



Universidad del
Rosario

Escuela de Ingeniería,
Ciencia y Tecnología

DISEÑO DE INSTALACIÓN TIPO CON MICROGENERADORES EÓLICOS PARA TORRES DE TELECOMUNICACIONES DE ESTACIONES BASE 5G

Presentado para obtener el título de

MAGÍSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES

Ricardo Andrés Poveda Fajardo

Dirección:

Andrés Mauricio Perez Gordillo

Universidad del Rosario

Escuela de Ingeniería, Ciencia y Tecnología

Maestría en Energías Renovables

DEDICATORIA

A la memoria de mi padre Ricardo Poveda Guzmán (06/08/1955 – 12/09/2025), quien partió de forma inesperada dejando un vacío imposible de llenar, pero también un legado de sabiduría y fortaleza que espero forje el camino que viene.

Hoy no estás físicamente a nuestro lado, pero prometo llevarte en cada pensamiento y en cada decisión.

Este trabajo es un homenaje a su ejemplo.

AGRADECIMIENTOS

A la vida, por enseñarme que los caminos más exigentes traen las recompensas más valiosas. Esta maestría no solo me ha dado conocimientos y crecimiento personal, sino que, de forma indirecta e inesperada, me regaló la oportunidad de conocer a una personita especial que se ha convertido en un motor de alegría y motivación.

A mi familia, que ha sido el pilar más firme en cada paso de este camino. Gracias por su amor incondicional, por sus palabras de aliento en los momentos difíciles y por recordarme siempre que los sueños se alcanzan con esfuerzo, disciplina y fe. Cada logro mío es también suyo, porque detrás de cada página escrita y cada noche de estudio, siempre estuvo su confianza.

A cada experiencia, desafío y persona que dejó una huella en este proceso, gracias por hacer de este viaje algo único y memorable.

ABSTRACT

Español

Actualmente, la nueva generación de comunicaciones móviles 5G apalanca muchas oportunidades para la industria en general, especialmente las relacionadas con el IoT y la realidad virtual. Sin embargo, las estaciones base de comunicaciones 5G representan un importante aumento en el consumo de energía que se focaliza especialmente en los nodos pivote donde no se encuentra fácilmente acceso a la red eléctrica.

Este documento pretende establecer la viabilidad económica y técnica para la instalación de un sistema con microgeneradores eólicos de eje vertical en torres de comunicaciones de estaciones base 5G. Inicialmente se realizó la caracterización para su implementación con datos reales medidos en una estación meteorológica en Bogotá. Posteriormente se realiza la caracterización de la carga y se estima capacidad requerida para generar un diseño de una solución que permita depender en menor medida del Sistema Interconectado Nacional o de un generador diésel de respaldo. Se realiza un análisis de cargas mecánicas que soportaría la estructura vertical de comunicaciones. Por último, se realiza el análisis de viabilidad económica realizando un ejercicio financiero teniendo en cuenta los costos de base para alimentar estas cargas relacionadas con un generador a combustión interna y el costo de combustible equivalente.

Inglés

Currently, the new generation of 5G mobile communications enables many opportunities for industry in general, especially those related to IoT and virtual reality. However, 5G base stations represent a significant increase in energy consumption, particularly focused at pivot nodes where access to the electrical grid is not available.

This document aims to establish the technical and economic feasibility of a system based on vertical-axis micro wind turbines attached to the communication towers of 5G base stations. Initially, a site characterization was carried out using real data measured at a meteorological station in Bogotá. Subsequently, the load was characterized, and the required capacity was estimated to

design a solution that would reduce dependence on the National Interconnected System or on a backup combustion generator. A mechanical load analysis was performed to assess the impact on the vertical communication structure. Finally, an economic feasibility analysis was conducted, including a financial assessment based on the baseline costs of powering these loads using an internal combustion generator and the equivalent fuel cost.

TABLA DE CONTENIDO

vi

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 2 OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo general.....	3
2.2 Objetivos específicos	3
Capítulo 3 PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	4
Capítulo 4 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	6
4.1 Comunicaciones 5G y su consumo energético	6
4.1.1 Consumo en estaciones base.....	7
4.1.2 Perfil de consumo diario para comunicaciones móviles.....	7
4.2 Microgeneradores eólicos	8
4.2.1 Principio de funcionamiento.....	8
3.2.2 Tipos y clasificación de turbinas.....	12
3.2.3 Ejemplos comerciales de VAWT.....	14
4.3 Calculo de estela – Modelo Jensen	16
4.4 Cargas para torres autosoportadas.	18
4.4.1 Cargas estáticas.....	18
4.4.2 Cargas dinámicas	19
4.5 Implementaciones en Colombia, Latinoamérica y el resto del mundo.....	20
Capítulo 5 METODOLOGÍA	23
5.1 Análisis Preliminar del Sitio	23
5.1.1 Ubicación de las Torres	23
5.2 Evaluación del Recurso Eólico	23
5.2.1 Medición directa del viento:	23
5.2.2 Corrección por altura:	23
5.2.3 Rosa de los Vientos:.....	24
5.2.4 Pérdidas por estela.	24
5.3 Estudio de Carga Eléctrica.....	24
5.3.2 Perfil de Consumo.....	24
5.4 Evaluación Estructural de la Torre	24
5.4.1 Cálculo de Cargas	24
5.5 Estudio Económico y Viabilidad Financiera	25
5.5.1 Costo Inicial del Proyecto.....	25
5.5.2 Costos Operativos y de Mantenimiento.....	25
5.5.3 Análisis de Retorno de Inversión (ROI)	26
Capítulo 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
6.1 Análisis Preliminar del Sitio	26
6.1.1 Ubicación de las Torres	26
6.2 Evaluación del Recurso Eólico	27
6.2.1 Medición directa del viento	27
6.2.2 Rosa de los Vientos.....	28

6.2.3 Corrección por altura	30vii
6.3 Estudio de la carga eléctrica	36
6.3.1 Perfil de consumo	36
6.4 Cargas para estructuras verticales autosportadas	38
6.4.1 Cargas muertas	38
6.4.2 Carga de viento estáticas y dinámicas	39
6.4.3 Carga de viento base de la torre	40
6.5 Estudio económico y viabilidad financiera	40
6.5.1 Costos de inversión (CAPEX)	40
6.5.2 Escenario 1 – Zona aislada alimentada exclusivamente con generador diesel	41
6.5.3 Escenario 2 – Zona conectada a red comercial con remuneración de acuerdo con resolución CREG 174	44
Capítulo 7 CONCLUSIONES.	49
Referencias.....	51
ANEXO A: CÁLCULO DE VELOCIDAD DE VIENTO CORREGIDA POR ALTURA Y PÉRDIDAS POR ESTELA	55
1. Corrección por altura	55
2. Pérdidas por estela	56
ANEXO B. CÁLCULO DE GENERACIÓN POR CADA TURBINA EN LAS CARAS DE LA ESTRUCTURA VERTICAL.....	58
ANEXO C. CÁLCULO DE COMBUSTIBLE EVITADO A PARTIR DEL SISTEMA DE GENERACIÓN SOBRE LA ESTRUCTURA VERTICAL	60

LISTA DE TABLAS

viii

Tabla 1 Resumen de variables estadísticas para la velocidad de viento medida	28
Tabla 2 Resumen de variables estadísticas para la velocidad de viento calculada a $D = 72\text{m}$	31
Tabla 3 Cálculo de energía generada por frecuencia y clase a partir del cruce de la velocidad del viento con la curva de generación de la turbina DS-700 en un año.....	33
Tabla 4 Resumen de energía demandada, generada por una turbina y turbinas necesarias para suplir la carga.....	37
Tabla 5 Datos calculados de fuerzas y momento flector ejercidos sobre la estructura.....	39
Tabla 6 Consumo sin carga (en vacío) de generadores comerciales [39].....	43
Tabla 7 Costos e ingresos para análisis económico del escenario 1	43
Tabla 8 Costos por kWh del pliego tarifario de ENEL para junio 2025 [42].....	46

LISTA DE FIGURAS

ix

Figura 1 Perfil de consume de potencia diaria para antenas de Comunicaciones 5G [12].....	7
Figura 2 Perfil alar mostrando fuerza de sustentación (Lift), fuerza de arrastre (Drag) y momento de cabeceo (Pitching Moment) alrededor del centro de presión (CP). [15].....	9
Figura 3 Turbina eólica de eje vertical tipo Savonius [7].....	13
Figura 4 Turbinas eólicas de eje vertical tipo Darrieus [7].....	14
Figura 5 Turbina DS-700 VAWT marca HiVAWT [19].....	15
Figura 6 Curva de potencia de la turbina DS-700 marca HiVAWT [19]	15
Figura 7 Turbina DS-3000 VAWT marca HiVAWT [20].....	16
Figura 8 Curva de potencia de la turbina DS-3000 VAWT marca HiVAWT [20]	16
Figura 9 Modelo de estela de Jensen para turbinas horizontales [22]	17
Figura 10 Sistema híbrido Fotovoltaico-Eólico de empresa Kliux.....	21
Figura 11 Ejemplo commercial de “Built-to-energy Towers” [28].....	22
Figura 12 Velocidad del viento en zona de estudio medidas a una altura $z = 20\text{m}$	28
Figura 13 Rosa de los vientos en la zona de estudio.....	29
Figura 14 estimación de velocidad de viento a una altura $z = 72\text{m}$	30
Figura 15 Histograma de frecuencias de la velocidad de viento para una altura $z = 72\text{m}$ de la zona de estudio.....	31
Figura 16 Curva característica de turbina modelo DS-700 marca HiVAWT con clases definidas cada metro/segundo	32
Figura 17 Distancia entre ubicación de turbinas para cálculo de pérdidas por estela y cada turbina sobre una cara de la estructura vertical de telecomunicaciones [7].....	35
Figura 18 Velocidad de viento de turbinas para la cara frontal, lateral y trasera de.....	35
Figura 19 Perfil de consume de estación base 5G con macroceldas (3kW consumo pico).....	36
Figura 20 Disposición física del diseño propuesto con tres turbinas DS-700 marca HiVAWT apiladas verticalmente [20].....	37
Figura 21 Coeficiente K_z para categoría de exposición C [23].....	39
Figura 22 Consumo de combustible para diversos modelos de generación y capacidad de carga.....	42
Figura 23 Flujo de caja y acumulado para análisis económico del escenario 1	44
Figura 24 Generación del Sistema eólico por mes.....	45
Figura 25: Flujo de caja y acumulado para el análisis económico del escenario 2	47
Figura 26 Análisis de sensibilidad de la TIR vs inversión inicial para el retorno del escenario 2.	48

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la presente década, se ha venido llevando a cabo una transformación importante en el mundo de las telecomunicaciones, enmarcada principalmente a la digitalización de diferentes industrias y a la evolución de las comunicaciones móviles a su quinta generación (5G). Este avance tecnológico, que es impulsado por la necesidad de más bajas latencias y aumento en la densidad de equipos conectados, trae consigo la necesidad de aumentar la infraestructura física de las repetidoras ubicadas en torres de telecomunicaciones, especialmente en zonas urbanas.

