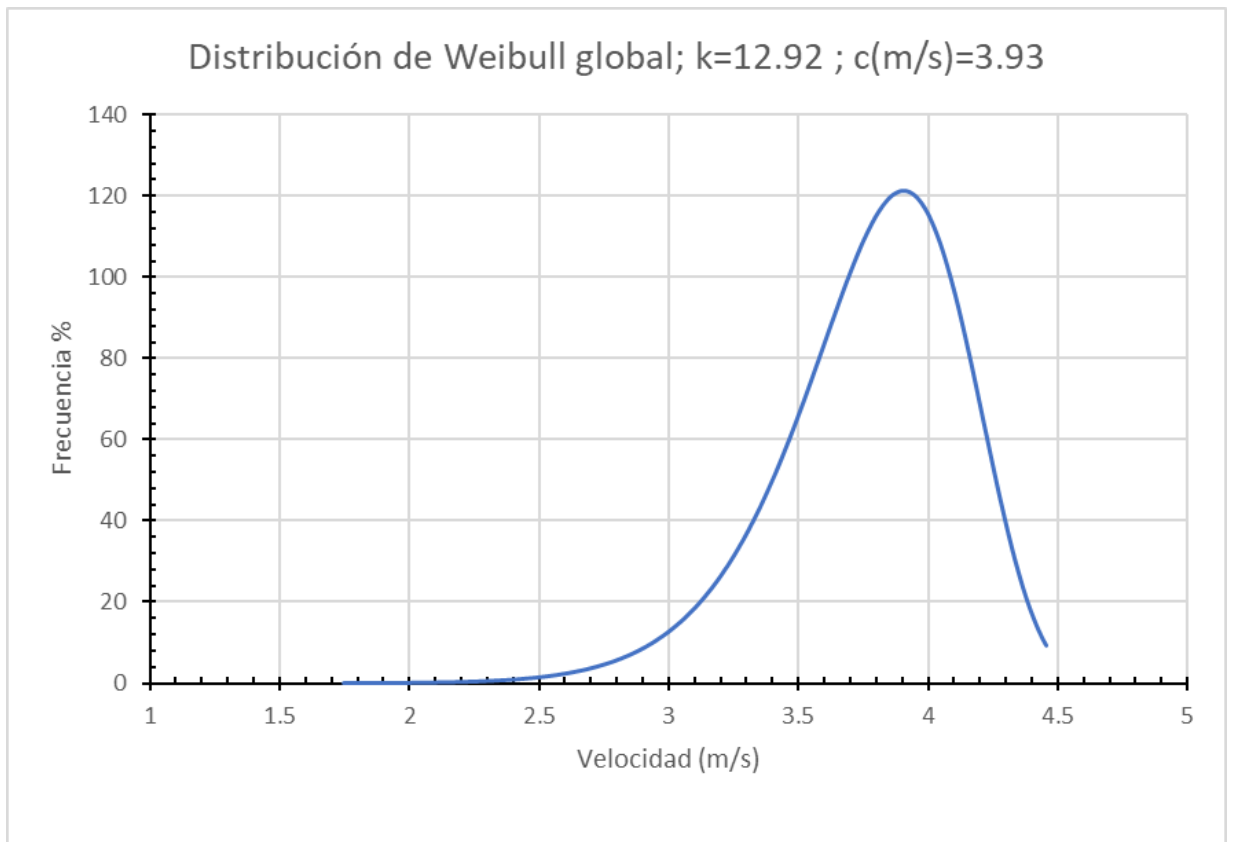


Figura n.º 3.4 Distribución de Weibull global del viento inducido ($k= 12.92$; $c= 3.93$ m/s), Fuente: Propia.

A continuación, muestra el resultado por hora, procesando los datos en promedios de 10 min

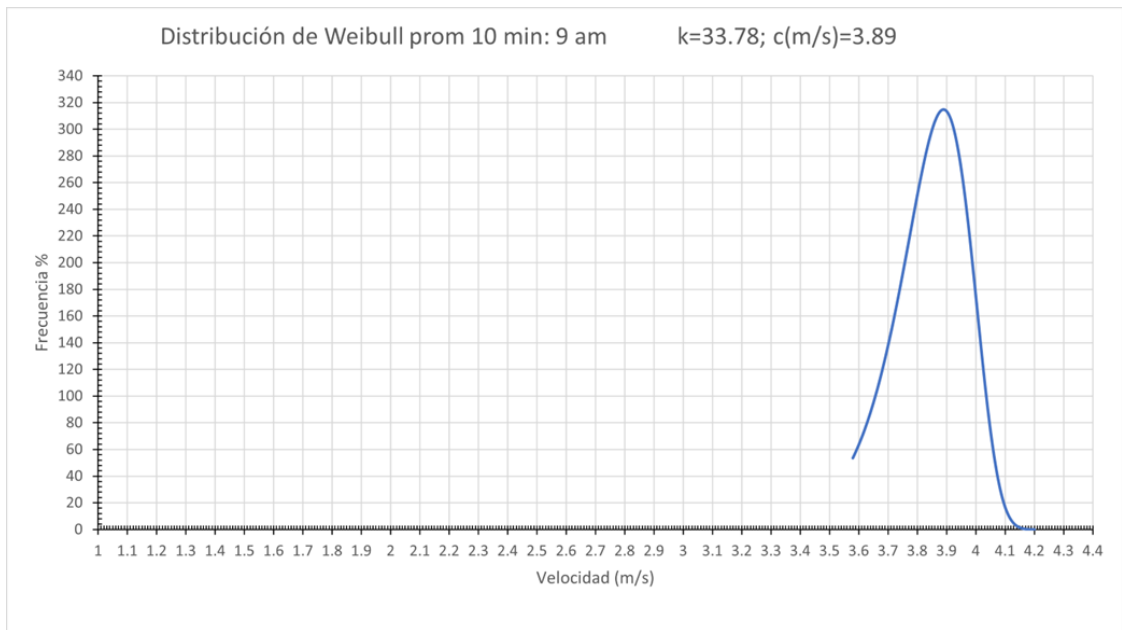


Figura n.º 3.6 Distribución de Weibull promedio cada 10 min: 9 a.m. global del viento inducido ($k= 33.78$.; $c= 3.89$ m/s) , Fuente: Propia.

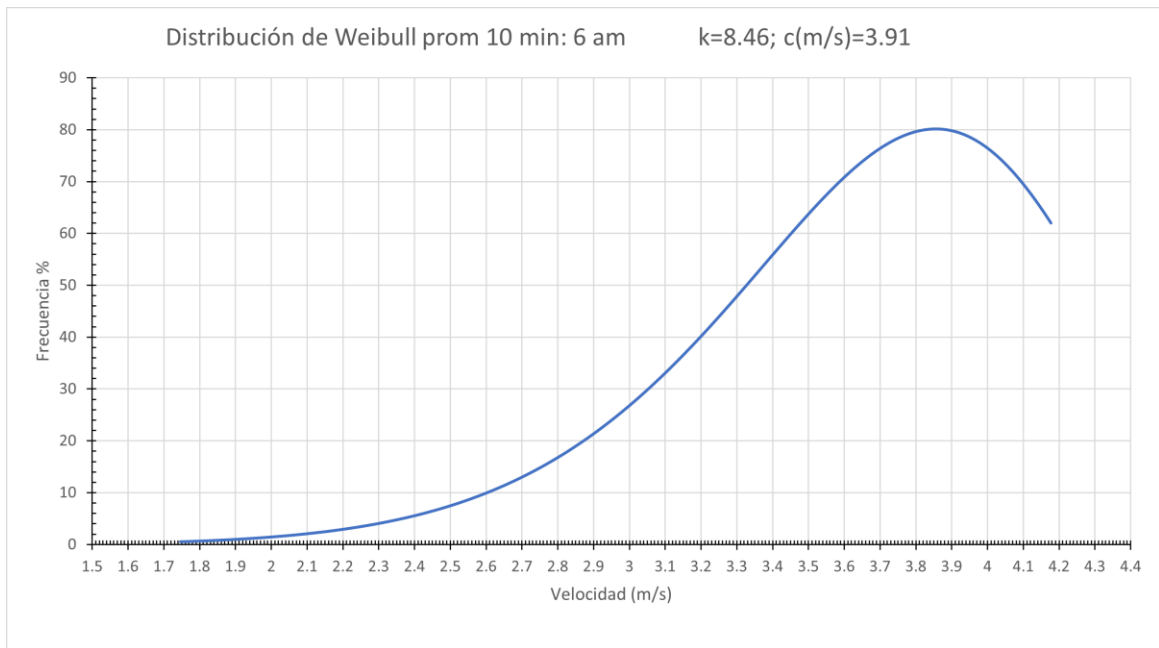


Figura n.º 3.5 Distribución de Weibull promedio cada 10 min: 6 a.m. global del viento inducido ($k= 8.46$; $c= 3.91$ m/s) , Fuente: Propia.

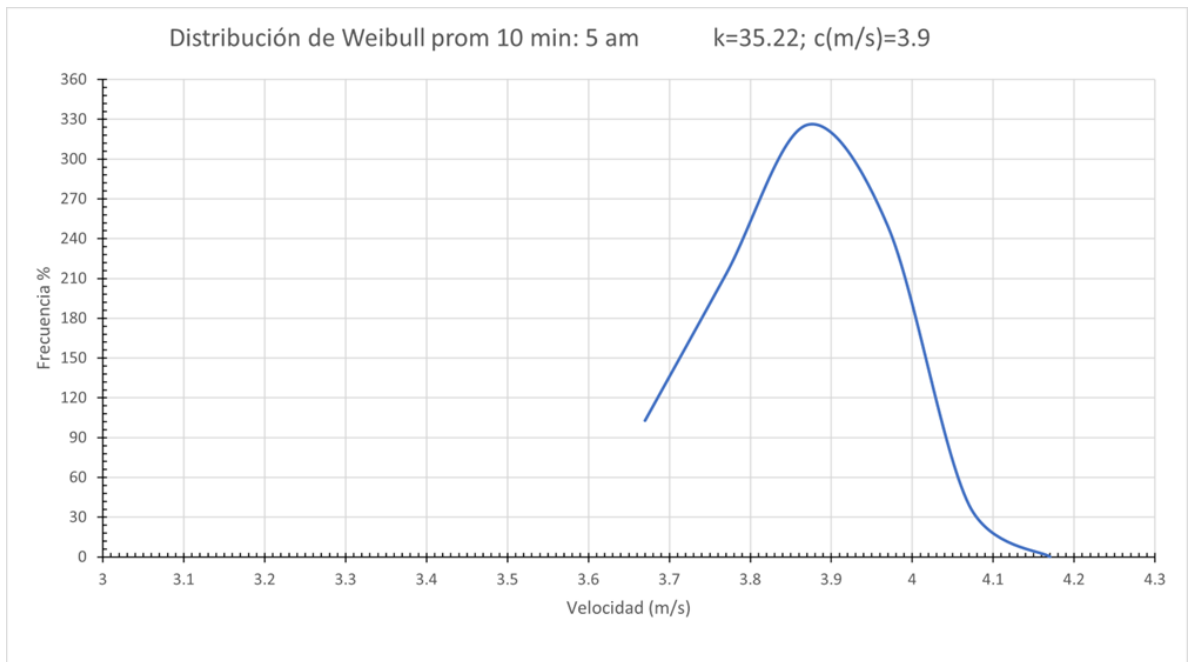


Figura n.º 3.7 Distribución de Weibull promedio cada 10 min: 5 a.m. global del viento inducido ($k= 35.22.; c= 3.9$ m/s) , Fuente: Propia.

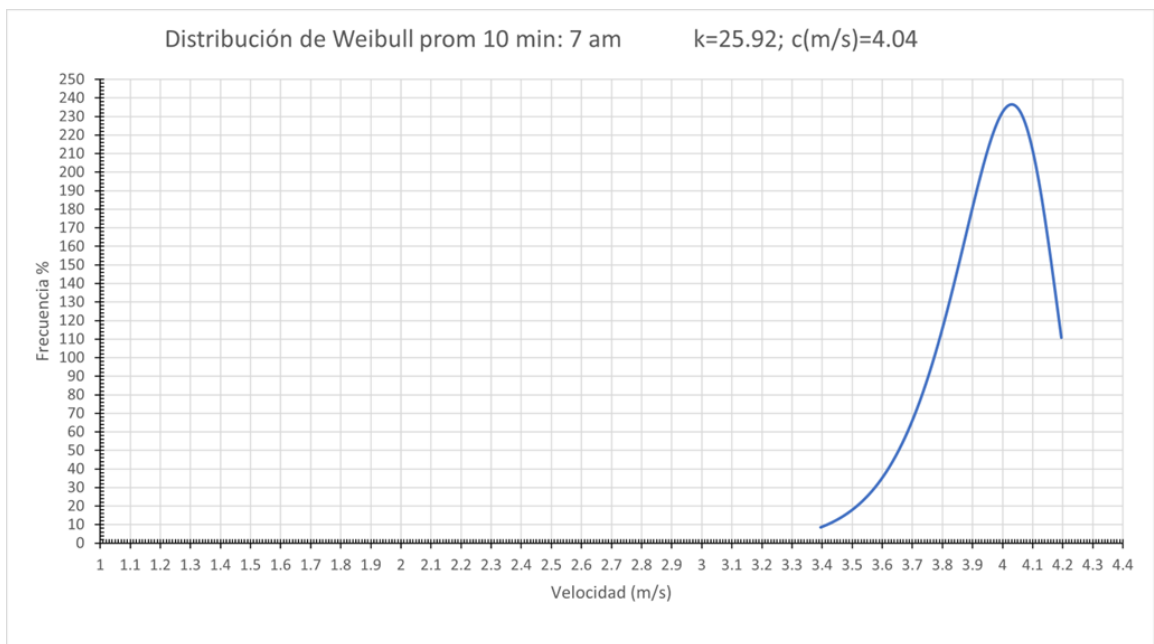


Figura n.º 3.8 Distribución de Weibull promedio cada 10 min: 7 a.m. global del viento inducido ($k= 25.92.; c= 4.04$ m/s) , Fuente: Propia.