En este contexto surge la pregunta: ¿Cómo garantizar el funcionamiento energético de forma confiable de las estructuras verticales que tienen servicios 5G sin incrementar la dependencia de la red eléctrica convencional ni aumentar la huella de carbono del sector eléctrico? Esta pregunta adquiere una particular importancia cuando en contexto, el país se encuentra en un proceso de transición energética y descarbonización de sectores productivos impulsado por políticas nacionales [1]. El consumo de las torres de telecomunicaciones, aunque puede ser considerado bajo, se multiplica al considerar el número de nodos necesarios para la instalación de esta nueva tecnología. Es por esto que la implementación de soluciones que empleen energías renovables no convencionales no solo se vuelve deseable, sino necesario.

Este trabajo propone el diseño de una instalación tipo con microgeneradores eólicos de eje vertical aplicada a torres de telecomunicaciones con repetidoras 5G. La elección de turbinas de eje vertical (VAWT) obedece a la sinergia que existe con la implementación en la misma torre, la operación eficaz en entorno urbanos y la baja velocidad de arranque que tiene esta tecnología. Adicionalmente presenta un costo de operación y mantenimiento menor a soluciones más convencionales [2] [3]

Este estudio también pretende marcar la pauta de la implementación de esta solución en entornos para los cuales, pueden presentarse cortes de energía o limitaciones logísticas para

su integración con la red eléctrica. Esta solución no solo mejora la autonomía energética de las torres, sino que contribuye a reducir las emisiones indirectas de CO₂, y fortalece las telecomunicaciones frente a eventos adversos.

Diversas investigaciones han abordado el uso de fuentes no convencionales de energía renovable para la alimentación de estaciones base de telecomunicaciones. Algunas experiencias en Asia-Europa han explorado la hibridación (solar-eólica), pero no se ha explorado la posibilidad de uso de VAWT en torres sobre entornos altamente poblados. [4]. ¿Es viable técnica y económicamente implementar un sistema de microgeneración con VAWT en estructuras verticales de telecomunicaciones manteniendo la confiabilidad requerida para una red 5G?

Capítulo 2

OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar la viabilidad técnica y económica de la implementación de microgeneradores eólicos para suplir parte del consumo energético y mejorar la disponibilidad de las estaciones base de comunicaciones 5G.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar áreas geográficas en donde las torres 5G tienen acceso limitado o inexistente a redes eléctricas y realizar un análisis del consumo energético
- Caracterizar el potencial eólico de una ubicación en Bogotá, Colombia a partir de datos experimentales tomados de una estación meteorológica para determinar la viabilidad técnica de la instalación de microgeneradores eólicos.
- Estimar la capacidad de generación de energía eléctrica mediante el uso de microgeneradores eólicos para cubrir parte de la demanda energética de las estaciones base
- Realizar un análisis de viabilidad económica comparando los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento de los sistemas de microgeneración eólica con las soluciones convencionales basadas en generadores a combustión interna

Capítulo 3

PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Actualmente el mundo se encuentra en una transición tecnológica hacia comunicaciones móviles 5G, el cual se está implementando en muchos lugares incluyendo Colombia. Este tipo de tecnologías abre una nueva gama de posibilidades de implementación de avances tecnológicos como el Internet de las cosas (IoT por sus siglas en inglés) o la realidad aumentada. Sin embargo, también viene con este avance tecnológico una serie de retos que involucran proporcionar energía confiable y sostenible a las estaciones base que sostienen esta tecnología. [5]

Las estaciones base para la tecnología 5G son infraestructura esencial para su funcionamiento pues comprenden el último paso del flujo de datos (el acceso por parte de los usuarios) y por tal motivo su despliegue se convierte en un reto importante para los Internet Service Providers. En zonas aisladas, se busca para brindar una mayor cobertura mediante la instalación de estos sistemas en zonas de gran altitud, conocidas como cerros de comunicaciones [6]. Es allí donde una solución que emplee energías renovables y sostenibles para las estaciones base es uno de los factores a solucionar.

En la actualidad, estas estaciones base sin la facilidad de acceso a la red eléctrica comercial tienen como solución la instalación de generadores diésel. Estos generadores tienen grandes desventajas a nivel ambiental por sus emisiones de CO₂, además de poderse ver comprometido su funcionamiento continuó por fallas mecánicas o agotamiento del combustible lo que repercute en largos tiempos de indisponibilidad de servicio. La gestión y mantenimiento en entornos de difícil acceso también presentan retos importantes, como la exposición a condiciones climáticas extremas o, en el caso de Colombia, problemas de acceso por temáticas de orden público. [7]

En ese orden de ideas, surge la necesidad de explorar diferentes alternativas de aprovisionamiento energético que no solo sean eficientes y ambientalmente sostenibles,

sino que también sea resiliente ante fallos mejorando la continuidad en la prestación de servicio. Una solución que podría ayudar con esta problemática es la implementación de microgeneradores eólicos. Estos sistemas, en el contexto en que se sugieren implementar, presentan algunas ventajas. En primera instancia, esta es una fuente limpia de generación de energía eléctrica con la cual se pueden alimentar los equipos de comunicaciones reduciendo las emisiones de CO₂ en comparación con los generadores diésel. Por otra parte, ante el creciente valor del combustible, puede presentar una alternativa viable de ahorro económico a las empresas prestadoras de este servicio [8] dado que requieren un menor mantenimiento y no dependen de la compra de combustible. En tercer lugar, al incorporarse como una alternativa adicional de generación, puede reducirse la interrupción del servicio. Por último, se tiene la sinergia que existe entre la infraestructura de telecomunicaciones con los generadores eólicos que pueden ser empleados en estas estructuras para mejorar las condiciones de operación sin afectar significativamente el entorno en que se instalan [7].

Capítulo 4

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

El estándar de la actualidad tecnológica relacionada con las comunicaciones móviles es la tecnología 5G. Este tipo de tecnología puede llegar a quintuplicar las velocidades de transmisión de datos que se cuenta con las tecnologías de sus generaciones anteriores. Sin embargo, la adopción de este tipo de tecnologías plantea desafíos importantes respecto al consumo energético que esta tecnología requiere para un despliegue óptimo, especialmente en zonas en donde la infraestructura eléctrica es limitada o inexistente. En este contexto, la integración de fuentes no convencionales de energías renovables cobra importancia para suplir esas nuevas necesidades y mejorar la confiabilidad del servicio [9].

4.1 Comunicaciones 5G y su consumo energético

El estándar 5G representa una mejora significativa con respecto a las anteriores generaciones de comunicaciones móviles porque ofrece velocidad de datos muy altas, menor latencia y la posibilidad de conectar un mayor número de dispositivos haciendo posibles ambientes digitales que ayudan a muchas industrias a mejorar procesos [5]. Este avance tecnológico impulsa otras tecnologías como el internet de las cosas (IoT), la realidad aumentada y la inteligencia artificial, al cual se le aumenta su valor agregado si se respalda con una infraestructura energética robusta y eficiente.

En la medida en que se continúe (y en algunos casos inicie) el despliegue de redes 5G en el mundo, el consumo de energía de sus estaciones base se convierte en un desafío crítico. Las nuevas facilidades que a nivel de servicios ofrece esta tecnología conlleva a un aumento de la capacidad de procesamiento y transmisión de datos tanto para las redes en si, como para los “appliance” cuya integración se verá facilitada con esta tecnología. Este consumo adicional es un factor crítico en las áreas remotas sobre las cuales las estaciones base operan independiente de la red eléctrica. [10]

4.1.1 Consumo en estaciones base

Existen dos tipos de celdas en las estaciones base de comunicaciones 5G móviles: Las macroceldas que proveen un radio de cobertura de aproximadamente 100 m² y las microceldas que son direccionales y cuentan con una menor cobertura (10 m² aproximadamente). El consumo energético estimado para las macroceldas oscila entre 1.5 kW y 3 kW mientras que las microceldas tienen consumos mucho menores de hasta 100 W. [11]

4.1.2 Perfil de consumo diario para comunicaciones móviles

Un perfil estándar de consumo de potencia eléctrica sobre sistema de comunicaciones móviles 5G se presenta en la figura 1:

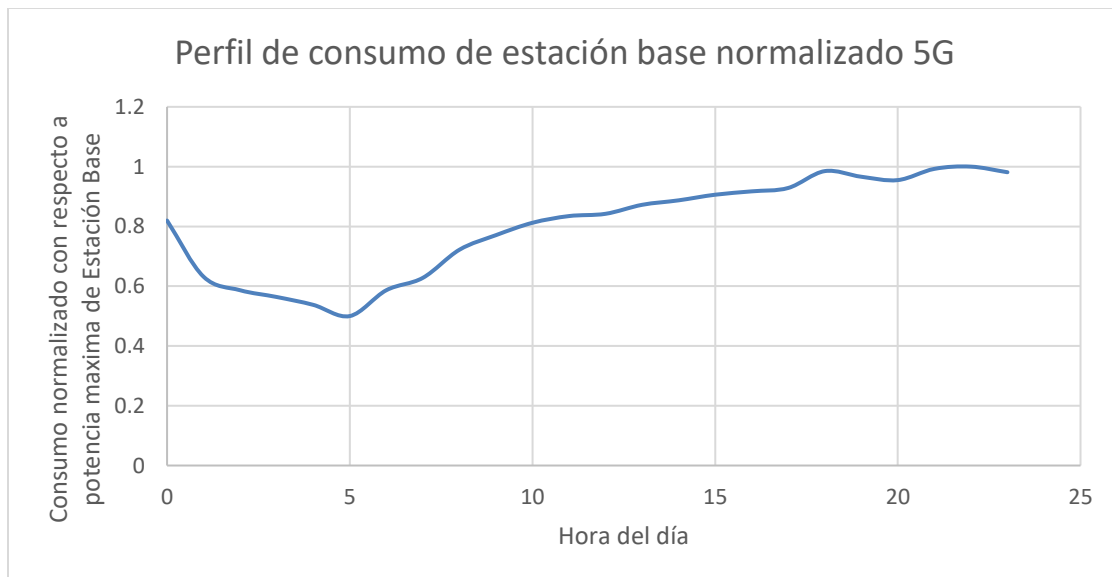


Figura 1 Perfil de consumo de potencia diaria para antenas de Comunicaciones 5G [12]

La figura 1 tiene en cuenta dos tipos de consumo, uno tradicional de funcionamiento de estaciones base 5G y otro relacionado con el apagado dinámico que varios fabricantes han optado por presentar dentro de su portafolio de beneficios relacionados con la eficiencia energética de sus equipos [12] [13]. Se puede observar el mínimo consumo sobre las 5

horas y el máximo con picos en las 18 y 22 horas. Esto se debe a los patrones de consumo estándar de ancho de banda de los usuarios

4.2 Microgeneradores eólicos

Los microgeneradores eólicos aprovechan la energía cinética del viento para generar electricidad a escala pequeña o media. Estos sistemas son modulares y pueden ser instalados en diferentes zonas en función de su tipo (desde zonas urbanas hasta algunas con entornos remotos). Su eficiencia puede variar con factores como la velocidad y variabilidad del viento, la altura de las estructuras verticales y el diseño de las aspas. [14]

4.2.1 Principio de funcionamiento

El flujo de aire sobre un perfil aerodinámico produce una distribución de fuerzas sobre la superficie del perfil. La velocidad del flujo sobre los perfiles aerodinámicos aumenta en la superficie convexa, lo que resulta en una menor presión promedio en el lado de "succión" del perfil en comparación con el lado cóncavo o de "presión". Mientras tanto, la fricción viscosa entre el aire y la superficie del perfil ralentiza el flujo de aire. [14].

La resultante de todas estas fuerzas de presión y fricción genera generalmente en dos fuerzas y un momento.

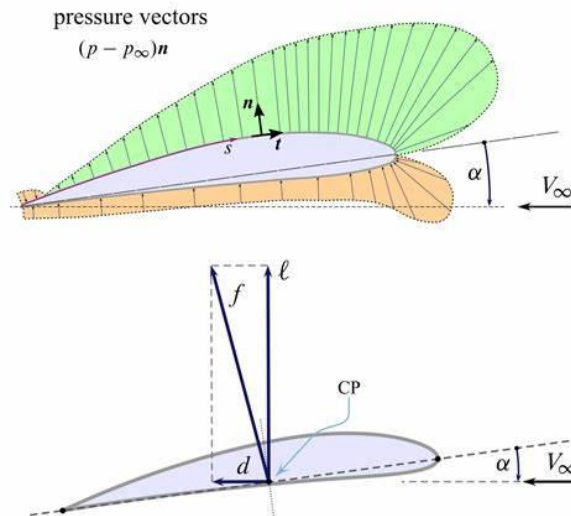


Figura 2 Perfil alar mostrando fuerza de sustentación (Lift), fuerza de arrastre (Drag) y momento de cabeceo (Pitching Moment) alrededor del centro de presión (CP). [15]

Fuerza de sustentación (Lift force): se define como perpendicular a la dirección del flujo de aire entrante. La fuerza de sustentación es consecuencia de la presión desigual en las superficies superior e inferior del perfil aerodinámico.

A medida que el flujo de aire se acerca al borde de salida, se desacelera y la presión en la superficie aumenta, lo que resulta en un gradiente de presión positivo. Si, dado el diseño del perfil aerodinámico y el ángulo de ataque, el aire se acelera más sobre la superficie superior que sobre la inferior, entonces se genera una fuerza de sustentación neta. [14]

Fuerza de arrastre (Drag force): se define como paralela a la dirección del flujo de aire entrante. La fuerza de resistencia se debe tanto a las fuerzas de fricción viscosa en la superficie del perfil como a la presión desigual en las superficies del perfil que están orientadas hacia el flujo entrante y aquellas que están en dirección opuesta. [14]

Las fuerzas de arrastre son el resultado tanto de la distribución de presión sobre el perfil aerodinámico como de la fricción entre el flujo de aire y el perfil. El componente de la distribución de presión neta en la dirección del flujo de aire da lugar a la resistencia debida a la presión. La resistencia debida a la fricción es una función de la viscosidad del fluido y disipa energía en el campo de flujo. [14]

Existen dos tipos de turbinas eólicas que funciona con cada fuerza ejercida en los principios aerodinámicos fundamentales y cuyo uso depende de las condiciones relacionadas con velocidad y orientación del viento para maximizar la generación de energía

Pitching momentum: se define en torno a un eje perpendicular a la sección transversal del perfil aerodinámico.

La teoría y la investigación han demostrado que muchos problemas de flujo pueden caracterizarse mediante parámetros adimensionales. El parámetro adimensional más importante para definir las características de las condiciones de flujo de fluidos es el número de Reynolds. El número de Reynolds, Re se define como:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (1)$$

Donde:

$\rho =$ Densidad del fluido

$v =$ Velocidad del fluido

$L =$ Longitud característica

$\mu =$ Viscosidad del fluido

El diseño de rotores generalmente utiliza coeficientes adimensionales, determinados para un rango de ángulos de ataque y números de Reynolds, en pruebas en túnel de viento. El coeficiente de sustentación bidimensional se define como:

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (2)$$

Donde:

$L =$ fuerza de sustentación

$\rho =$ densidad del aire

$V =$ Velocidad del viento

$A =$ área de referencia

El coeficiente de arrastre se define como:

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (3)$$

Donde:

$D =$ fuerza de arrastre

$\rho =$ densidad del aire

$V =$ Velocidad del viento

$A =$ área de referencia

El coeficiente del momento de cabeceo se define como:

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho V^2 c A} \quad (4)$$

Donde:

$M = \text{Momento de cabeceo o "pitching moment"}$

$\rho = \text{densidad del aire}$

$V = \text{Velocidad del viento}$

$A = \text{área de referencia}$

$c = \text{Longitud del perfil alar}$

3.2.2 Tipos y clasificación de turbinas

Se pueden encontrar en el mercado diversos tipos de generadores eólicos. Generalmente su clasificación se basa en dos tipos los “Horizontal Axis Wind Turbine” (Turbina eólica de eje horizontal) que abarca gran cantidad de mercado relacionado con parques eólicos para generación de grandes potencias debido a su eficiencia más alta. [7] Por su parte, las turbinas de eje vertical a pesar de operar a una menor velocidad de viento para entrar a entregar potencia, tienen importantes oportunidades de mejora relacionadas con su durabilidad y fatiga en la operación. Sin embargo, los fabricantes ya han realizado bastantes avances relacionados con nuevos materiales para extender la vida útil de estos tipos de turbinas. [16]

Para este estudio, por restricciones de aplicación de este tipo de tecnología relacionada con su montaje en estructuras verticales para comunicaciones, se hace énfasis en los tipos de eje vertical y sus ventajas y desventajas con respecto a las de eje horizontal y entre ellas mismas.

- **Rotor Savonius:** El rotor savonius se compone de un rotor cilíndrico dividido en semicírculos dispuestos en una configuración en forma de “S”. Su diseño viene ligado a una serie de parámetros como lo son: el número de palas, la relación de aspecto, el perfil de las palas, y el diámetro de las placas que comprenden el rotor. Recientemente para mejorar su rendimiento se ha relacionado otras variables como lo pueden ser el número de etapas, el ángulo de torsión, las cajas guías y los

deflectores. Es una turbina denominada drag-based relacionada con el torque generado por la fuerza de arrastre. Dentro de sus desventajas podemos encontrar un bajo coeficiente de potencia comparado con aquellas que funcionan a partir de fuerza de sustentación y altas vibraciones lo que reduce su vida útil [17]

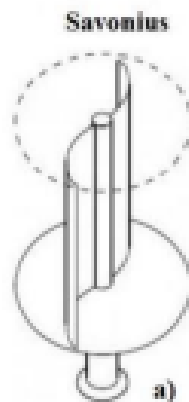


Figura 3 Turbina eólica de eje vertical tipo Savonius [7]

- **Rotor Darrieus:** Es un tipo de rotor o turbina que opera bajo el principio del “lift”. Esto quiere decir que cuando el viento pasa sobre las aspas, el efecto de sustentación (generado por las diferencias de presión entre el aire que pasa sobre una sección de las aspas con respecto a la otra) es lo que genera que gire sobre el eje. Existen en el mercado dos tipos de rotores Darrieus: Los denominados **H-Darrieus** y los Phi-Darrieus. Las desventajas de este tipo de rotor consisten en sus pérdidas relacionadas con los cambios súbitos de dirección del viento por su rango de operación limitado [18]

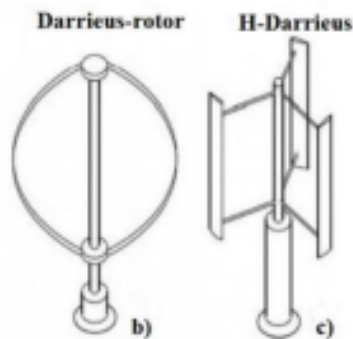


Figura 4 Turbinas eólicas de eje vertical tipo Darrieus [7]

- **Ventajas comparativa Turbinas de eje vertical (VAWT por sus siglas en inglés “Vertical Axis Wind Turbine” vs Turbinas de eje horizontal (HAWT por sus siglas en inglés “Horizontal Axis Wind Turbine”**
 - El centro de gravedad más bajo ayuda a la estabilidad de la estructura vertical.
 - Por su disposición física, teniendo en cuenta que la cara de una estructura vertical autosoportada de 60 metros puede tener 4 metros en su base, sería mejor, en materia de seguridad y salud en el trabajo, la disposición de una turbina vertical.
 - La velocidad de inicio de una VAWT es considerablemente menor a la de una HAWT. [19]
 - Existe una mayor facilidad de facturación y reducidos costos de instalación.
 - Puede ser escalable debido a que no clausura completamente una cara de las estructuras verticales [7].