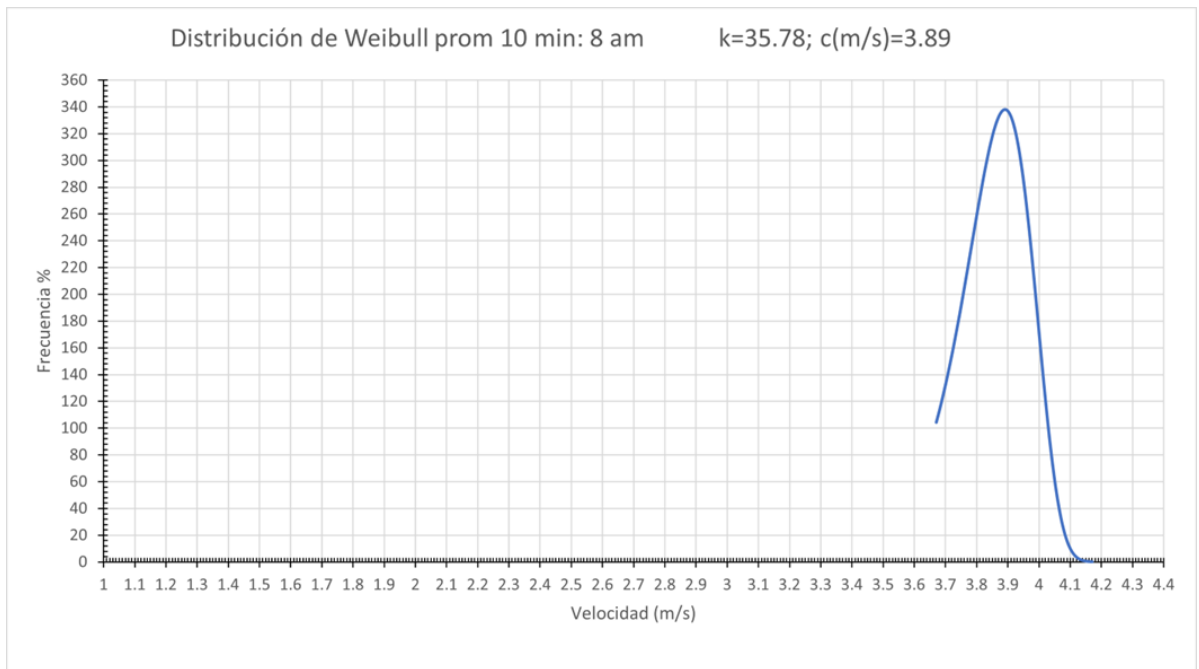


Figura n.º 3.9 Distribución de Weibull promedio cada 10 min: 8 a.m. global del viento inducido ($k= 35.78$.; $c= 3.89$ m/s) , Fuente: Propia.

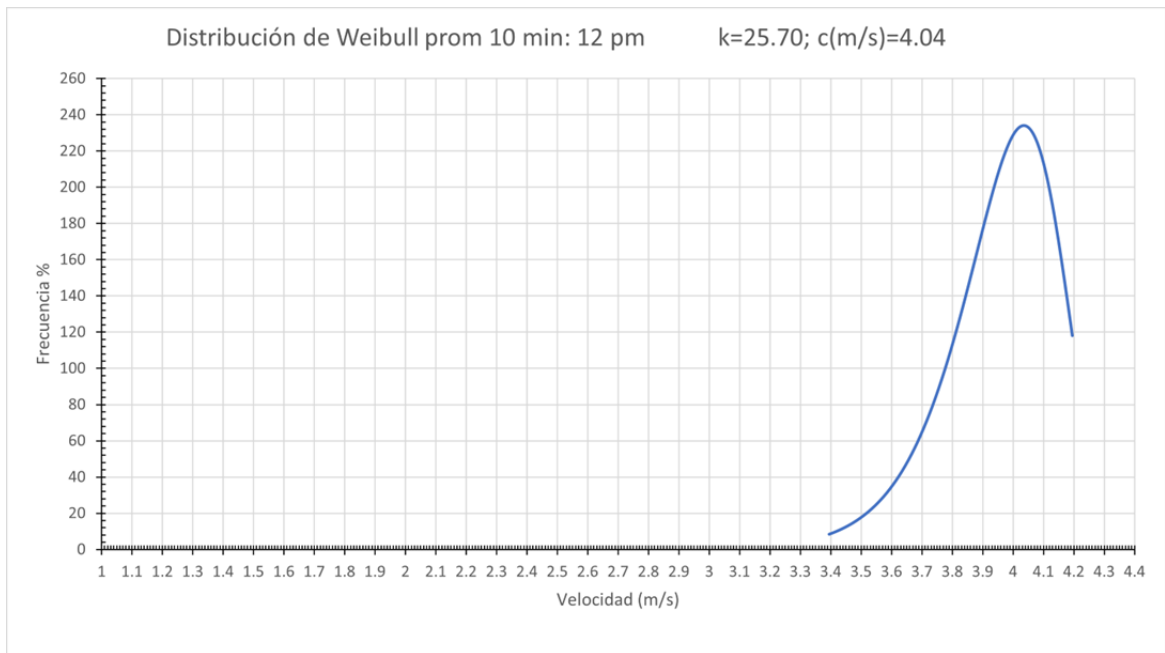


Figura n.º 3.10 Distribución de Weibull promedio cada 10 min: 12 a.m. global del viento inducido ($k= 25.70$.; $c= 4.04$ m/s), Fuente: Propia.

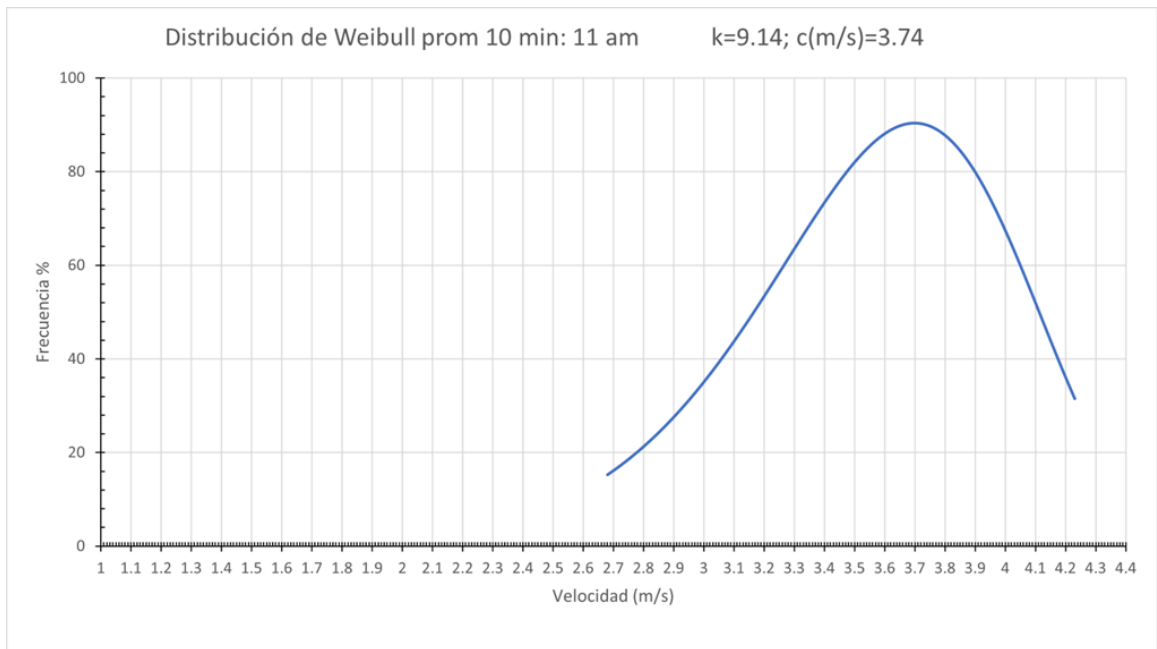


Figura n.º 3.11 Distribución de Weibull promedio cada 10 min: 8 a.m. global del viento inducido ($k= 9.14.$; $c= 3.74$ m/s), Fuente: Propia.

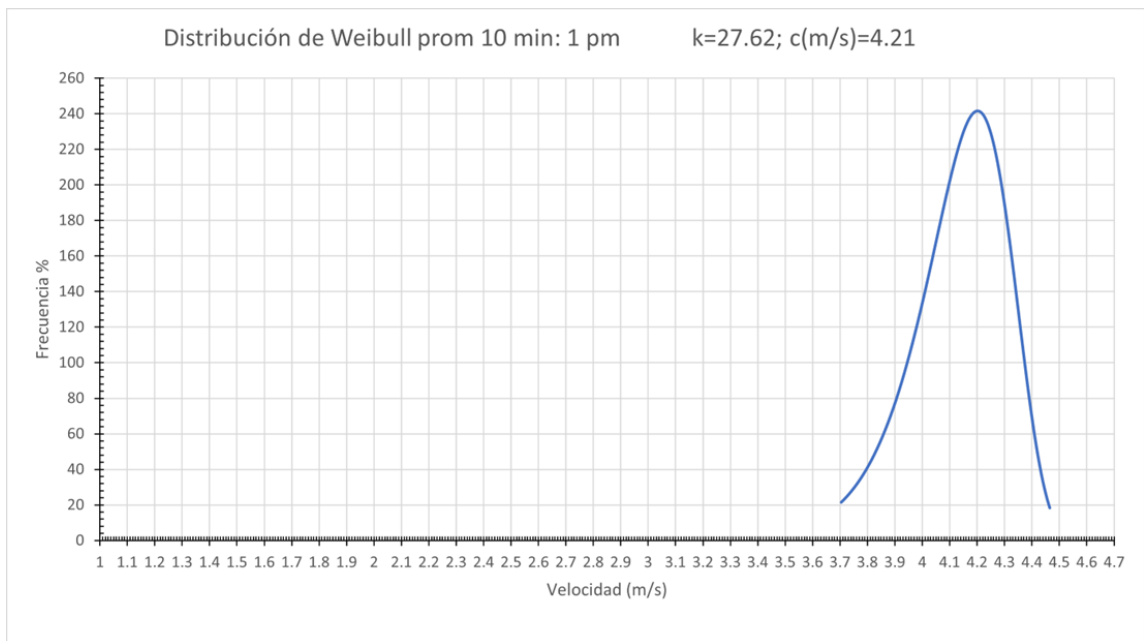


Figura n.º 3.12 Distribución de Weibull promedio cada 10 min: 8 a.m. global del viento inducido ($k= 27.62.$; $c= 4.21$ m/s), Fuente: Propia.

3.5 Rosa de los vientos

La Figura n.º 3.4 muestra la dirección de viento de mayor frecuencia, la dirección de mayor frecuencia son el norte y este, que coinciden con la dirección del tramo de la carretera analizado.



Figura n.º 3.13 Rosa de los vientos, frecuencia de vientos predominante en 16 días, Fuente: Propia.

La Figura n.º 3.12 muestra Las direcciones dominantes del viento son NE, SE y NO. La velocidad promedio del viento en estas direcciones es entre 3.5 y 4 m/s. Desde el Sur, el viento es prácticamente nulo. La rosa permite saber de dónde sopla más el viento y con qué intensidad promedio.

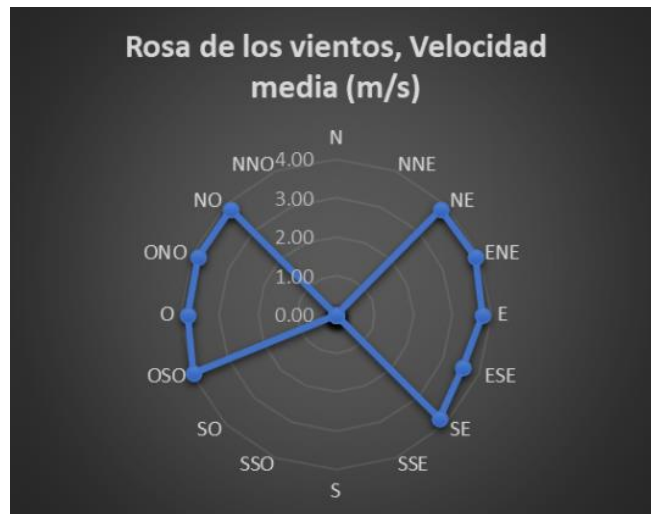


Figura n.º 3.14 Rosa de los vientos, velocidad promedio de 16 días, Fuente: Propia.