3.2.3 Ejemplos comerciales de VAWT

Dentro del mercado se pueden encontrar comercialmente bastantes tipos de turbinas eólicas que utilizan los diferentes tipos de rotores. A continuación, se presentan sus características para evaluar su viabilidad sobre las zonas de influencia del presente trabajo:

- **DS-700 VAWT:** Es una turbina híbrida con un roto Savonius y un rotor Darrieus en un solo equipo. Sus características principales comprenden una velocidad de viento de inicio “Cut in” menor a 3 m/s, una potencia nominal de 700 W a 12m/s, un diámetro de rotor de 1.93 m y un peso aproximado de 60 kg [19]

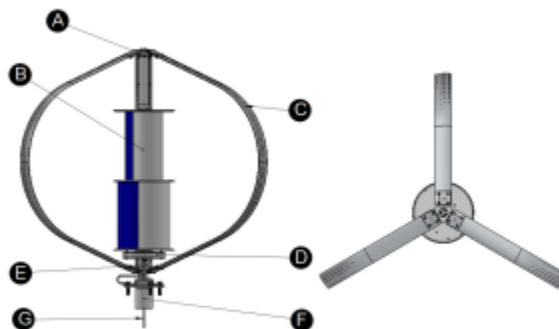


Figura 5 Turbina DS-700 VAWT marca HiVAWT [19]

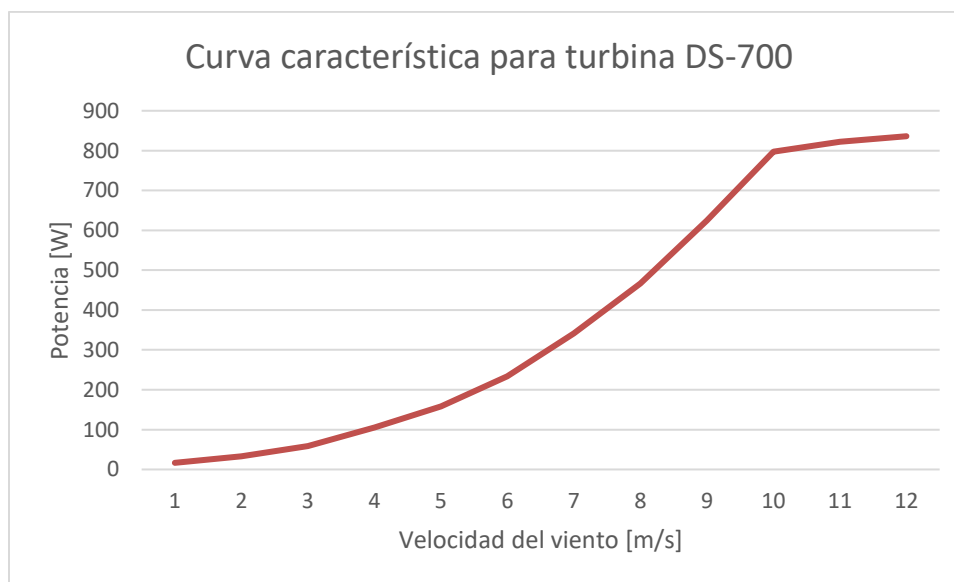


Figura 6 Curva de potencia de la turbina DS-700 marca HiVAWT [19]

- **DS-3000 VAWT:** Comprende también una turbina híbrida. Sin embargo, cuenta con un “Cut in speed” superior de acuerdo con la curva de potencia (mayor a 3m/s). Tiene una potencia nominal de 3000 W a 12m/s y un diámetro de rotor de 4 metros.

Tiene un peso total de 680kg y cuenta con la posibilidad de escalar en potencia mediante estructuras de apilamiento.

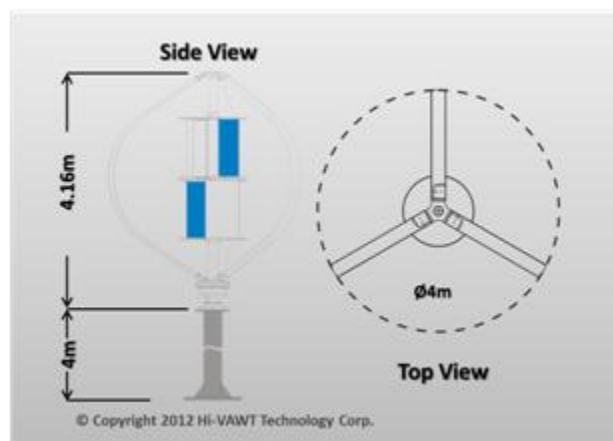


Figura 7 Turbina DS-3000 VAWT marca HiVAWT [20]

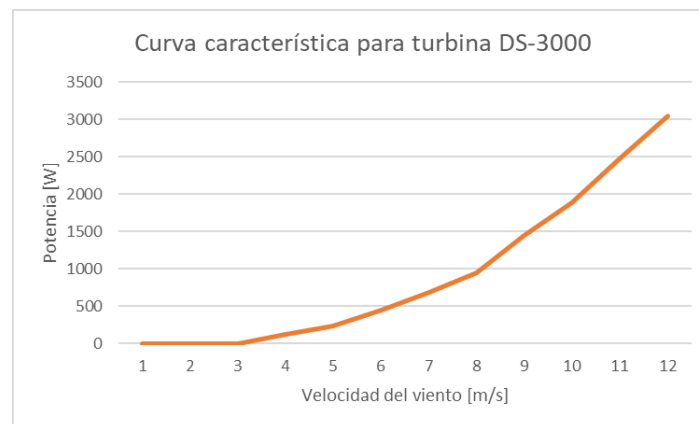


Figura 8 Curva de potencia de la turbina DS-3000 VAWT marca HiVAWT [20]

4.3 Calculo de estela – Modelo Jensen

El modelo de Jensen (también conocido como modelo Park) es uno de los métodos analíticos más sencillos y difundidos para estimar estelas de aerogeneradores. Esto es importante porque permite predecir pérdidas de rendimiento por la disposición física de las turbinas y estimar una producción real.

Este modelo asume un perfil de déficit de velocidad con distribución uniforme (top-hat) dentro de la estela y se basa en la conservación de masa en un tubo de flujo divergente detrás del rotor [21]. Sus supuestos simplificadores principales son:

- La estela se expande linealmente con la distancia a sotavento del rotor (formando un cono divergente).
- Dentro de la estela, la velocidad del viento se considera uniformemente reducida (perfil ideal top-hat) a lo largo de la sección.

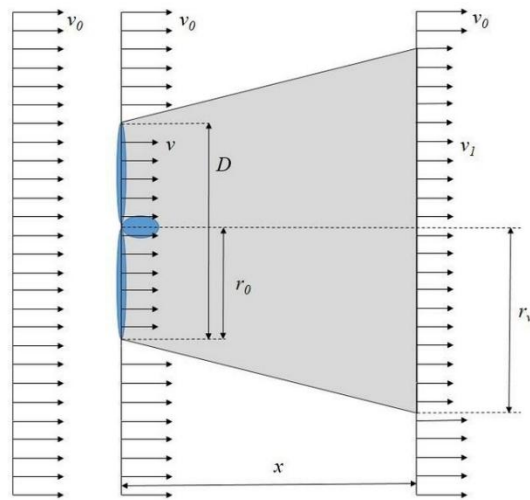


Figura 9 Modelo de estela de Jensen para turbinas horizontales [22]

- La tasa de expansión de la estela viene dada por una constante empírica de decaimiento (coeficiente k).
- Las características aerodinámicas del aerogenerador se representan únicamente mediante su coeficiente de empuje (C_T), que cuantifica la fracción de momentum extraído del viento.
- Efectos más complejos como la turbulencia añadida o vórtices de punta no se modelan explícitamente

$$\frac{V_0 - V_1}{V_0} = \frac{1 - \sqrt{1 - C_T}}{(1 + 2k \left(\frac{x}{D}\right)^2)} \quad (5)$$

En donde:

- V_1 : Velocidad de viento a una distancia x de la turbina.
- V_0 : es la velocidad libre del viento
- C_T : Es el coeficiente de empuje, que corresponde a la fuerza del rotor normalizado
- K : Coeficiente de decaimiento, que mide la pendiente de expansión del radio de la estela.

$$V(x) = V_0 \left(1 - \frac{1 - \sqrt{1 - C_T}}{\left(1 + 2k \left(\frac{x}{D}\right)^2\right)} \right) \quad (6)$$

4.4 Cargas para torres autosoportadas.

Los cálculos de la incidencia de las cargas por efecto de las turbinas eólicas a ser analizadas su instalación en la torre se realizaran de acuerdo a la norma internacional ANSI-TIA 222-G [23]

4.4.1 Cargas estáticas

Según ANSI/TIA-222-G, todos los accesorios montados en la torre (antenas, appurtenances, etc.) deben incluirse en el análisis de viento, suponiéndolos intactos bajo la ráfaga extrema

La carga de viento horizontal sobre cada turbina se calcula a partir de la presión dinámica del viento a la altura correspondiente, multiplicada por el área proyectada y el coeficiente aerodinámico. [23]

$$F_A = q_z G_h (EPA)_A \quad (7)$$

Donde:

$q_z =$ Presión del viento a la altura z

$G_h =$ Factor de ráfaga dinámico

$EPA =$ Área efectiva de la torre

Para el cálculo de la presión dinámica de obtiene como:

$$q_z = 0.613 K_z K_{zt} I K_d V^2 \quad (8)$$

Donde:

$K_z =$ Coeficiente de velocidad de altura

$K_{zt} =$ Factor del terreno

$K_d =$ Factor de dirección

$I =$ Factor de importancia

4.4.2 Cargas dinámicas

Las cargas dinámicas dentro de la norma son consideradas como cargas estáticas teniendo en cuenta el factor de ráfaga G_h de la ecuación 7. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la frecuencia de vibración típica de la estructura de celosía, no se encuentre en resonancia con la frecuencia de giro de la turbina para evitar interacciones resonantes locales en los puntos de anclajes de los elementos como las diagonales, brazos de soporte y pernos de conexión [23]

4.5 Implementaciones en Colombia, Latinoamérica y el resto del mundo

En Latinoamérica, varios países de la región se encuentran en proceso de transición hacia energías renovables, especialmente en zonas con difícil acceso a red comercial. Específicamente en Colombia, no se registran aún implementaciones de turbinas eólicas sobre torres de comunicaciones, sin embargo, el proyecto Colviento [24] de la Universidad EAN presenta un prototipo de turbina eólica de eje vertical de baja potencia para la electrificación de zonas rurales en el país aisladas. Si bien este proyecto se encuentra enfocado en zonas rurales y no propiamente torres de comunicaciones o estaciones base, ilustra avances a nivel local de los microgeneradores eólicos de eje vertical como una alternativa para mejorar el acceso a la energía.

La empresa Kliux Energies, ubicada en la Rioja, España tiene un producto de aplicabilidad internacional [25]. Desde el año 2013 tiene a disposición una solución híbrida eólica-fotovoltaica para antenas de comunicaciones. Esta solución integra diferentes fuentes de energía e incluye un generador diésel para garantizar el suministro continuo e ininterrumpido de energía eléctrica para antenas de telecomunicaciones. Esta solución fue especialmente diseñada para responder a la demanda energética del sector y estima un retorno de inversión de 3 años en función al ahorro de combustible [25].

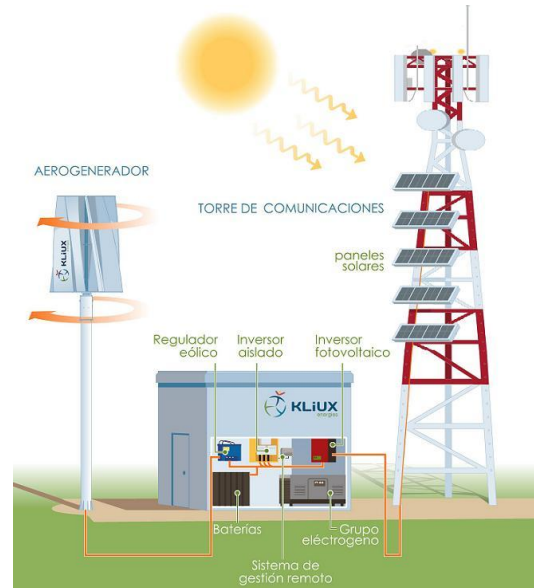


Figura 10 Sistema híbrido Fotovoltaico-Eólico de empresa KliuX

Por otra parte, existen una serie de startups latinoamericanas que han intentado solucionar el problema del abastecimiento energético de las estaciones base. La empresa Hybrico, de Guatemala, ha implementado soluciones solares exclusivamente con apoyo de almacenamiento por medio de baterías buscando sustituir gradualmente los generadores diésel [26]. No obstante, la implementación de soluciones que tengan sinergia con la altura de una torre de comunicaciones y la implementación de turbinas eólicas en términos generales ha sido incipiente.

A nivel internacional, por su parte, se han llevado a cabo varios proyectos pilotos que específicamente integren turbinas eólicas de eje vertical y torres de comunicaciones. En Suecia a inicios de la década de 2010, se realizó el diseño de una turbina eólica vertical de 10kW para montarse en la parte exterior de una torre de comunicaciones tubular con un generador de imanes permanentes. El diseño rodeaba la torre aprovechando la estructura como parte del aerogenerador. Algunas conclusiones de este estudio arrojaron que la integración reduce el uso del suelo evitando problemas de giro de góndola sobre el eje vertical y del sombreado propio de las palas de turbinas de eje horizontal [27]

En estos momentos existen modelos comerciales de torres de comunicaciones que ya tienen integradas las turbinas de generación eólica para alimentación de las antenas de comunicaciones en una tecnología denominada “Built-to-energy Towers”. La empresa francesa Wind-it desarrolló el concepto de torres autoenergizadas con una solución que, en el interior de la torre, permite la instalación de turbinas eólicas de hasta 5kW de potencia, con el compromiso de ser escalable en función de la altura y la ubicación [28]

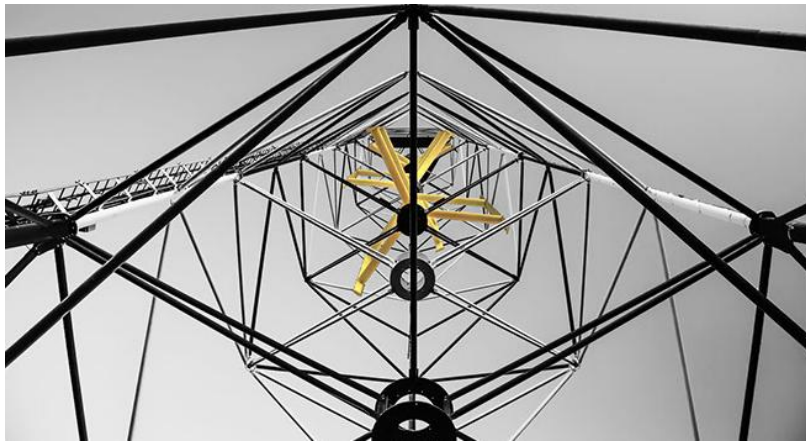


Figura 11 Ejemplo comercial de “Built-to-energy Towers” [28]

Capítulo 5

METODOLOGÍA

5.1 Análisis Preliminar del Sitio

El primer paso es analizar el entorno físico donde se instalará la turbina. Esto incluye el estudio del terreno, la ubicación exacta de la torre de telecomunicaciones y las condiciones ambientales locales.

5.1.1 Ubicación de las Torres

Usar sistemas de información geográfica (SIG) para mapear la ubicación exacta de las torres. Esto facilita el análisis de las condiciones de viento, el acceso y las restricciones legales o medioambientales.

5.2 Evaluación del Recurso Eólico

El recurso eólico en el sitio es un factor determinante para la eficiencia y viabilidad de la turbina. Aquí se desglosa el proceso de evaluación:

5.2.1 Medición directa del viento:

Se tomarán datos históricos de estaciones meteorológicas reales correspondientes a un año calendario ininterrumpido. La frecuencia de medición será de 1 hora y se tomará a 20 metros sobre el nivel del suelo. Esta altura deberá ser corregida para la altura final de disposición en el diseño

5.2.2 Corrección por altura:

Se empleará el método de corrección de velocidad debido a la altura Jutsus Mikhail mediante el cual con una sola altura de medición de velocidad del viento, se puede extrapolar logarítmicamente la velocidad de viento esperada a la altura de disposición de las turbinas

5.2.3 Rosa de los Vientos:

Crear una "rosa de los vientos", que muestra la distribución de la dirección del viento, ayudará a determinar si el flujo de viento es constante desde una dirección o cambia frecuentemente. Esto es importante para los cálculos de cargas mecánicas sobre la estructura vertical y las pérdidas por efecto estela

5.2.4 Pérdidas por estela.

Se realizará el cálculo, en función de la disposición de las turbinas, de las potenciales pérdidas por estela que sufriría cada una de ellas. Se empleará un coeficiente de empuje típico de turbinas de eje vertical

5.3 Estudio de Carga Eléctrica

Es fundamental determinar el consumo eléctrico de los equipos de telecomunicaciones en la torre para dimensionar adecuadamente la turbina eólica y el sistema de almacenamiento.

5.3.2 Perfil de Consumo

Se empleará un perfil de consumo típico normalizado de estaciones base de telecomunicaciones para determinar, ante una potencia pico de 3kW, la demanda total de energía en el periodo de evaluación que en este caso será de 1 año

5.4 Evaluación Estructural de la Torre

Es esencial garantizar que la torre pueda soportar el peso y las cargas dinámicas de la turbina eólica sin comprometer su estabilidad ni la integridad de los equipos de telecomunicaciones.

5.4.1 Cálculo de Cargas

- **Carga estática:** La turbina añadirá un peso permanente a la torre, que debe evaluarse en términos de capacidad de carga estructural. El peso total incluye no solo la turbina, sino también cualquier sistema de soporte, como refuerzos o anclajes adicionales.
- **Carga dinámica:** Las turbinas eólicas generan cargas dinámicas debido a las interacciones del viento con las palas en rotación. Es importante calcular cómo estas cargas afectarán la estructura de la torre, en particular en situaciones de vientos fuertes.

5.5 Estudio Económico y Viabilidad Financiera

Finalmente, se debe realizar un análisis económico detallado para determinar si la inversión es financieramente viable a largo plazo.

5.5.1 Costo Inicial del Proyecto

- **Costos de la turbina:** Incluir el precio de compra de la turbina, su instalación, y los sistemas eléctricos (inversores, reguladores de carga, baterías).
- **Costos de infraestructura:** Cualquier modificación estructural de la torre, como refuerzos o bases adicionales para soportar la turbina.
- **Transporte y logística:** Evaluar los costos asociados con el transporte de la turbina hasta la torre, especialmente si se encuentra en áreas de difícil acceso.

5.5.2 Costos Operativos y de Mantenimiento

- **Mantenimiento de la turbina:** Las turbinas requieren mantenimiento periódico, como la revisión de las palas, el generador y el sistema de anclaje.
- **Monitoreo del sistema:** Considerar los costos de los sistemas de monitoreo remoto o local que permitan evaluar el rendimiento de la turbina en tiempo real.