La figura 3.14 muestra Las direcciones y densidad de potencia ($\frac{W}{m^2}$)

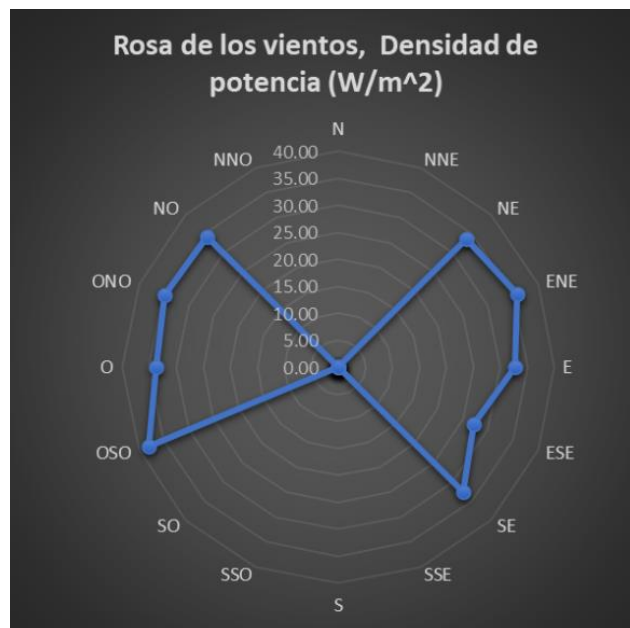


Figura n.º 3.15 Rosa de los vientos, densidad de potencia de 16 días, Fuente: Propia.

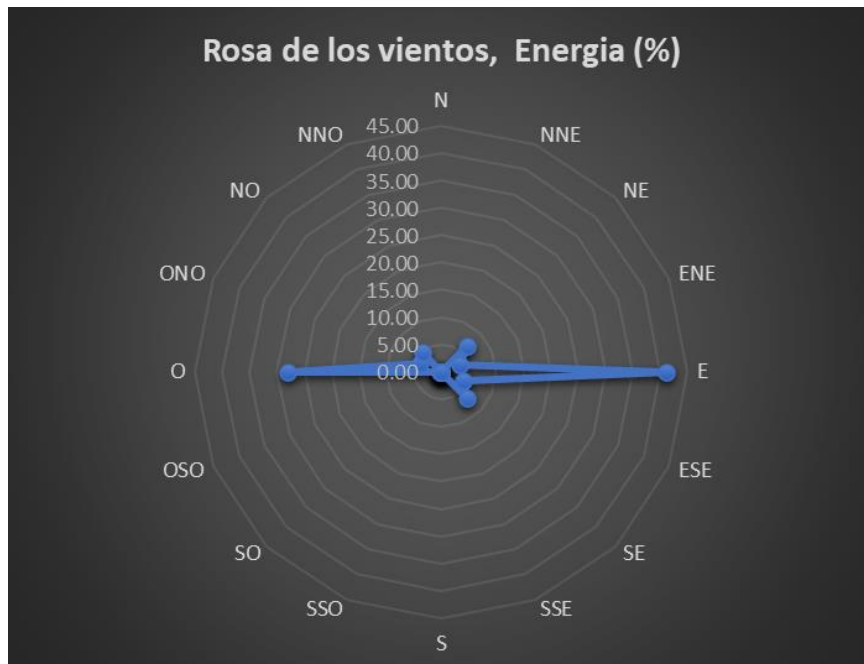


Figura n.º 3.16 Rosa de los vientos, porcentaje de energía en 16 días, Fuente: Propia.

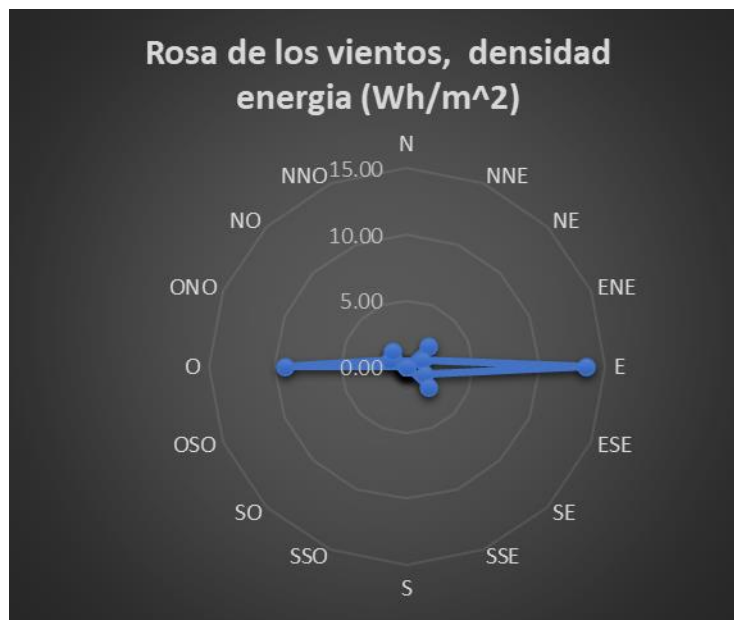


Figura n.º 3.17 Rosa de los vientos, densidad de energía en 16 días, Fuente: Propia.

3.6 Condiciones ambientales durante la campaña de medición de velocidad.

Durante el período en que se realizaron las mediciones de velocidad vehicular en la carretera CA-2 hacia Zacatecoluca (20, 21, 26, 27, 29, 30, 31 de agosto y 1, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 12, 16 de septiembre de 2025), las condiciones ambientales estuvieron influenciadas por la fase climática típica de la temporada de lluvias de mayo a octubre.

La carretera CA-2 en el tramo hacia Zacatecoluca se sitúa en el valle del Río Lempa, con una altitud aproximada de 160–210 metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.) en la zona donde se desarrolló la campaña de medición. Esta elevación corresponde a la depresión central de El Salvador, caracterizada por terrenos relativamente planos y bajas elevaciones comparadas con las regiones montañosas del país.



Figura n.º 3.18 Condiciones aproximadas durante la campaña de medición, Fuente: sitesatlas.

En un principio utilizando el instrumento de medición anemómetro se obtuvieron mediciones cada 10 segundos para luego suavizar los datos con la ayuda de herramientas de hojas de cálculo para poder hacer promedios de velocidad de vientos y dirección como en la imagen de la tabla siguiente.

Tabla 3.1 Datos registrados en campaña de medición en los primeros 3 minutos de medición para los primeros días de campaña de medición. Fuente propia.

Time	20/8/2025	DIRECCIÓN	21/8/2025	DIRECCIÓN	26/8/2025	DIRECCIÓN	27/8/2025	DIRECCIÓN
05:00:00	3.6	E	3.8	O	3.8	O	3.8	E
05:00:10	3.2	NE	2.9	E	3.5	O	3.3	E
05:00:20	3.7	E	3.5	E	3.4	O	3.4	NE
05:00:30	3.8	ESE	4.1	O	3.7	O	4.1	E
05:00:40	3.3	SE	3.3	ENE	3.5	ONO	3.1	SE
05:00:50	3.6	E	3.6	O	3.5	O	3.9	E
05:01:00	3.7	O	4	ESE	4	O	3.5	E
05:01:10	5.2	ENE	5.4	E	4.9	NO	5.2	O
05:01:20	4	E	4.1	SE	3.7	O	4.3	O
05:01:30	3.7	ESE	4	O	3.6	ONO	3.9	O
05:01:40	3.4	O	3.1	O	3.3	ONO	3.5	O
05:01:50	3.5	O	3.8	SE	3.2	O	3.8	O
05:02:00	4	O	3.8	NE	3.8	O	3.8	ESE
05:02:10	3.1	ONO	2.8	O	3.4	NO	3.1	ESE
05:02:20	3.8	ESE	4.1	E	3.5	O	3.7	O
05:02:30	2	ESE	1.7	O	2	O	2.1	ESE
05:02:40	4.3	SE	4.1	O	4.5	NO	4.3	SE
05:02:50	3.4	E	3.7	ENE	3.7	O	3.3	E
05:03:00	3.8	SE	3.7	O	3.5	NO	3.7	O

Las condiciones térmicas en la región tropical se caracterizan por altas temperaturas diurnas y nocturnas, con valores que durante agosto y septiembre oscilan alrededor de 27 °C a 33 °C durante el día, con mínimas nocturnas alrededor de 22 °C a 25 °C, propias de zonas bajas y costeras del país.

El periodo analizado coincide con la época máxima de precipitaciones, por lo que la presencia de lluvia fue frecuente y significativa. Agosto registra una elevada incidencia de días con lluvia, con un acumulado mensual que puede estar por encima del promedio histórico con precipitaciones intensas especialmente durante la tardes y noches.

En septiembre, el clima continúa húmedo y lluvioso, siendo considerado el mes con mayor cantidad de días lluviosos en el año. La intensidad y frecuencia de las precipitaciones favorecen una alta humedad relativa, lo que genera una atmósfera cálida y húmeda durante la mayor parte del día.

Desde el punto de vista meteorológico, los sistemas de lluvia tropical, tales como la Zona de convergencia Intertropical en su fase activa, así como ondas tropicales del Pacífico y del Atlántico, suelen ser los principales generadores de lluvias, con chubascos y tormentas eléctricas aisladas que pueden ocurrir especialmente en las tardes.

Durante las jornadas de medición. Estas condiciones climáticas habrían influido en la visibilidad, la respuesta térmica del pavimento y el comportamiento de vehículos y usuarios, aspectos relevantes a considerar en la interpretación de los resultados de velocidad vehicular. Las altas temperaturas y la humedad constante también pueden haber afectado la comodidad térmica del personal técnico y la operación de equipos de medición en campo.

En resumen, las fechas de campaña coincidieron con condiciones típicas de la estación lluviosa, con:

- ✓ Temperaturas cálidas (diurnas y nocturnas) persistentes, propias de clima tropical.
- ✓ Elevada frecuencia de días con lluvia y altos niveles de humedad, especialmente en septiembre.
- ✓ Predominio de nubes y posibles precipitaciones locales o tormentas breves, asociadas a sistemas meteorológicos tropicales activos en la región.

Time	20/8/2025	21/8/2025	26/8/2025	27/8/2025	29/8/2025	30/8/2025	31/8/2025	1/9/2025	3/9/2025	4/9/2025	6/9/2025	7/9/2025	8/9/2025	10/9/2025	12/9/2025	16/9/2025
05:09:50	3.79	3.80	3.75	3.80	3.74	3.79	3.80	3.78	3.80	3.80	3.79	3.78	3.81	3.77	3.79	3.80
05:19:50	3.85	3.83	3.83	3.83	3.89	3.87	3.83	3.81	3.83	3.87	3.81	3.81	3.84	3.87	3.86	3.85
05:29:50	3.80	3.81	3.78	3.81	3.78	3.83	3.81	3.87	3.81	3.82	3.79	3.82	3.78	3.82	3.82	3.83
05:39:50	4.13	4.13	4.09	4.11	4.15	4.14	4.16	4.14	4.11	4.14	4.11	4.13	4.14	4.12	4.16	4.17
05:49:50	3.71	3.68	3.74	3.69	3.69	3.73	3.69	3.70	3.69	3.67	3.69	3.69	3.71	3.71	3.72	3.69
05:59:50	3.73	3.70	3.74	3.78	3.77	3.80	3.74	3.76	3.71	3.77	3.77	3.71	3.71	3.74	3.73	3.74
06:09:50	2.10	3.69	3.71	3.78	3.71	3.85	3.74	3.76	3.82	3.76	3.77	3.79	3.78	3.77	3.82	3.73
06:19:50	2.43	3.82	3.88	3.87	3.82	3.89	3.84	3.82	3.91	3.90	3.90	3.86	3.85	3.83	3.82	3.83
06:29:50	1.85	3.76	3.74	3.84	3.75	3.79	3.76	3.77	3.85	3.73	3.85	3.81	3.82	3.81	3.81	3.81
06:39:50	1.75	4.13	4.12	4.10	4.14	4.12	4.16	4.10	4.13	4.11	4.09	4.10	4.14	4.17	4.13	4.15
06:49:50	2.06	3.70	3.68	3.58	3.67	3.81	3.68	3.67	3.67	3.67	3.76	3.74	3.71	3.68	3.72	3.71
06:59:50	3.05	3.47	3.51	3.51	3.52	3.50	3.53	3.45	3.58	3.52	3.46	3.51	3.55	3.51	3.47	3.51
07:09:50	3.70	3.95	3.98	3.95	3.95	3.93	3.93	3.96	3.98	3.98	3.95	3.94	3.90	3.93	3.94	3.95
07:19:50	3.40	3.65	3.62	3.62	3.62	3.63	3.64	3.66	3.67	3.64	3.68	3.65	3.67	3.65	3.64	3.63
07:29:50	3.59	3.85	3.84	3.84	3.84	3.81	3.86	3.85	3.82	3.83	3.79	3.84	3.86	3.83	3.86	3.90
07:39:50	3.90	4.08	4.17	4.11	4.15	4.19	4.14	4.13	4.12	4.16	4.19	4.18	4.09	4.14	4.15	4.12
07:49:50	3.87	4.11	4.14	4.10	4.15	4.12	4.13	4.14	4.12	4.15	4.15	4.13	4.13	4.16	4.13	4.12
07:59:50	3.85	4.06	4.12	4.14	4.13	4.09	4.13	4.12	4.08	4.09	4.07	4.09	4.11	4.09	4.09	4.10
08:09:50	3.79	3.81	3.78	3.79	3.81	3.81	3.76	3.78	3.77	3.74	3.77	3.78	3.80	3.83	3.76	3.79
08:19:50	3.85	3.85	3.81	3.89	3.86	3.86	3.86	3.87	3.89	3.89	3.87	3.86	3.85	3.91	3.84	3.87
08:29:50	3.80	3.75	3.77	3.79	3.75	3.78	3.83	3.81	3.83	3.80	3.78	3.79	3.82	3.81	3.81	3.82
08:39:50	4.13	4.13	4.14	4.10	4.11	4.10	4.10	4.10	4.14	4.16	4.07	4.13	4.15	4.10	4.14	4.13
08:49:50	3.71	3.70	3.70	3.76	3.68	3.70	3.67	3.70	3.71	3.72	3.71	3.71	3.72	3.74	3.71	3.74
08:59:50	3.73	3.74	3.74	3.69	3.71	3.74	3.69	3.73	3.71	3.75	3.71	3.75	3.78	3.76	3.72	3.72
09:09:50	3.77	3.81	3.76	3.75	3.75	3.74	3.80	3.83	3.83	3.85	3.79	3.72	3.79	3.68	3.71	3.82
09:19:50	3.85	3.87	3.96	3.92	3.83	3.85	3.89	3.84	3.86	3.92	3.86	3.84	3.84	3.82	3.88	3.88
09:29:50	3.80	3.80	3.80	3.78	3.82	3.76	3.84	3.80	3.78	3.85	3.83	3.74	3.80	3.80	3.79	3.84
09:39:50	4.13	4.12	4.10	4.16	4.04	4.05	4.09	4.13	4.15	4.14	4.15	4.14	4.15	4.13	4.13	4.20
09:49:50	3.71	3.69	3.72	3.72	3.67	3.67	3.69	3.67	3.77	3.72	3.65	3.71	3.65	3.71	3.74	3.65
09:59:50	3.73	3.74	3.71	3.71	3.69	3.69	3.75	3.68	3.79	3.70	3.71	3.58	3.73	3.70	3.71	3.79
10:09:50	3.77	3.76	3.78	3.73	3.72	3.74	3.72	3.85	3.75	3.83	3.82	3.79	3.74	3.72	3.77	3.83
10:19:50	3.85	3.76	3.88	3.88	3.88	3.84	3.90	3.88	3.85	3.88	3.85	3.83	3.89	3.91	3.84	3.82
10:29:50	3.80	3.85	3.79	3.74	3.82	3.75	3.78	3.90	3.82	3.85	3.85	3.78	3.87	3.77	3.85	3.78
10:39:50	4.13	4.10	4.19	4.10	4.06	4.13	4.09	4.22	4.13	4.04	4.10	4.14	4.10	4.16	4.04	4.14
10:49:50	3.71	3.74	3.72	3.76	3.68	3.73	3.72	3.81	3.67	3.72	3.68	3.69	3.73	3.74	3.73	3.74
10:59:50	3.52	3.54	3.54	3.56	3.50	3.52	3.53	3.53	3.53	3.53	3.50	3.47	3.47	3.54	3.43	3.46

Tabla 3.2 Parte de la tabla que contiene la base de datos de las mediciones promedio que se utilizó para la investigación. Fuente: Propia.

3.7 Estaciones meteorológicas.

Existen estaciones meteorológicas operativas cerca de Zacatecoluca y de la carretera CA-2 en El Salvador:

Estación meteorológica “Agua Santa” – Zacatecoluca, La Paz (Red ICC).

Esta estación forma parte de la red de estaciones meteorológicas automáticas administradas por el instituto privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC) junto con otras en El Salvador y en la vertiente Pacífico de Centroamérica.

Ubicación: Municipio de Zacatecoluca, departamento de La Paz (muy cercana al área de la Campaña de medición en la CA-2).

- ✓ Variables registradas:
- ✓ Temperatura del aire
- ✓ Humedad relativa
- ✓ Precipitación acumulada
- ✓ Radiación solar
- ✓ Velocidad y dirección del viento

Frecuencia de medición: Registra y transmite datos automáticamente cada 15 minutos, lo que permite análisis detallados de condiciones instantáneas y tendencias climáticas durante campañas en campo.

Esta estación es particularmente útil para tu estudio porque monitorea directamente variables que pueden influir en la conducción y en las mediciones de velocidad (como lluvia, viento y visibilidad), y porque está suficientemente cercana al tramo CA-2 hacia Zacatecoluca

En un esfuerzo cooperativo entre la Compañía Azucarera Salvadoreña (Grupo CASSA) y el Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC), la Red de Estaciones Meteorológicas ICC ya cuenta con seis estaciones en El Salvador.



Figura n.º.3.19 Ejemplo de estación meteorológica del Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC), la ya cuenta con seis estaciones en El Salvador. Fuente: icc.org.gt

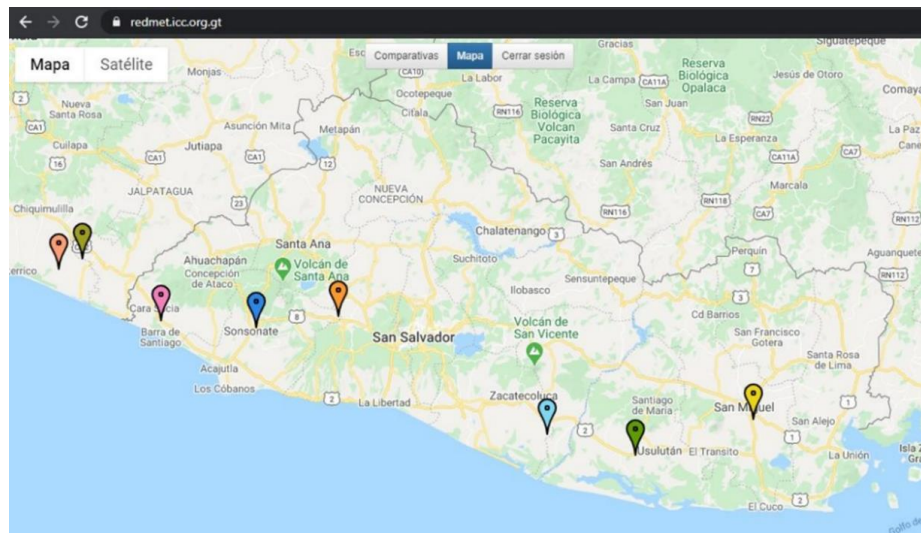


Figura n.º 3.20 Las estaciones meteorológicas de Grupo CASSA, en El Salvador son parte de la Red de Estaciones Meteorológicas y Sistema de Información Meteorológico -REDMET- administrada por el ICC. Fuente: icc.org.gt

3.8 Software de apoyo para la estimación del potencial eólico

La estimación preliminar del potencial energético de una región requiere no solo mediciones en campo, sino también el uso de herramientas digitales que permitan contextualizar, visualizar y validar la información obtenida. En esta investigación se emplearon dos recursos tecnológicos clave: Wind Navigator y Google Maps. Ambos programas permiten realizar análisis complementarios que fortalecen la selección de zonas con potencial eólico y la planificación adecuada del estudio de campo.

3.8.1 Uso de Google Maps como herramienta de apoyo logístico y geoespacial

Aunque Google Maps no es un software especializado en energía eólica, constituye una herramienta práctica, gratuita y eficiente para complementar cualquier estudio de campo. Su función en esta investigación fue vital para apoyar tareas de planificación, selección preliminar de sitios y análisis geográfico básico.

Aplicaciones principales dentro del estudio

a) Localización precisa de los puntos de medición

Google Maps facilitó:

- ✓ Identificar accesos a las carreteras a evaluar.
- ✓ Verificar la seguridad de los puntos propuestos.
- ✓ Confirmar disponibilidad de espacio seguro para instalar el trípode y los instrumentos.

b) Evaluación del entorno geográfico

- ✓ La vista satelital permitió analizar:
- ✓ Topografía básica del sitio.
- ✓ Presencia de obstáculos como árboles, edificios o taludes, que pueden alterar patrones de viento.
- ✓ Proximidad de cada punto a zonas urbanas o rurales.

Esto es esencial para identificar interferencias o canalización natural del viento

c) Medición de distancias y rutas

Google Maps permitió calcular distancias entre puntos de medición, optimizar rutas de acceso y estimar tiempos de desplazamiento.

Esto influye directamente en la logística diaria del estudio y en la estimación del costo de transporte.

d) Herramienta de documentación

Los puntos de medición fueron marcados con “pins” o marcadores, integrados posteriormente en el resumen del trabajo de campo.

3.8.2 Wind Navigator como herramienta para el análisis preliminar del recurso eólico

Wind Navigator es una plataforma digital especializada que ofrece información geoespacial sobre el recurso eólico a nivel global. Esta herramienta es ampliamente utilizada por analistas energéticos, ingenieros y desarrolladores de proyectos para obtener una primera estimación del potencial eólico de un área antes de realizar campañas de medición en sitio.

Bondades y funcionalidades más relevantes

Wind Navigator presenta diversas ventajas para estudios de prefactibilidad, entre las que destacan:

a) Visualización de mapas de velocidad del viento

Permite consultar mapas de viento con valores promedio anuales a diferentes alturas de referencia (generalmente 30 m, 50 m y 100 m).

Esta visualización facilita identificar regiones donde la intensidad del viento es significativamente mayor.

b) Acceso a datos históricos y climatológicos

El software ofrece información basada en modelos meteorológicos y bases de datos satelitales, permitiendo conocer patrones del viento a lo largo del año. Esto es útil para comparar temporalidad, estacionalidad y variabilidad del recurso.

c) Estimaciones de energía potencial

Wind Navigator puede calcular el wind power density (W/m^2) y el energy yield esperado para distintos tipos de turbinas, lo cual permite obtener una primera impresión del potencial energético de una zona.

d) Identificación de zonas favorables

Al superponer capas de relieve, uso del suelo y características del terreno, el usuario puede descartar zonas no aptas (bosques, cuerpos de agua, áreas protegidas, pendientes muy pronunciadas).

e) Interfaz simple e intuitiva

La plataforma presenta mapas interactivos que facilitan el análisis, incluso para usuarios sin experiencia avanzada en SIG.

Procedimiento básico de uso en la investigación

Para los fines de este estudio, Wind Navigator se utilizó de la siguiente manera:

1. Selección del país y región de interés:

Se ubicó El Salvador y sus principales carreteras para identificar áreas con velocidades de viento superiores a 4–5 m/s, consideradas aceptables para microgeneración o estudios de prefactibilidad.

2. Consulta de velocidades promedio a alturas estándar:

Se debe de introducir la altura sobre el nivel del mar del sitio sometido al análisis.

3. Comparación entre corredores viales:

Se debe de analizar las carreteras de mayor interés en el estudio para observar diferencias en velocidad del viento, dirección predominante y densidad de potencia.

4. Preselección de zonas candidatas:

Los tramos con mejores condiciones se marcarán como “prioritarios”, lo que permite optimizar recursos durante la fase de mediciones en campo.

5. Validación del sitio seleccionado:

Una vez escogida la carretera para la campaña de mediciones, se utilizó Wind

Navigator para confirmar coherencia entre los mapas globales y los primeros datos obtenidos en campo.

Para el sitio de estudio con una ubicación geográfica de latitud y longitud de 13.498, -88.866 respectivamente y una elevación sobre el nivel del mar de 165 para la carretera CA-2 Figura n.º3.21.

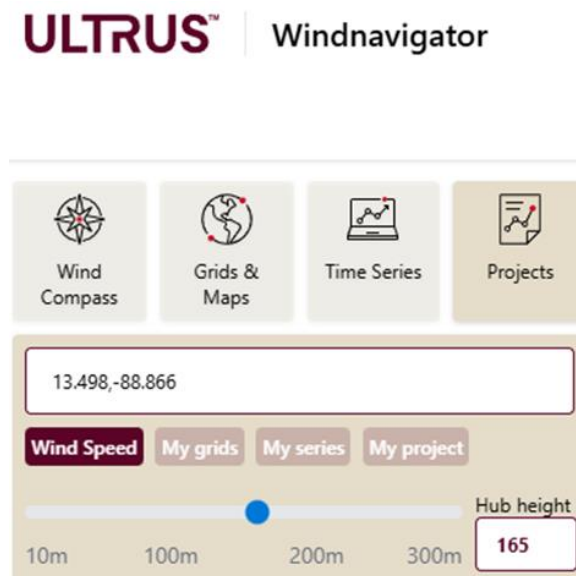


Figura n.º 3.21 Ajuste de coordenadas y las condiciones de la zona de carretera CA-2, Fuente: Wind Navigator.

Mediante el uso de la herramienta web Wind Navigator es posible obtener información relevante sobre las velocidades del viento, lo que permite contar con un panorama preliminar de los valores que podrían registrarse durante la campaña de medición.

A partir del análisis realizado con Wind Navigator, se observa que las velocidades de viento estimadas en la zona de estudio se sitúan tentativamente en un rango de entre 3 y 5 m/s, tal como se muestra en la figura

correspondiente. En este trabajo, se dispone además de una tabla comparativa que presenta las velocidades de viento medidas durante la campaña experimental, las cuales pueden contrastarse con los valores estimados para la región.