5.5.3 Análisis de Retorno de Inversión (ROI)

- **Ahorro en costos energéticos:** Estimar los ahorros en la factura eléctrica o en el consumo de combustible si la turbina sustituye generadores diésel.
- **Tiempo de amortización:** Calcular el tiempo necesario para que los ahorros en energía compensen los costos iniciales de la inversión.
- **Flujo de caja:** Realizar una proyección de flujo de caja a lo largo de la vida útil de la turbina (normalmente de 15 a 25 años) para evaluar la viabilidad financiera del proyecto.

Capítulo 6

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Análisis Preliminar del Sitio

6.1.1 Ubicación de las Torres

Para el análisis de los históricos de velocidad y dirección del viento, se utilizó la plataforma AmbientWeather, la cual permitió acceder a datos meteorológicos registrados por estaciones específicas. Con el objetivo de garantizar la mayor precisión y representatividad en los resultados, se seleccionó una estación meteorológica que ofreciera la mayor cantidad de datos posibles dentro de un año calendario. Tras evaluar diversas opciones, se decidió emplear los datos proporcionados por la estación meteorológica ubicada en el Aeropuerto Internacional El Dorado, cuyas coordenadas geográficas son: 4.70112°N, -74.1452575°O. Esta estación se encuentra a 950 metros de la torre de comunicaciones que presta servicios a la torre de control de aeropuerto.

La ubicación de esta estación meteorológica resulta estratégica, ya que se encuentra en una zona de relevancia operativa y cuenta con condiciones representativas del entorno urbano-industrial de Bogotá. Específicamente, está situada en medio de los edificios de embarque del aeropuerto. Esta localización asegura la cobertura de datos dentro de un entorno con condiciones topográficas y climáticas características del área de estudio.

En relación con la altura de instalación de la estación meteorológica, se estimó que se encuentra a 20 metros sobre el nivel del suelo, debido a que las coordenadas corresponden con el edificio de la terminal 1 para la cual se está construyendo en una zona cercana la torre JW que de acuerdo con la ANI va a tener 25 metros de altura [29]. Esta altura es especialmente relevante para los cálculos de simulación futura, ya que los datos recopilados deberán ajustarse para representar condiciones a una altura mayor. Para este estudio, se proyectó una simulación a 70 metros de altura, lo cual es representativo de una estructura vertical típica en el área de las telecomunicaciones.

6.2 Evaluación del Recurso Eólico

6.2.1 Medición directa del viento

La estación meteorológica escogida cuenta con mediciones de diferentes variables dentro de las cuales se encuentran la velocidad del viento y la dirección del viento. Para realizar el estudio se realizó la extracción de datos en un periodo de tiempo comprendido entre el 6 de noviembre del 2023 y el 4 de noviembre del 2024. Los datos se pueden encontrar a continuación:

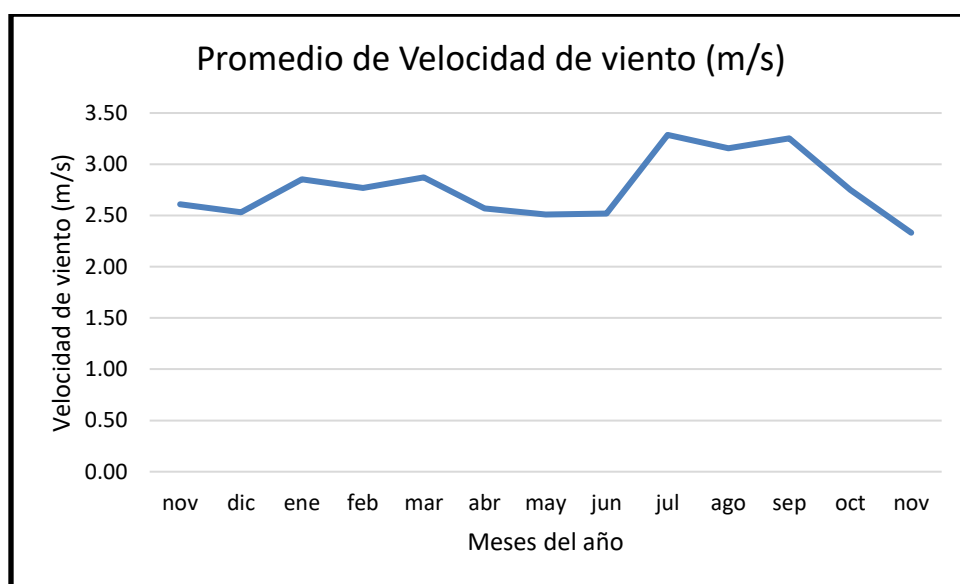


Figura 12 Velocidad del viento en zona de estudio medidas a una altura $z = 20m$

La figura 12 muestra la evolución mes a mes de la velocidad de viento en el sitio de interés. Se observa que las velocidades más bajas se registran hacia los meses de abril y mayo. A partir de junio se identifica un aumento gradual que se sostiene hacia el mes de septiembre

De acuerdo con [30] existe una fuerte variabilidad de viento en la ciudad de Bogotá, identificando valores más altos sobre la zona sur. Estos datos respaldan la decisión de tomar esta ubicación como significativa para el análisis, y resalta la importancia de tomar en cuenta factores geográficos para la evaluación de la pertinencia de una solución de este estilo

Tabla 1 Resumen de variables estadísticas para la velocidad de viento medida

Mínimo	0 m/s
Máximo	15.60 m/s
Desviación estándar	1.83 m/s
Promedio	2.80 m/s

El promedio general de velocidad de viento es moderadamente bajo considerando que se encuentra en un entorno urbano con flujo turbulento y presencia de obstáculos físicos como los edificios del aeropuerto. Sin embargo, se justifica la utilización de VAWT sobre una estructura vertical por la importante ganancia de altura a la que se instalaría la turbina. Adicionalmente, la velocidad de arranque tan baja de estas turbinas nos permite tener flujo de potencia incluso en los tiempos con velocidad de viento más bajas [31]

6.2.2 Rosa de los Vientos

Con los datos obtenidos a partir del análisis histórico de velocidad y dirección del viento, se procede a generar la rosa de los vientos para la zona de estudio, como se muestra en la figura 13. Este gráfico es una herramienta fundamental en los estudios de energía renovable, particularmente en el análisis de viabilidad para la generación eólica, ya que

permite visualizar de manera clara y detallada la distribución angular de las frecuencias de viento en un periodo de tiempo determinado.

La rosa de los vientos se elabora utilizando valores medidos de dirección (en grados o direcciones cardinales) y la frecuencia relativa de ocurrencia asociada a cada sector. La dirección del viento se representa en el plano polar, mientras que la magnitud o frecuencia de cada dirección define el radio de cada sector. Este gráfico permite identificar las direcciones predominantes del viento en la zona de estudio. Estas direcciones son cruciales para orientar aerogeneradores o estructuras diseñadas para optimizar el aprovechamiento energético.

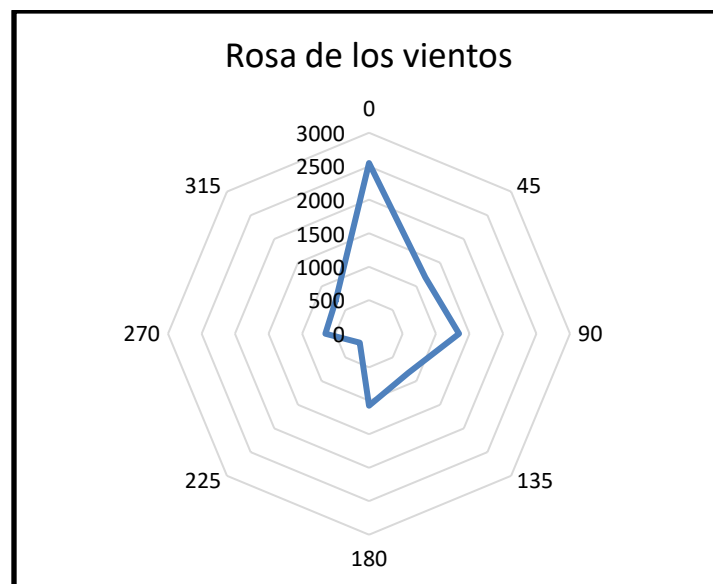


Figura 13 Rosa de los vientos en la zona de estudio

Como se observa en la figura 13, el sector norte muestra una clara predominancia de dirección del viento. Esto implica que los vientos en Bogotá son mayormente de norte a sur. En segundo lugar se encuentra el este-noreste justificado en la presencia de los cerros orientales en la ciudad. [32]

Las direcciones suroeste, oeste y noroeste presentan una muy baja frecuencia lo que puede indicar la baja variabilidad de dirección del viento. Por esta razón se puede considerar una estimación más acertada de las pérdidas por estela.

6.2.3 Corrección por altura

La corrección por altura de los datos de velocidad de viento medidos en sitio se realizó teniendo en cuenta una aproximación de 20 metros de la altura del Anemómetro, de acuerdo con las características de ubicación de la estación meteorológica. Para realizar el cálculo se utilizó el método de Jutsus Mikkail para el cual solo es necesaria una altura de medición de velocidad del viento, y permite realizar la extrapolación hallando el coeficiente de cortante de viento o coeficiente de Hellman por cada valor de velocidad de viento y altura conocidos.

La corrección se realiza a 72m teniendo en cuenta el tamaño del soporte y una estructura vertical estándar de telecomunicaciones autoportada de 70m hasta la plataforma superior.