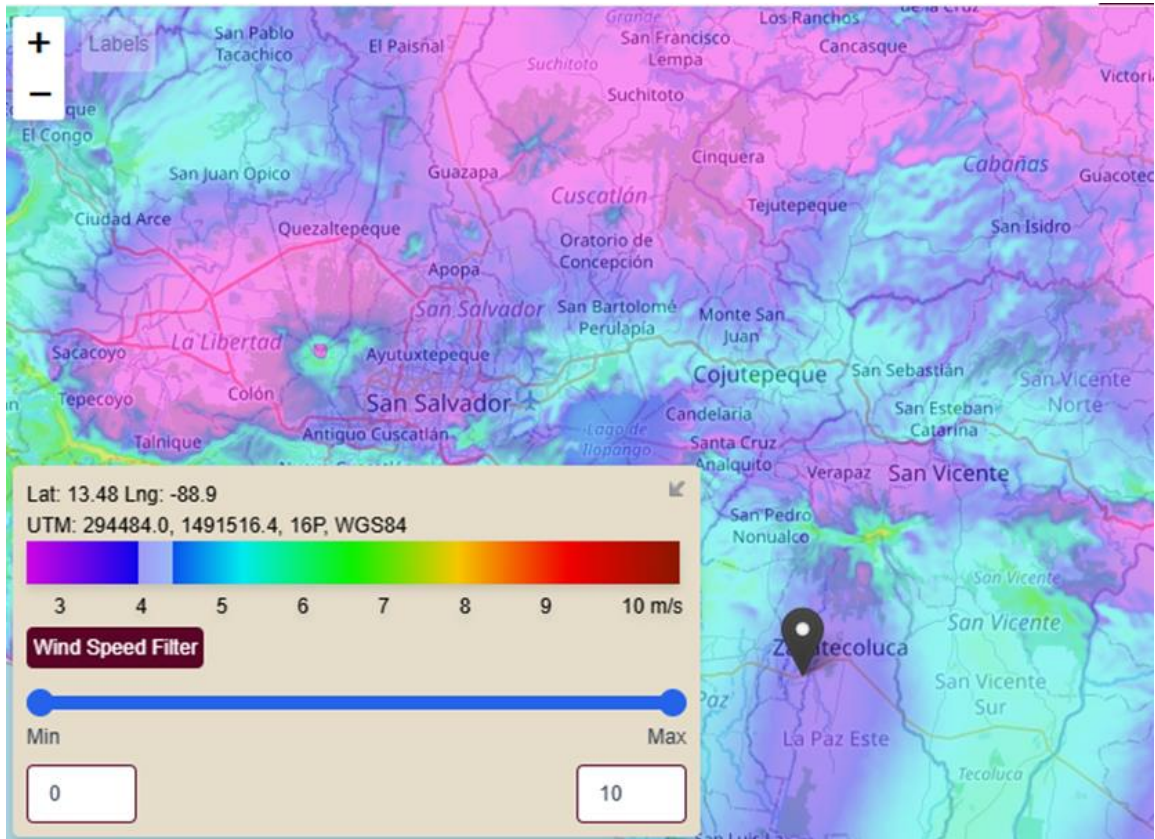


Figura n.º 3.22 Velocidad de viento esperado en tramo de carretera CA-2, Fuente: Wind Navigator.

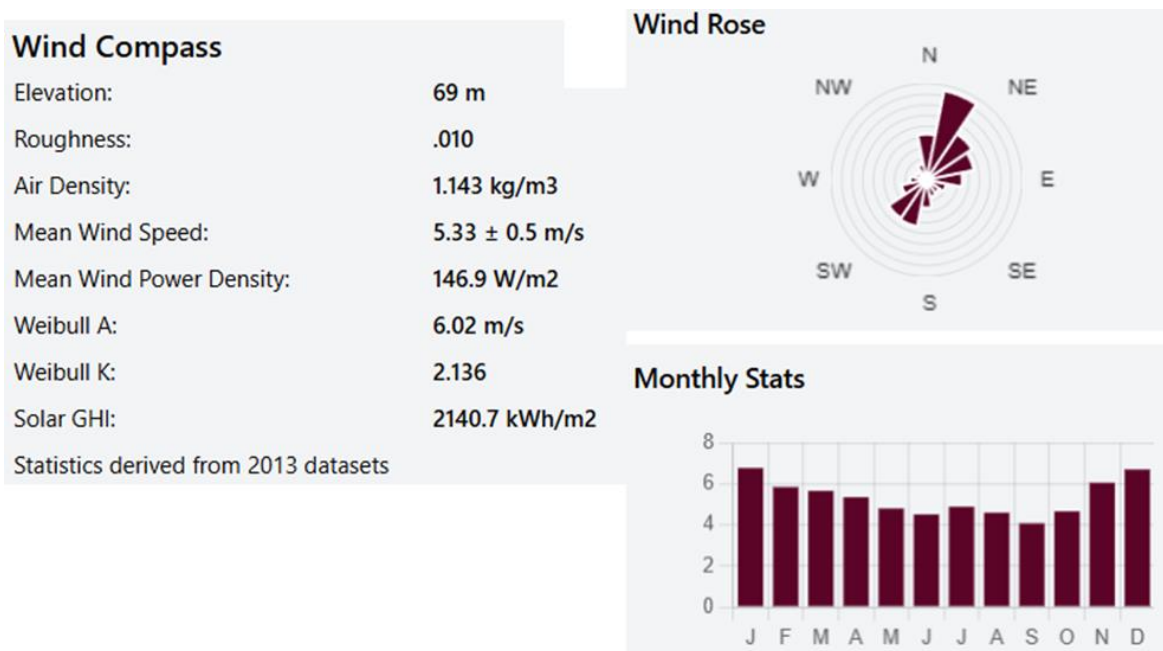


Figura n.º 3.23 Datos que pueden ser obtenidos a partir de Software en línea, Fuente: Wind Navigator.

Cabe destacar que el software únicamente representa las velocidades de viento asociadas a la brisa natural, y no contempla aquellas generadas durante la campaña de medición como consecuencia del tránsito vehicular, que constituyen una fuente adicional de perturbación del flujo de aire.

Tabla 3.3 Comparativa de los datos que podríamos encontrar tomando como punto de partida el Software Wind Navigator y la que se obtuvo con el anemómetro., Fuente: Propia.

Tabla comparativa de velocidades promedio obtenidas a partir de dos herramientas en CA-2.	
Velocidad de viento en Wind Navigator	Velocidad Campaña de medición con anemómetro
3-5 m/s	A las 9:9:50 a.m. – 3.77 m/s

CAPITULO 4:

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El presente capítulo expone de forma detallada los resultados obtenidos a partir del estudio experimental del viento inducido por el tráfico vehicular en la carretera seleccionada, así como la estimación del potencial energético aprovechable mediante un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius. Se analizan las características físicas del recurso eólico, su comportamiento estadístico, la producción energética estimada y la viabilidad técnica y económica de su aprovechamiento.

La información presentada en este capítulo constituye el núcleo del estudio de prefactibilidad, ya que permite contrastar las hipótesis planteadas al inicio de la investigación con los resultados reales obtenidos en campo. Asimismo, los resultados sirven de base para establecer conclusiones técnicas sobre la factibilidad del uso del viento inducido por el tráfico vehicular como fuente alternativa de microgeneración eléctrica en la infraestructura vial de El Salvador.

El análisis se fundamenta en los datos recopilados durante una campaña de medición de 16 días en un horario de 5 am a 5 pm, con registros a una frecuencia de 1 Hz y promedios cada 10 minutos, asegurando una adecuada representación estadística del comportamiento del viento. Posteriormente, estos datos fueron procesados mediante herramientas estadísticas y correlacionados con la curva de potencia del aerogenerador seleccionado, permitiendo así la estimación de la producción energética real y su análisis crítico.

4.1 Selección del aerogenerador.

Se analizará el rendimiento de 4 aerogeneradores que cumplan con los requisitos de tamaño, diámetro de las aspas debe ser menor a 1 metro.

Tabla 4.1 Datos de aerogeneradores con sus especificaciones, Fuente: Propia.

Aerogenerador modelo	marca	Lugar venta	Potencia nominal (w)	Voltaje	precio USD
GEN0301-FX-12V	Egenwaywind	Amazon	800	48v	700
Windmill generator	KEARIXM	Amazon	600	12v	500
BODYJRW9VD	Zalydala	Amazon	100	12v	185
400W Wind Turbine	LIWBYYG	Amazon	400	12v	130

Tabla 4.2 Velocidades de operación para 4 aerogeneradores, Fuente: Propia.

Aerogenerador modelo	marca	Velocidad inicial viento (m/s)	Velocidad de corte viento (m/s)	Velocidad nominal viento (m/s)	Velocidad maxima viento (m/s)
GEN0301-FX-12V	Egenwaywind	1.3	2.5	13	40
Windmill generator	KEARIXM	1.2	2	13	45
BODYJRW9VD	Zalydala	1.2	2.5	13	35
400W Wind Turbine	LIWBYYG	1.3	2.5	11	40

Tabla 4.3 Dimensiones de diseño para los cuatro aerogeneradores en estudio. , Fuente: Propia.

Aerogenerador modelo	marca	Dimesiones (m)		Masa (Kg)	Controlador MPPT
		Altura	Diametro		
GEN0301-FX-12V	Egenwaywind	0.988	0.618	23	si
Windmill generator	KEARIXM	0.6	0.9	14.5	no
BODYJRW9VD	Zalydala	0.75	0.53	10	no
400W Wind Turbine	LIWBYYG	0.8	0.6	10	no

Producción de energía

Tabla 4.4 Producción de energía resultante por cada aerogenerador, Fuente: Propia.

Aerogenerador modelo	Energía producida en 192 horas (kWh)	Energía esperada producida (kWh/año)	Estimación energía vendida \$0.19/kWh (USD/año)	Controlador MPPT	Coef. De potencia C_p % (prom)	Energía vendida año/precio aerogenerador ((USD/año) /USD)
GENO301-FX-12V	19.50	444.73	84.50	Si	10.48	0.12
Windmill generator	18.61	424.51	80.66	No	4.72	0.16
BODYJRW9VD	2.33	53.26	10.12	No	1.70	0.05
400W Wind Turbine	7.02	160.12	30.42	No	3.96	0.23

La mejor opción de estos 4 aerogeneradores es el Egenwaywind con un C_p : 10.48% cercano al límite de eficiencia para los aerogeneradores tipo Savonius, puede funcionar a 48v para disminuir las pérdidas de energía, y con controlador MPPT para mayor eficiencia.

Dimensiones Egenwaywind

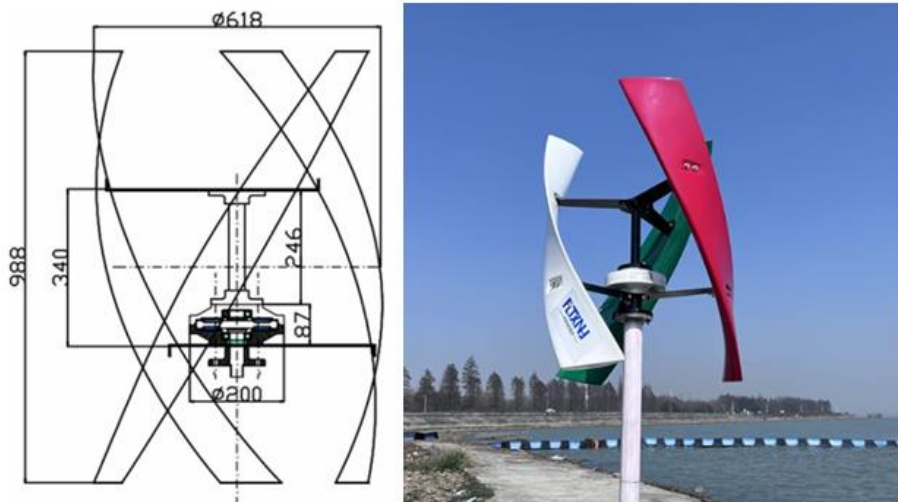


Figura n.º 4.1 Esquema de aerogenerador con mejores características, Fuente: Propia.

Curva potencia-velocidad Egenwaywind



Figura n.º 4.2 Curva de Potencia-Velocidad de Egenwaywind, Fuente: Propia.

Tabla 4.5 Aplicación de datos obtenidos al Aerogenerador Savonius 800 W, Fuente: Propia.

Aerogenerador Savonius 800w			
Egenwaywind GEN0301-FX-12V		Diametro Rotor(m)	0.618
PRECIO DE REFERENCIA:		700 USD	
DENSIDAD DEL AIRE ρ en kg/m ³		1.2	
TOTAL DE HORAS OPERANDO AL AÑO:		192	
Velocidad del Viento (m/s)	% Horas de viento	Curva de potencia P (kW)	Coef. De potencia Cp %
3.54	5.00	0.0879999	11.02
3.76	7.00	0.1005713	10.51
3.77	41.00	0.1011428	10.49
3.8	35.00	0.1028570	10.42
3.82	4.74	0.1039999	10.37
3.84	4.26	0.1051428	10.32
3.88	3.00	0.1074285	10.22
100.00			10.48

Los vientos que predominan son del este y oeste.

Tabla 4.6 Datos obtenidos a partir de la frecuencia de orientación de la velocidad del viento en las mediciones, Fuente: Propia.