Los resultados de la corrección se presentan a continuación:

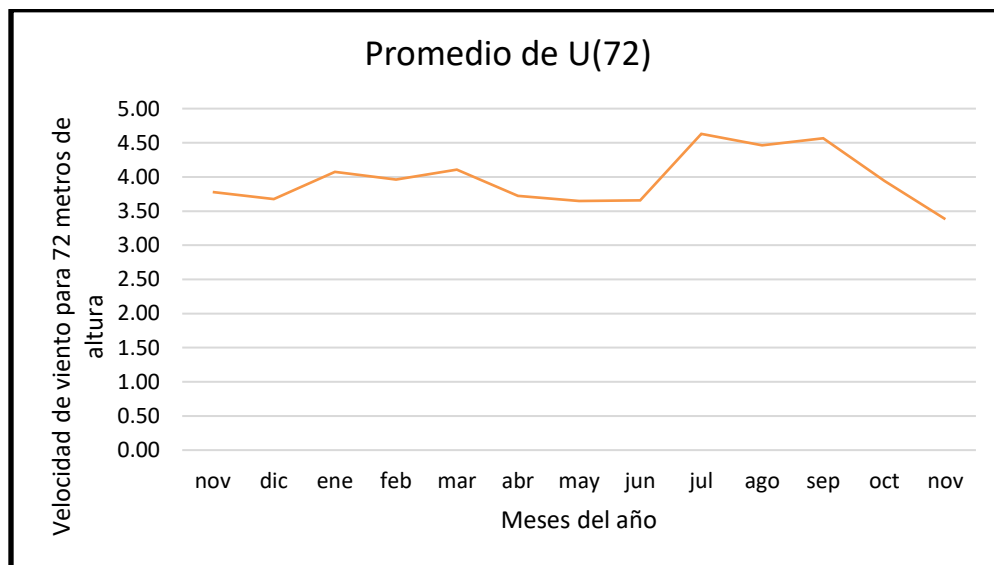


Figura 14 estimación de velocidad de viento a una altura $z = 72m$

Tabla 2 Resumen de variables estadísticas para la velocidad de viento calculada a una altura $z = 72m$

Mínimo	0 m/s
Máximo	18.58 m/s
Desviación estándar	2.32 m/s
Promedio	4.02 m/s

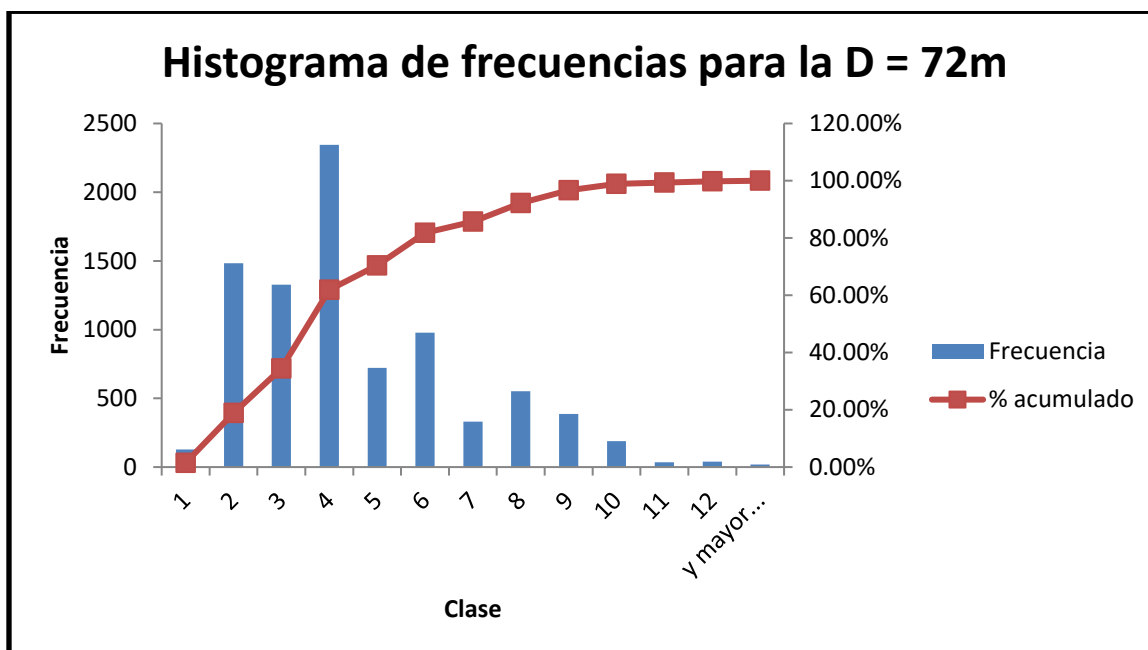


Figura 15 Histograma de frecuencias de la velocidad de viento para una altura $z = 72m$ de la zona de estudio

La gráfica de dispersión de la velocidad del viento corregida (Figura 14) muestra que los valores máximos alcanzan los 18,58 m/s, mientras que el promedio general es de 4,02 m/s, lo que representa un aumento del 43% frente al promedio a 20 m. Este incremento valida la elección de turbinas con bajo "cut-in speed" y permite estimar una mayor generación efectiva durante más horas del día.

Se procede a tomar como base la turbina DS-700 marca HiVAWT [19]. La elección de esa turbina en particular obedece a que un importante porcentaje del tiempo, la velocidad del

viento se encuentra por debajo de los 4m/s de acuerdo con la figura 15, y para turbinas de mayor tamaño (ejemplo DS-3000) [20] la velocidad de arranque o “cut-in” es mayor a este valor (ver figura 8).

Con esta curva, y el histograma generado en la Figura 15 Histograma de frecuencias de la velocidad de viento para una altura $z = 72\text{m}$ de la zona de estudio, se procede a realizar el cálculo de la potencial energía generada por una sola turbina. Los respectivos gráficos y tabla de datos se presentan a continuación:

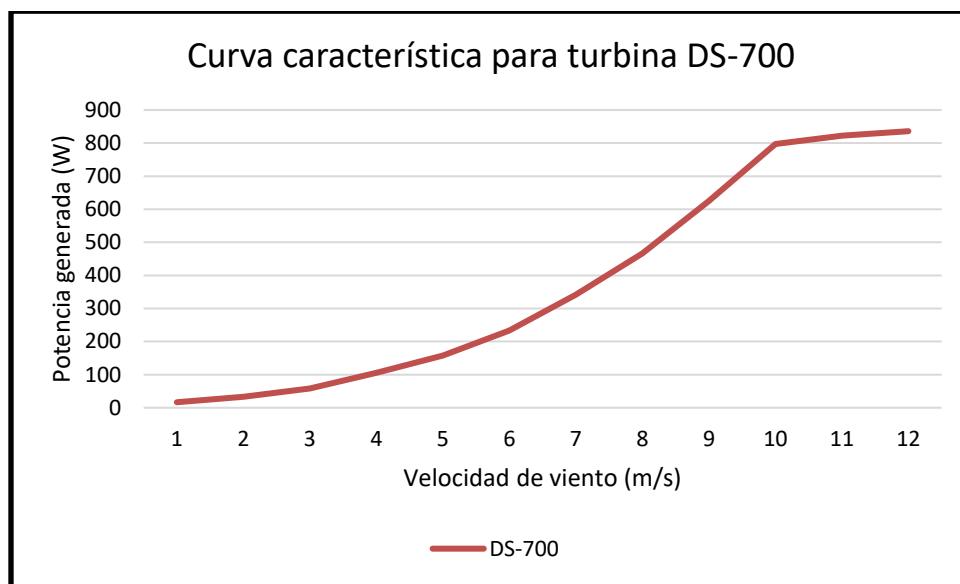


Figura 16 Curva característica de turbina modelo DS-700 marca HiVAWT con clases definidas cada metro/segundo

Tabla 3 Cálculo de energía generada por frecuencia y clase a partir del cruce de la velocidad del viento con la curva de generación de la turbina DS-700 en un año

Clase m/s	Frecuencia	% acumulado	Energía generada [kWh]
1	127	1.49%	2.12
2	1483	18.88%	49.43
3	1328	34.45%	77.47
4	2344	61.93%	247.42
5	721	70.38%	114.16
6	978	81.85%	228.20
7	330	85.72%	112.75
8	551	92.18%	257.13
9	387	96.72%	241.88
10	188	98.92%	149.88
11	34	99.32%	27.96
12	40	99.79%	33.44
y mayor...	18	100.00%	
Total			1541.83

La Tabla 3 presenta el cálculo detallado de la energía generada por una turbina DS-700 en función de la frecuencia de ocurrencia de cada clase de velocidad de viento, considerando intervalos de 1 m/s. Esta estimación se obtuvo mediante el cruce del histograma de frecuencias con la curva de potencia de la turbina, dada por el fabricante (ver figura 16), permitiendo determinar la energía generada por clase y su aporte acumulado al total anual.

Se observa que las velocidades de viento entre 3 y 8 m/s concentran la mayor parte de la energía generada, acumulando aproximadamente el 79% de la energía total, lo que demuestra que la turbina DS-700 opera adecuadamente en rangos de viento medio.

6.2.4 Pérdidas por Estela

Teniendo en cuenta que se determinó realizar el diseño con turbinas de viento de eje vertical (VAWT), éstas no tienen un plano de rotación fijo con respecto al viento. Este efecto ocasiona estelas más anchas. Sin embargo, de acuerdo con [33] tienen una recuperación más rápida que las turbinas de eje horizontal que fueron la base de la estimación de estela de Jensen.

Teniendo esto en cuenta, se debe ajustar los coeficientes de empuje (C_t) y el coeficiente de expansión (k) para el cálculo hora a hora de las pérdidas por estela a partir de la velocidad de viento corregida con altura $D = 72\text{m}$.

De acuerdo con [16] una buena aproximación para las turbinas de eje vertical Darrieus es tomar un $C_t = 0.4$ y un $k = 0.12$. Teniendo en cuenta la baja velocidad promedio de viento, y por tanto la necesidad de uso de una turbina con una baja velocidad de arranque, se toma el diámetro de la DS-700 para realizar el cálculo de las pérdidas.