Orientacion	Frecuencia	Rango grados	Frecuencia (%)	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia (W/m ²)	Densidad de energia (Wh/m ²)	Energia (%)
N	0	348.75 > N <= 11.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NNE	0	11.25 > N <= 33.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NE	4581	33.75 > N <= 56.25	7	3.80	33.67	2.23	6.76
ENE	2307	56.25 > N <= 78.75	3	3.88	35.75	1.19	3.61
E	28566	78.75 > N <= 101.25	41	3.77	32.79	13.55	41.04
ESE	3726	101.25 > N <= 123.75	5	3.54	27.25	1.47	4.45
SE	4693	123.75 > N <= 146.25	7	3.76	32.60	2.21	6.70
SSE	0	146.25 > N <= 168.75	0	0.00	0.00	0.00	0.00
S	0	168.75 > N <= 191.25	0	0.00	0.00	0.00	0.00
SSO	0	191.25 > N <= 213.75	0	0.00	0.00	0.00	0.00
SO	0	213.75 > N <= 236.25	0	0.00	0.00	0.00	0.00
OSO	109	236.25 > N <= 258.75	0	3.96	38.08	0.06	0.18
O	19066	258.75 > N <= 281.25	28	3.80	33.63	9.28	28.09
ONO	2794	281.25 > N <= 303.75	4	3.84	34.77	1.41	4.26
NO	3274	303.75 > N <= 326.25	4.74	3.82	34.26	1.62	4.91
NNO	0	326.25 > N <= 348.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	69116		100.00			33.025	100.00

Tabla 4.7 Producción de energía en kWh, Fuente: Propia

Velocidad del Viento (m/s)	Horas de viento	Curva de potencia P (kW)	produccion(Kwh)
3.54	9.60	0.08800	0.845
3.76	13.44	0.10057	1.352
3.77	78.72	0.10114	7.962
3.8	67.70	0.10286	6.963
3.82	9.10	0.10400	0.946
3.84	7.68	0.10514	0.807
3.88	5.76	0.10743	0.619
Total	192.00		19.495

Beneficio costo

El aerogenerador Egenwaywind puede producir 444.76 *Kwh* al año de 5am hasta las 5pm que es el horario de mayor flujo vehicular.

Expectativa de venta de energia

Para *USD 0.19 el kwh* obtenemos

USD 84.50 al año por cada aerogenerador Egenwaywind

Estimación de tiempo recuperación de capital

$$Tiempo = \frac{\text{Precio Egenwaywind} + \text{precio envio} + \text{instalacion} + \text{IVA}}{\text{Venta de energia producida}}$$

$$Tiempo = \frac{700 + 300 + 100 + 91}{84.50}$$

$$Tiempo = 14 \text{ años}$$

4.2 Análisis de la viabilidad del aprovechamiento energético

El análisis de viabilidad del aprovechamiento energético del viento inducido por el tráfico vehicular se fundamenta en tres aspectos principales:

- ✓ El comportamiento y magnitud del recurso eólico disponible
- ✓ La capacidad de conversión energética del aerogenerador seleccionado

- ✓ La rentabilidad energética y económica del sistema bajo las condiciones reales del sitio de estudio.

4.2.1 Comportamiento del recurso eólico inducido

Durante la campaña de medición, realizada en un período continuo de 16 días en horario de 5:00 a.m. a 5:00 p.m., se obtuvieron velocidades de viento predominantemente comprendidas entre 3.5 m/s y 3.9 m/s, con una concentración significativa alrededor de 3.7–3.8 m/s. Este rango de velocidades se encuentra directamente relacionado con el paso constante de vehículos en ambos sentidos de circulación, lo que confirma que el tráfico vehicular genera corrientes de aire aprovechables desde el punto de vista físico.

El ajuste de los datos a una distribución de Weibull con parámetros $k \approx 12.92$ y $c \approx 3.93$ m/s evidenció una baja dispersión de los datos y una alta concentración de los valores cercanos a la velocidad media, lo cual indica que el recurso eólico inducido presenta un comportamiento relativamente estable durante el período de estudio. Esta estabilidad es un aspecto positivo para la generación eólica, ya que reduce las fluctuaciones bruscas de potencia y favorece la operación continua del aerogenerador.

La rosa de los vientos mostró una clara predominancia de direcciones en el eje este–oeste, coincidente con la geometría del tramo de carretera y el sentido dominante del flujo vehicular. Este comportamiento direccional favorece el uso de aerogeneradores de eje vertical, ya que estos no dependen de un sistema de orientación al viento, a diferencia de los aerogeneradores de eje horizontal.

4.2.2 Evaluación energética del aerogenerador seleccionado

Para la evaluación de la producción de energía se seleccionó un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius, modelo Genwaywind GEN0301-FX, considerando su bajo requerimiento de velocidad de arranque, su capacidad de operación con vientos turbulentos y su facilidad de instalación en entornos viales.

De acuerdo con la curva de potencia del aerogenerador, su mayor eficiencia de conversión se presenta en el intervalo de velocidades comprendido entre 2.5 m/s y 7.5 m/s, rango dentro del cual se encuentran las velocidades medidas en el sitio de estudio. Sin embargo, a pesar de operar dentro de su rango funcional, la potencia entregada por el aerogenerador a velocidades cercanas a 3.7 m/s es muy reducida, lo que repercute directamente en una baja producción energética total.

Al correlacionar las horas de ocurrencia de cada intervalo de velocidad con la curva de potencia del equipo, se obtuvo una energía total generada de 19.50 kWh durante los 16 días de medición. Este valor fue extrapolado a un año completo mediante la expresión:

$$E = 444.73 \text{ kwh/año}$$

Este resultado pone de manifiesto que, aun con operación continua durante las horas de mayor tráfico vehicular, la cantidad de energía generada por un solo aerogenerador es extremadamente limitada.

4.3 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en esta investigación confirman que el viento inducido por la circulación vehicular constituye un fenómeno físico real, cuantificable y susceptible de ser analizado mediante técnicas anemométricas convencionales. Sin embargo, el análisis energético demuestra que la magnitud del recurso, en las condiciones actuales del sitio estudiado, es insuficiente para justificar su aprovechamiento como fuente primaria de generación eléctrica.

Las velocidades promedio del viento obtenidas, cercanas a 3.7 m/s, se encuentran dentro del rango mínimo de operación de los aerogeneradores tipo Savonius; no obstante, este tipo de tecnología presenta un coeficiente de potencia (C_p) bajo en comparación con otros tipos de aerogeneradores, lo que limita severamente la conversión de energía cinética en energía eléctrica aprovechable.

La producción anual estimada de 11.61 kWh por aerogenerador pone en evidencia que este sistema no puede competir con otras fuentes de microgeneración renovable, como la energía solar fotovoltaica, la cual presenta mayores rendimientos, menor complejidad de instalación y costos decrecientes en el mercado actual.

No obstante, los resultados no deben interpretarse como una invalidación total del concepto de aprovechamiento del viento inducido por tráfico, sino como una limitación asociada a las condiciones específicas del sitio, al tipo de aerogenerador utilizado y a la escala de implementación. Existen tramos de carretera que podrían presentar un potencial energético superior, especialmente aquellos caracterizados por:

- ✓ Alta densidad de tráfico pesado (camiones y autobuses).

- ✓ Geometría confinada que provoque efecto Venturi.
- ✓ Presencia simultánea de viento natural atmosférico y viento inducido.
- ✓ Pendientes descendentes de gran flujo vehicular.
- ✓ Reducida interferencia de obstáculos laterales.

Desde el punto de vista tecnológico, el uso de aerogeneradores híbridos Savonius–Darrieus, o de diseños optimizados específicamente para flujos inducidos y altamente turbulentos, podría incrementar el rendimiento energético del sistema. Asimismo, la instalación de arreglos de múltiples aerogeneradores en serie o en paralelo permitiría aumentar la potencia total disponible, aunque a costa de mayores inversiones y complejidad estructural.

En términos de aplicación práctica, el viento inducido por tráfico vehicular sólo resulta razonablemente aprovechable para sistemas autónomos de muy baja potencia, tales como:

- ✓ Señalización vial luminosa autónoma.
- ✓ Sensores de monitoreo de tráfico.
- ✓ Estaciones meteorológicas viales.
- ✓ Sistemas híbridos con energía solar.
- ✓ Iluminación LED de emergencia de baja intensidad.

Este estudio aporta evidencia técnica que permite concluir que el aprovechamiento del viento inducido por tráfico en El Salvador se encuentra actualmente en una etapa experimental, pero con potencial de desarrollo futuro si se combinan mejoras tecnológicas, selección estratégica de sitios y esquemas de aprovechamiento híbrido.

CAPITULO 5:

5 PRESUPUESTO PARA LA INVESTIGACIÓN.

Costos del estudio

5.1 Costos estimados de materiales y equipos

Generalidades del presupuesto

El presente capítulo describe el presupuesto estimado para la ejecución del proyecto de investigación titulado “Estudio de prefactibilidad del potencial eólico en carreteras de El Salvador”, desarrollado como trabajo académico de aplicación en el marco del curso de especialización en energías renovables.

El presupuesto ha sido formulado bajo criterios de austeridad, racionalidad y optimización de recursos, en concordancia con la naturaleza no lucrativa del estudio y con los lineamientos metodológicos establecidos para investigaciones académicas en la Universidad de El Salvador.

El objetivo del presupuesto es idealizar los recursos mínimos necesarios para la realización de las actividades de campo, procesamiento de información y análisis preliminares del recurso eólico, sin que ello represente costos propios de estudio profesionales o comerciales.

Para la realización del estudio fue necesario el uso de instrumentos básicos de medición y materiales complementarios que permitieran obtener datos confiables de velocidades y dirección del viento, así como garantizar condiciones mínimas de seguridad durante el trabajo en carretera.

Tabla 5.1 Costos de herramientas, materiales y equipos de la investigación, Fuente: Propia.

Material/Equipo	Descripción	Costo (USD)
Anemómetro digital	Medición de velocidad del viento	\$55.00
Trípode metálico (1.80 m)	Soporte del anemómetro	\$55.00
Veleta artesanal	Determinación de dirección del viento	\$5.00
Papelería e impresiones	Registros de campo y formularios	\$25.00
Equipo de protección personal (EPP)	Para tres personas	\$90.00
Total, materiales y equipos	-	\$230.00

El uso de estos equipos permitió la obtención de información adecuada para una evaluación preliminar del recurso eólico, acorde con el alcance del estudio.

Alimentación e hidratación

Debido al carácter académico del proyecto y a que las jornadas de campo fueron de duración limitada, no se contemplan viáticos completos. Únicamente se considera un apoyo básico para hidratación y refrigerio, con el fin de mantener condiciones mínimas de seguridad y rendimiento del equipo durante las actividades de medición.

Se estima un costo promedio de \$4.00 por persona por día.

Tabla 5.2 Alimentación e hidratación consumida durante la campaña de mediciones, Fuente: Propia.

Días	Personas	Costo por persona/día	Subtotal
18 días	3 personas	\$4.00	\$216.00

5.4 Costo estimado de horas hombre

La ejecución del estudio fue realizada principalmente por los investigadores, como parte de su proceso formativo, por lo que la mano de obra no se considera remunerada bajo esquemas profesionales, sino que se asigna un valor referencial para efectos de estimación económica del proyecto.

Se adopta una tarifa simbólica de \$10.00 por jornada por persona, comúnmente utilizada en estudios académicos para representar el tiempo invertido en actividades de campo.

Tabla 5.3 Presupuesto de costo de horas hombres durante la campaña de mediciones, Fuente: Propia.

Fase de estudio	Jornadas	Tarifa referencial	Subtotal (USD)
Preselección de carreteras (2 días)	6	\$10.00	\$60.00
Campaña de medición (16 días)	48	\$10.00	\$480.00
Total, mano de obra	54		\$540.00

Esta valoración permite reflejar el esfuerzo humano invertido, sin desvirtuar el enfoque académico y formativo del estudio.

Transporte

Se consideran los costos asociados al uso de vehículo particular para el desplazamiento hacia los puntos de medición, incluyendo combustible y desgaste básico del vehículo.

Tabla 5.4 Costos asociados a el desplazamiento hacia puntos de medición., Fuente: Propia.

Días	Costo por día	Subtotal
18 días	\$20.00	\$360.00

Resumen de costos directos.

Tabla 5.5 Costos directos de la investigación, Fuente: Propia.

Concepto	Monto (USD)
Mano de obra	\$540.00
Transporte	\$360.00
Herramientas y equipos	\$115.00
Equipo de protección personal	\$90.00
Alimentación e hidratación	\$216.00
Papelería e impresiones	\$25.00
Subtotal de costos directos	\$1,346.00

Costos indirectos

En concordancia con el enfoque académico del proyecto, se aplica un 5% del subtotal de costos directos, destinado a cubrir gastos menores de coordinación, comunicación e imprevistos.

Tabla 5.6 Costos indirectos de la investigación., Fuente: Propia.

Concepto	Cálculo	Total
Costos indirectos (5%)	5% x \$1,346.00	\$67.30

Presupuesto total del proyecto

Tabla 5.7 Total general del proyecto, Fuente: Propia.

Concepto	Monto (USD)
Subtotal de costos directos	\$1,346.00
Costos indirectos	\$67.30
Total, general del proyecto	\$1,413.30

El presupuesto total estimado para la ejecución del estudio de prefactibilidad del potencial eólico en carreteras de El Salvador asciende a \$1,413.30.

Este monto permite cubrir adecuadamente las actividades de medición, desplazamiento, uso de equipos especializados, seguridad del personal y recursos administrativos necesarios para el desarrollo del estudio.

5.2 Factores que pueden afectar la viabilidad económica de la realización del proyecto.

Si bien el costo total del estudio se estima en **\$1,413.30**, existen diversos factores que pueden influir en su viabilidad económica y, por ende, en la capacidad de ejecutarlo bajo los recursos previstos. Entre los factores más relevantes se identifican:

a) Variaciones en los costos de transporte

El combustible y peajes pueden experimentar cambios abruptos, afectando directamente el presupuesto. Dado que gran parte del estudio implica desplazamientos diarios, cualquier aumento puede incrementar considerablemente los costos totales.

b) Disponibilidad y costo de los instrumentos de medición

Aunque los equipos utilizados en este estudio tienen costos accesibles, proyectos similares que empleen sensores más robustos (anemómetros ultrasónicos, data loggers, mástiles de 10 m o más) tendrían un costo mucho mayor, impactando la viabilidad del estudio.

c) Condiciones climáticas inesperadas

La presencia de lluvias, tormentas o baja velocidad de viento puede extender los días de medición, lo que incrementaría los costos de mano de obra, transporte y alimentación.

d) Riesgos operativos en carretera

Accidentes, cierres de rutas o necesidad de reubicar puntos de medición podrían retrasar el cronograma y generar costos adicionales en logística.

e) Costos indirectos y administrativos

Gastos asociados a coordinación, comunicaciones, permisos locales o trámites pueden ser mayores a los estimados y afectar el presupuesto final.

f) Imprevistos y contingencias

Como en cualquier trabajo de campo, existen probabilidades de fallos en los instrumentos, necesidad de reemplazar componentes, o adquirir equipo adicional no contemplado.

CONCLUSIONES

Conclusiones generales del estudio

El presente estudio permitió analizar de manera técnica y experimental el potencial de aprovechamiento del viento inducido por el tráfico vehicular como fuente alternativa de generación de energía eléctrica en carreteras de El Salvador. A partir de los resultados obtenidos, se concluye que el viento generado por el desplazamiento continuo de los vehículos es un fenómeno físico real, medible y cuantificable, el cual puede ser caracterizado mediante instrumentación anemométrica convencional y técnicas estadísticas apropiadas.

Las velocidades promedio del viento inducido registradas durante la campaña de medición, cercanas a 3.7 m/s, demostraron que el recurso eólico existe de forma continua durante las horas de mayor flujo vehicular, aunque con una magnitud limitada. El ajuste de los datos a la distribución de Weibull confirmó que dicho recurso presenta un comportamiento relativamente estable dentro del intervalo de velocidades observado, lo cual es favorable desde el punto de vista operacional.

El aerogenerador de eje vertical tipo Savonius seleccionado para la evaluación energética demostró ser tecnológicamente adecuado para operar en ambientes de viento turbulento y multidireccional, característicos de las carreteras. Sin embargo, la potencia generada a las velocidades registradas resultó ser muy baja, lo que se tradujo en una producción anual estimada de apenas 444.73 kWh/año por aerogenerador.

En términos económicos, la baja producción energética obtenida conduce a una baja rentabilidad del sistema en su configuración actual, ya que los ingresos

anuales por energía generada son bajos frente a los costos de inversión, instalación, operación y mantenimiento del aerogenerador.

Finalmente, esta investigación aporta información técnica inédita para el contexto nacional, contribuyendo al desarrollo del conocimiento sobre nuevas formas no convencionales de energías renovables aplicadas a la infraestructura vial en El Salvador, y demostrando que este tipo de estudios es fundamental para ampliar el portafolio energético del país desde una perspectiva innovadora y sostenible.

RECOMENDACIONES PARA INVESTIGACIONES FUTURAS

Con base en los resultados obtenidos y las limitaciones identificadas durante el desarrollo de la presente investigación, se formulan las siguientes recomendaciones para futuros estudios:

- Se recomienda ampliar la duración de las campañas de medición, incorporando registros durante todo un año completo, con el fin de analizar el comportamiento del viento inducido considerando variaciones estacionales, cambios climáticos y fluctuaciones del flujo vehicular en diferentes épocas del año.
- Es conveniente realizar estudios similares en otros tramos de carretera con mayor densidad de tráfico pesado, tales como carreteras internacionales, accesos a puertos, zonas industriales y pasos fronterizos, ya que estos escenarios podrían presentar un mayor potencial energético aprovechable.
- Se sugiere evaluar el desempeño de aerogeneradores de diseño híbrido Savonius–Darrieus, así como prototipos específicamente optimizados para flujos inducidos por vehículos, con el objetivo de mejorar el coeficiente de potencia y aumentar la eficiencia de conversión energética.
- Futuras investigaciones deberían considerar la instalación de arreglos de múltiples aerogeneradores en serie o en paralelo, para analizar el comportamiento aerodinámico del sistema, los efectos de sombreado entre turbinas y su impacto en la producción energética total.
- Asimismo, se recomienda integrar estudios de sistemas híbridos eólico–solar, donde el viento inducido por tráfico complementa la generación

fotovoltaica, especialmente en aplicaciones de alumbrado vial y sistemas de señalización autónomos.

- Finalmente, se recomienda que futuras investigaciones incluyan un análisis económico más detallado, incorporando costos reales de instalación en campo, mantenimiento, reemplazo de componentes y análisis de ciclo de vida del sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ✓ Universidad Politécnica Salesiana. (2025). Desarrollo de la energía eólica (tesis). Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/6009/6/UPS-KT00203.pdf>, página (3)
- ✓ Villarrubia López, M. (2012). Ingeniería de la energía eólica (1.^a ed.). MARCOMBO / Alfaomega Grupo Editor. ISBN 978-84-267-1580-7. Pagina (6)
- ✓ Park, J., Kim, H., & Lee, S. (2019). Analysis of airflow patterns induced by vehicular traffic for urban wind energy harvesting. *Renewable Energy*, 135, 1133–1144. Página (21).
- ✓ Rodríguez, L., Pérez, M., & Gómez, A. (2020). Evaluación del potencial eólico inducido por tráfico vehicular en infraestructuras viales. *Revista Iberoamericana de Energía*, 14(2), 55–68. Página (21)
- ✓ Jiménez, R., Torres, D., & Morales, F. (2021). Aprovechamiento energético del flujo de aire generado por el tránsito vehicular. *Energy Reports*, 7, 3210–3220.página (21)
- ✓ Instituto Politécnico Nacional. (2022). Evaluación del potencial energético del viento inducido por tráfico vehicular en autopistas de alta velocidad: Aplicación a turbinas de eje vertical (Informe técnico). Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional. Página (24)
- ✓ Khan, M. J., & Iqbal, M. T. (2005). Pre-feasibility study of small wind energy systems for residential applications. *Renewable Energy*, 30(6), 835–854. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.08.013> Página (28)
- ✓ Stankovic, A., Milovanovic, N., & Popovic, S. (2009). Vertical axis wind turbines for urban applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2339–2348. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.04.002> Página (28)

- ✓ Japan International Cooperation Agency (JICA). Traffic and commodity Flow Survey: El Salvador. Agencia de Cooperación Internacional del Japón. JICA Study Team 2003 <https://www.jica.go.jp/el-salvador/english/activities/> . Página (70)
- ✓ Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC). (2020, junio). ¡Seis estaciones meteorológicas instaladas y en funcionamiento en El Salvador! Recuperado de <https://icc.org.gt/es/seis-estaciones-meteorologicas-instaladas-y-en-funcionamiento-en-el-salvador/>. Página (89)
- ✓ SitesAtlas.com. (s. f.). Zacatecoluca, El Salvador: information, maps, hotels, weather, and more. Recuperado de <https://www.sitesatlas.com/city/ES-Zacatecoluca/> Página (84).
- ✓ International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). Renewable power generation costs. IRENA Publications.
- ✓ International Energy Agency (IEA). (2022). World energy outlook. IEA Publications.
- ✓ Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA). Traffic and Commodity Flow Survey, El Salvador, 2003 Página (71)

ANEXOS

FOTOS SITIOS EVALUADOS

ANEXO A: FOTOS SITIOS EVALUADOS CA-2



Anexo 0.1 CA-2, Fuente: Propia.



Anexo 0.2 CA-2, Fuente: Propia.



Anexo 0.3 CA-2, Fuente: Propia.



Anexo 0.4 CA-2, Fuente: Propia.



Anexo 0.5 CA-2, Fuente: Propia.



Anexo 0.6 CA-2, Fuente: Propia.



Anexo 0.7 CA-2, Fuente: Propia.



Anexo 0.8 CA-2, Fuente: Propia.



Anexo 0.9 CA-2, Fuente: Propia.



Anexo 0.10 CA-2, Fuente: Propia.



Anexo 0.11 CA-2, Fuente: Propia.



Anexo 0.12 CA-2, Fuente: Propia.



Anexo 0.13 CA-2, Fuente: Propia.



Anexo 0.14 CA-2, Fuente: Propia.

RN-5

ANEXO B: FOTOS SITIOS RN-5



Anexo 0.15 RN-5, Fuente: Propia.



Anexo 0.16 RN-5, Fuente: Propia.



Anexo 0.17 RN-5, Fuente: Propia.



Anexo 0.18 RN-5, Fuente: Propia.



Anexo 0.19 RN-5, Fuente: Propia.



Anexo 0.20 RN-5, Fuente: Propia.



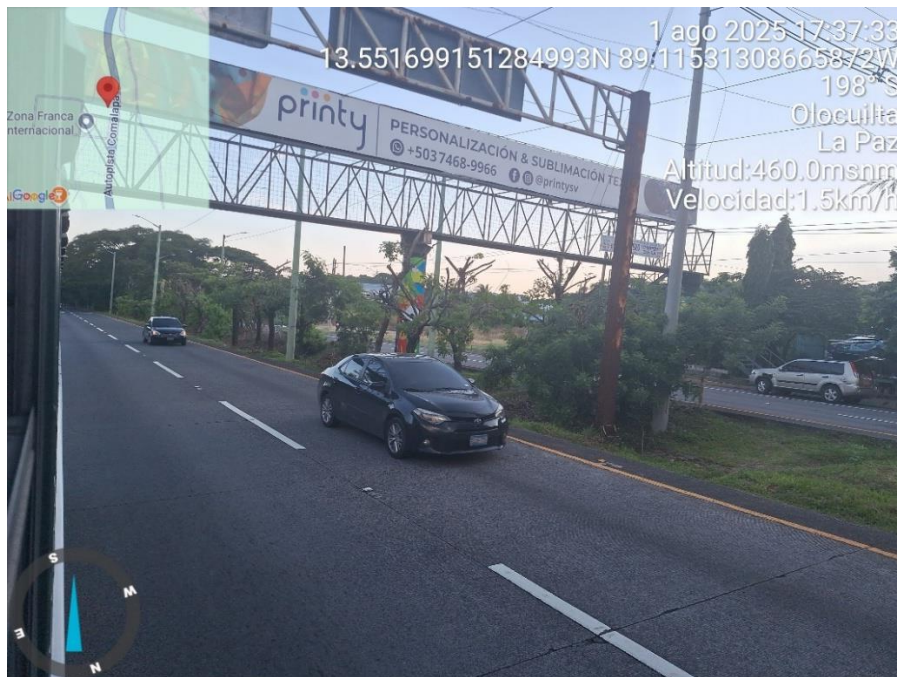
Anexo 0.21 RN-5, Fuente: Propia.



Anexo 0.22 RN-5, Fuente: Propia.



Anexo 0.23 RN-5, Fuente: Propia.



Anexo 0.24 RN-5, Fuente: Propia.



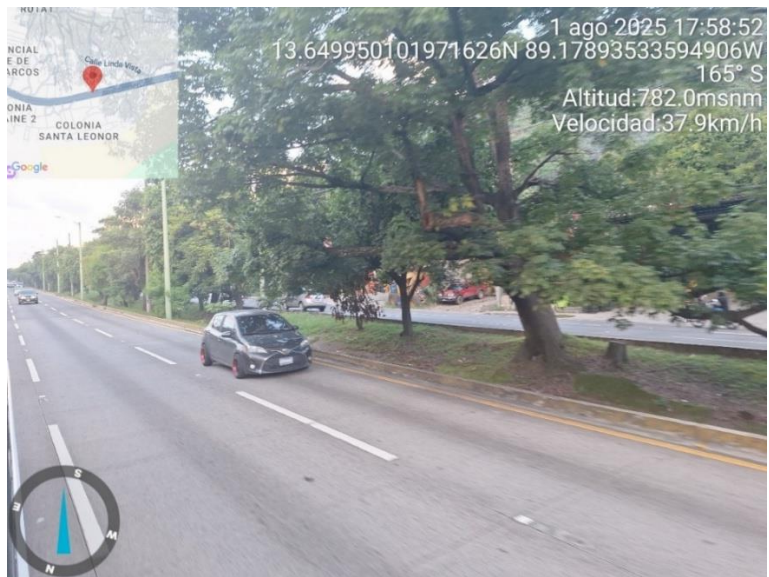
Anexo 0.25 RN-5, Fuente: Propia.



Anexo 0.26 RN-5, Fuente: Propia.



Anexo 0.27 RN-5, Fuente: Propia.



Anexo 0.28 RN-5, Fuente: Propia.

ANEXO C: FOTOS CA-12



Anexo 0.29 CA-12, Fuente: Propia.



Anexo 0.30 CA-12, Fuente: Propia.



Anexo 0.31 CA-12, Fuente: Propia.



Anexo 0.32 CA-12, Fuente: Propia.



Anexo 0.33 CA-12, Fuente: Propia.



Anexo 0.34 CA-12, Fuente: Propia.



Anexo 0.35 CA-12, Fuente: Propia.



Anexo 0.36 CA-12, Fuente: Propia.



Anexo 0.37 CA-12, Fuente: Propia.



Anexo 0.38 CA-12, Fuente: Propia.



Anexo 0.39 CA-12, Fuente: Propia.



Anexo 0.40 CA-12, Fuente: Propia.

ANEXO D: FOTOS CA-8



Anexo 0.41 CA-8, Fuente: Propia.



Anexo 0.42 CA-8, Fuente: Propia.



Anexo 0.43 CA-8, Fuente: Propia.



Anexo 0.44 CA-8, Fuente: Propia.



Anexo 0.45 CA-8, Fuente: Propia.



Anexo 0.46 CA-8, Fuente: Propia.



Anexo 0.47 CA-8, Fuente: Propia.



Anexo 0.48 CA-8, Fuente: Propia.

Time	20/8/2025	21/8/2025	26/8/2025	27/8/2025	29/8/2025	30/8/2025	31/8/2025	1/9/2025	3/9/2025	4/9/2025	6/9/2025	7/9/2025	8/9/2025	10/9/2025	12/9/2025	16/9/2025
05:09:50	3.79	3.80	3.75	3.80	3.74	3.79	3.80	3.78	3.80	3.80	3.79	3.78	3.81	3.77	3.79	3.80
05:19:50	3.85	3.83	3.83	3.83	3.89	3.87	3.83	3.81	3.83	3.87	3.81	3.81	3.84	3.87	3.86	3.85
05:29:50	3.80	3.81	3.78	3.87	3.78	3.83	3.81	3.87	3.81	3.82	3.79	3.82	3.78	3.82	3.82	3.83
05:39:50	4.13	4.13	4.09	4.11	4.15	4.14	4.16	4.14	4.11	4.14	4.11	4.13	4.14	4.12	4.16	4.17
05:49:50	3.71	3.68	3.74	3.69	3.69	3.73	3.69	3.70	3.69	3.67	3.69	3.69	3.71	3.71	3.72	3.69
05:59:50	3.73	3.70	3.74	3.78	3.77	3.80	3.74	3.74	3.76	3.71	3.77	3.71	3.71	3.74	3.73	3.74
06:09:50	2.10	3.69	3.71	3.78	3.71	3.85	3.74	3.76	3.82	3.76	3.77	3.79	3.78	3.77	3.82	3.73
06:19:50	2.43	3.82	3.88	3.87	3.82	3.89	3.84	3.82	3.91	3.90	3.90	3.86	3.85	3.83	3.82	3.83
06:29:50	1.85	3.76	3.74	3.84	3.75	3.79	3.76	3.77	3.85	3.73	3.85	3.81	3.82	3.81	3.81	3.81
06:39:50	1.75	4.13	4.12	4.10	4.14	4.12	4.16	4.10	4.13	4.11	4.09	4.10	4.14	4.17	4.13	4.15
06:49:50	2.06	3.70	3.68	3.58	3.67	3.81	3.68	3.67	3.67	3.67	3.76	3.74	3.71	3.68	3.72	3.71
06:59:50	3.05	3.47	3.51	3.51	3.52	3.50	3.53	3.45	3.58	3.52	3.46	3.51	3.55	3.51	3.47	3.51
07:09:50	3.70	3.95	3.98	3.95	3.95	3.93	3.93	3.96	3.98	3.98	3.95	3.94	3.90	3.93	3.94	3.95
07:19:50	3.40	3.65	3.62	3.62	3.63	3.67	3.64	3.66	3.67	3.64	3.68	3.65	3.67	3.65	3.64	3.63
07:29:50	3.59	3.85	3.84	3.84	3.84	3.81	3.86	3.85	3.82	3.83	3.79	3.86	3.86	3.83	3.86	3.90
07:39:50	3.90	4.08	4.17	4.11	4.15	4.19	4.14	4.13	4.12	4.16	4.19	4.18	4.09	4.14	4.15	4.12
07:49:50	3.87	4.11	4.14	4.10	4.14	4.12	4.13	4.14	4.12	4.15	4.15	4.13	4.13	4.16	4.13	4.12
07:59:50	3.85	4.06	4.12	4.14	4.13	4.09	4.13	4.12	4.08	4.09	4.07	4.09	4.11	4.09	4.09	4.10
08:09:50	3.79	3.81	3.78	3.79	3.81	3.81	3.76	3.78	3.77	3.74	3.77	3.78	3.80	3.83	3.76	3.79
08:19:50	3.85	3.85	3.81	3.89	3.86	3.86	3.86	3.87	3.89	3.89	3.87	3.86	3.85	3.91	3.84	3.87
08:29:50	3.80	3.75	3.77	3.79	3.75	3.78	3.83	3.81	3.83	3.80	3.78	3.79	3.82	3.81	3.81	3.82
08:39:50	4.13	4.13	4.14	4.10	4.11	4.10	4.10	4.10	4.14	4.16	4.07	4.13	4.15	4.10	4.14	4.13
08:49:50	3.71	3.70	3.70	3.76	3.68	3.70	3.67	3.70	3.71	3.72	3.71	3.71	3.72	3.74	3.71	3.74
08:59:50	3.73	3.74	3.74	3.69	3.71	3.74	3.69	3.73	3.71	3.75	3.71	3.75	3.78	3.76	3.72	3.72
09:09:50	3.77	3.81	3.76	3.75	3.75	3.74	3.80	3.83	3.83	3.85	3.79	3.72	3.79	3.68	3.71	3.82
09:19:50	3.85	3.87	3.96	3.92	3.83	3.85	3.89	3.84	3.86	3.92	3.86	3.84	3.84	3.82	3.88	3.88
09:29:50	3.80	3.80	3.80	3.78	3.82	3.76	3.84	3.80	3.78	3.85	3.83	3.74	3.80	3.80	3.79	3.84
09:39:50	4.13	4.12	4.10	4.16	4.04	4.05	4.09	4.13	4.15	4.14	4.15	4.14	4.15	4.13	4.13	4.20
09:49:50	3.71	3.69	3.72	3.72	3.67	3.67	3.69	3.67	3.77	3.72	3.65	3.71	3.65	3.71	3.74	3.65
09:59:50	3.73	3.74	3.71	3.71	3.69	3.69	3.75	3.68	3.79	3.70	3.71	3.58	3.73	3.70	3.71	3.79
10:09:50	3.77	3.71	3.76	3.73	3.72	3.74	3.83	3.85	3.75	3.83	3.82	3.79	3.74	3.72	3.77	3.83
10:19:50	3.85	3.76	3.78	3.88	3.88	3.84	3.90	3.88	3.85	3.88	3.85	3.83	3.89	3.91	3.84	3.82
10:29:50	3.80	3.85	3.79	3.74	3.82	3.75	3.78	3.90	3.82	3.85	3.78	3.85	3.87	3.77	3.85	3.78
10:39:50	4.13	4.10	4.19	4.10	4.06	4.13	4.09	4.22	4.13	4.04	4.10	4.14	4.10	4.16	4.04	4.14
10:49:50	3.71	3.74	3.72	3.76	3.68	3.73	3.72	3.81	3.67	3.72	3.68	3.69	3.73	3.74	3.73	3.74
10:59:50	3.52	3.54	3.54	3.56	3.50	3.52	3.53	3.53	3.53	3.53	3.50	3.47	3.47	3.54	3.43	3.46
11:09:50	3.01	3.25	3.29	3.24	3.24	3.27	3.30	3.26	3.27	3.26	3.24	3.24	3.29	3.26	3.28	3.27
11:19:50	2.88	2.92	2.90	2.93	2.94	2.97	2.92	2.93	2.91	2.91	2.96	2.94	2.91	2.93	2.95	2.99
11:29:50	2.85	3.13	3.07	3.08	3.08	3.09	3.11	3.08	3.09	3.09	3.16	3.11	3.09	3.11	3.09	3.12
11:39:50	3.65	3.94	3.90	3.91	3.92	3.88	3.89	3.94	3.91	3.90	3.90	3.89	3.92	3.82	3.89	3.91
11:49:50	3.95	4.21	4.20	4.17	4.19	4.18	4.22	4.19	4.21	4.18	4.22	4.17	4.15	4.18	4.20	4.21
11:59:50	3.77	4.01	4.01	4.01	4.04	4.02	4.02	4.02	4.02	4.04	3.96	3.99	3.99	4.01	4.02	4.04

Anexo 0.49 Base de datos suavizada con las mediciones promedio tomadas en la campaña de medición. Fuente: Propia.

Time	20/8/2025	21/8/2025	26/8/2025	27/8/2025	29/8/2025	30/8/2025	31/8/2025	1/9/2025	3/9/2025	4/9/2025	6/9/2025	7/9/2025	8/9/2025	10/9/2025	12/9/2025	16/9/2025
12:09:50	3.70	3.93	3.96	4.00	3.99	3.96	3.93	3.92	3.94	4.01	3.95	3.94	4.00	3.94	3.98	3.97
12:19:50	3.40	3.64	3.65	3.66	3.61	3.65	3.66	3.63	3.63	3.67	3.64	3.64	3.64	3.67	3.66	3.68
12:29:50	3.59	3.86	3.84	3.84	3.80	3.89	3.85	3.81	3.84	3.81	3.89	3.86	3.83	3.85	3.87	3.80
12:39:50	3.88	4.11	4.11	4.11	4.17	4.12	4.14	4.16	4.15	4.14	4.14	4.14	4.16	4.12	4.14	4.13
12:49:50	3.89	4.13	4.17	4.16	4.14	4.17	4.16	4.15	4.13	4.15	4.16	4.11	4.15	4.13	4.13	4.12
12:59:50	3.85	4.07	4.13	4.11	4.11	4.12	4.09	4.10	4.12	4.12	4.12	4.07	4.11	4.12	4.09	4.10
13:09:50	4.15	4.42	4.36	4.41	4.42	4.44	4.43	4.39	4.41	4.43	4.46	4.37	4.38	4.39	4.36	4.42
13:19:50	3.85	4.07	4.10	4.09	4.09	4.12	4.07	4.10	4.08	4.07	4.11	4.13	4.08	4.12	4.08	4.07
13:29:50	3.80	4.06	4.01	4.05	4.05	4.07	4.06	4.04	4.03	4.03	4.01	4.07	4.07	4.06	4.06	4.03
13:39:50	4.13	4.37	4.39	4.37	4.38	4.35	4.40	4.37	4.37	4.37	4.35	4.40	4.36	4.37	4.38	4.36
13:49:50	3.71	3.95	3.97	3.94	3.98	3.96	3.95	3.94	3.97	3.93	3.92	3.96	3.96	3.90	3.92	3.95
13:59:50	3.73	3.98	3.98	3.96	4.00	3.99	3.98	3.98	4.01	4.00	3.96	3.97	4.01	3.98	3.96	4.02
14:09:50	3.77	3.93	3.92	3.90	3.90	3.94	3.92	3.91	3.92	3.93	3.91	3.92	3.94	3.92	3.91	3.93
14:19:50	3.01	3.15	3.15	3.17	3.15	3.18	3.17	3.16	3.17	3.18	3.17	3.15	3.16	3.17	3.17	3.17
14:29:50	3.43	3.57	3.58	3.58	3.57	3.60	3.59	3.58	3.60	3.58	3.59	3.58	3.57	3.60	3.57	3.58
14:39:50	3.24	3.41	3.38	3.39	3.40	3.39	3.39	3.38	3.38	3.39	3.38	3.37	3.41	3.37	3.39	3.41
14:49:50	3.67	3.81	3.82	3.82	3.82	3.86	3.81	3.81	3.83	3.82	3.82	3.82	3.81	3.81	3.82	3.81
14:59:50	3.37	3.52	3.54	3.52	3.54	3.49	3.52	3.52	3.50	3.51	3.53	3.52	3.50	3.52	3.52	3.52
15:09:50	3.46	3.58	3.61	3.61	3.60	3.60	3.61	3.63	3.61	3.61	3.62	3.62	3.60	3.60	3.61	3.61
15:19:50	2.96	3.13	3.09	3.11	3.13	3.10	3.10	3.10	3.12	3.13	3.13	3.12	3.10	3.10	3.11	3.11
15:29:50	2.84	3.00	3.00	2.97	2.96	2.96	3.01	2.98	2.97	2.98	2.98	3.00	2.99	2.99	2.97	2.98
15:39:50	3.77	3.94	3.91	3.93	3.94	3.92	3.93	3.94	3.91	3.93	3.95	3.91	3.90	3.90	3.93	3.94
15:49:50	3.92	4.05	4.07	4.05	4.05	4.07	4.06	4.10	4.08	4.08	4.06	4.07	4.08	4.08	4.07	4.08
15:59:50	3.77	3.90	3.90	3.91	3.95	3.93	3.92	3.91	3.91	3.95	3.94	3.93	3.90	3.93	3.93	3.89
16:09:50	3.61	3.58	3.61	3.61	3.60	3.60	3.61	3.63	3.61	3.61	3.62	3.62	3.60	3.60	3.61	3.61
16:19:50	3.11	3.13	3.09	3.11	3.13	3.10	3.10	3.10	3.12	3.13	3.13	3.12	3.10	3.10	3.11	3.11
16:29:50	2.99	3.00	3.00	2.97	2.96	2.96	3.01	2.98	2.97	2.98	2.98	3.00	2.99	2.99	2.97	2.98
16:39:50	3.93	3.94	3.91	3.93	3.94	3.92	3.93	3.94	3.91	3.93	3.95	3.91	3.90	3.90	3.93	3.94
16:49:50	4.08	4.05	4.07	4.05	4.05	4.07	4.06	4.10	4.08	4.08	4.06	4.07	4.08	4.08	4.07	4.08
16:59:50	3.92	3.90	3.90	3.91	3.95	3.93	3.92	3.91	3.91	3.95	3.94	3.93	3.90	3.93	3.93	3.89

Anexo 0.50 Continuación de Base de datos suavizada con las mediciones promedio tomadas en la campaña de medición. Fuente: Propia.