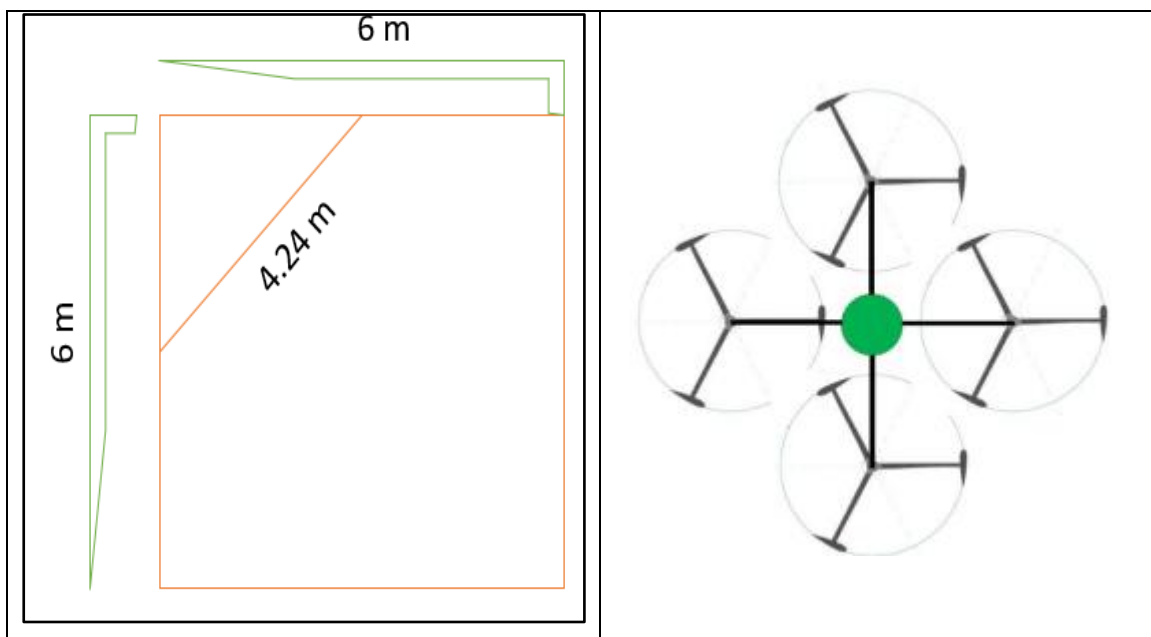


Figura 17 Distancia entre ubicación de turbinas para cálculo de pérdidas por estela y cada turbina sobre una cara de la estructura vertical de telecomunicaciones [7]

Asumiendo una distribución uniforme de la estela por parte de las turbinas ubicadas en las caras laterales de la estructura vertical, el cálculo se realizó con una distancia $x = 4.24\text{m}$ para las caras laterales con V_0 como la velocidad de viento que da a la cara frontal, y para la cara trasera se tomó $x = 4.24\text{m}$ con V_0 igual a la velocidad de viento que da a las caras laterales. Teniendo en cuenta estas premisas se realizó el cálculo de la velocidad de viento resultante obteniendo los siguientes resultados:

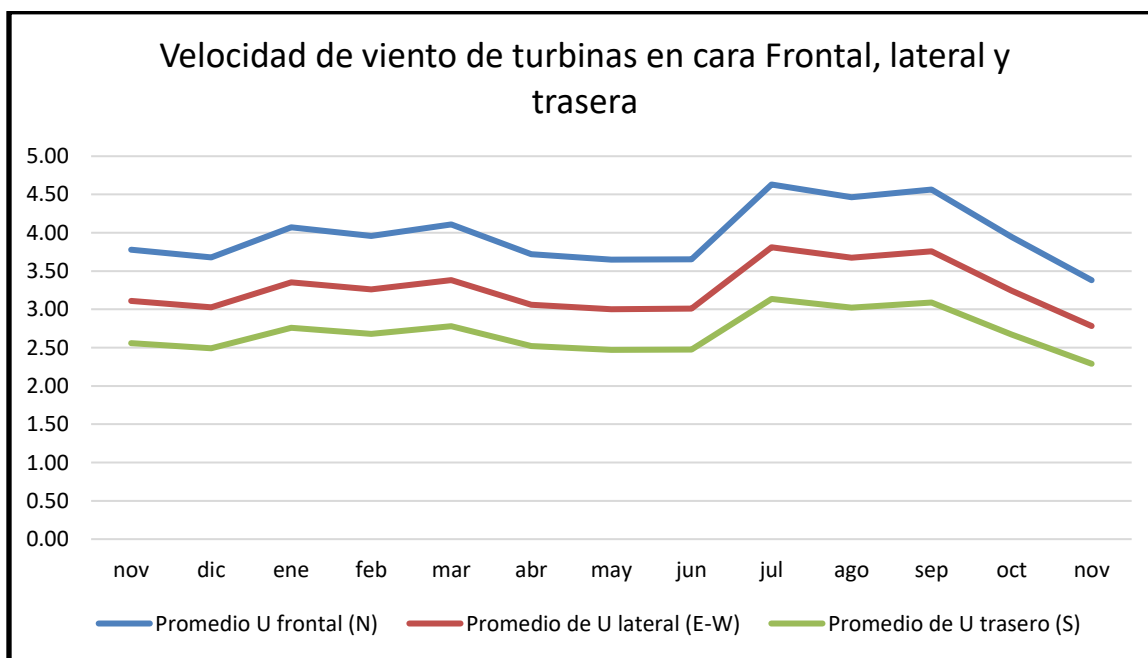


Figura 18 Velocidad de viento de turbinas para la cara frontal, lateral y trasera de

La figura 18 muestra la variación mensual de la velocidad de viento por cada cara de la estructura vertical. Se puede observar una tendencia estable siendo notoriamente superior en la frontal oscilando entre 4 y 4,8 m/s. Las caras laterales entre 3 y 3,5 m/s y la cara

trasera entre 2,5 y 3,2 m/s lo que refleja la importancia del efecto estela sobre la velocidad de viento que ve la turbina, lo que puede representar en una importante disminución del potencial de generación entre más densamente poblada se encuentre la estructura vertical de generadores eólicos.

6.3 Estudio de la carga eléctrica

6.3.1 Perfil de consumo

Para el perfil de consumo se empleó el perfil obtenido a partir del informe de emisiones “Green 5G White Paper” de la empresa Huawei [12] que nos provee un perfil de carga. Este perfil se normalizó a los valores máximo y mínimos de consumo de una macrocelda 5G (1.5 kW y 3kW respectivamente) [11] y se generó un perfil de consumo.

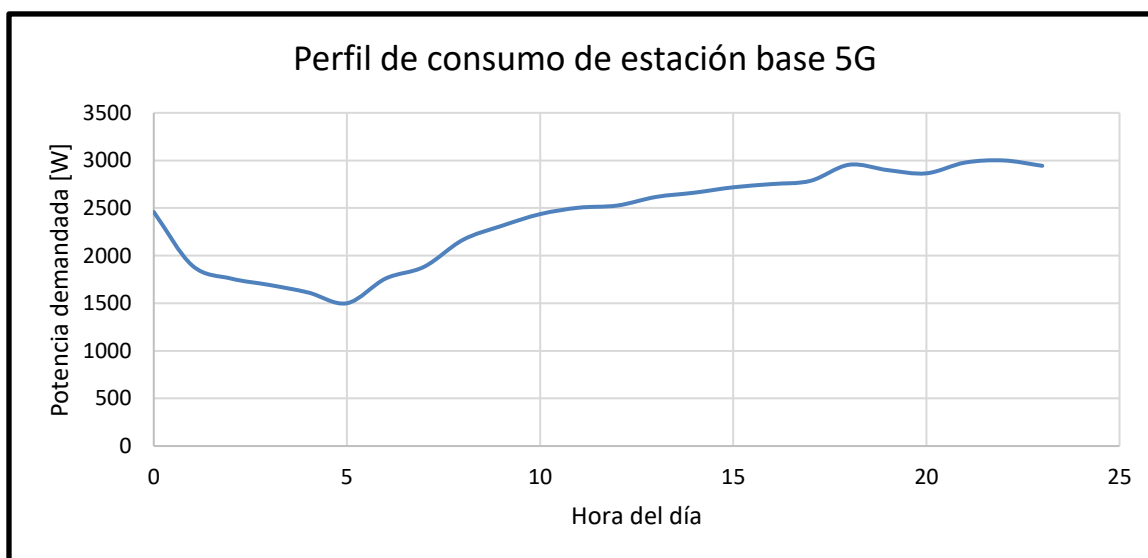


Figura 19 Perfil de consume de estación base 5G con macroceldas (3kW consumo pico)

Cuando se integra la potencia demandada en cada hora del día, y se compara con la energía generada por una sola turbina se puede determinar el número de turbinas necesarias en una sola estación base de comunicaciones móviles 5G para suplir la energía necesaria para su operación. Los cálculos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4 Resumen de energía demandada, generada por una turbina y turbinas necesarias para suplir la carga

Variable	Valor	Unidad
Consumo diario	57.7	kWh
Consumo anual	21052	kWh
Energía generada anual	13465	kWh

La energía anual generada se obtuvo a partir de cálculo de generación de la turbina frontal, las turbinas laterales y posteriores con sus respectivas pérdidas por estela a partir de la velocidad de viento con la frecuencia a lo largo del año, cruzada con la curva de potencia de la turbina seleccionada

Teniendo en cuenta estos datos, y el arreglo para mantener la estabilidad estructural de una torre de telecomunicaciones autoportada con área transversal cuadrada, se propone realizar un diseño con cuatro estructuras con 3 turbinas apiladas verticalmente dispuestas sobre cada una de las caras de la estructura vertical tal y como se muestra en la figura 20:



Figura 20 Disposición física del diseño propuesto con tres turbinas DS-700 marca

HiVAWT apiladas verticalmente [20]

El apilamiento vertical de las turbinas eólicas ha sido demostrado de traer un beneficio a la producción de energía como lo demuestra Liu [34]. Sin embargo el efecto de este beneficio fue despreciado para efectos de los cálculos de este trabajo

Teniendo en cuenta un total de 12 turbinas, se puede proveer energía equivalente al 63,9% de la demanda de energía anual de las facilidades de comunicaciones 5G.

6.4 Cargas para estructuras verticales autosoportadas

En esta sección, se tiene como objetivo realizar el cálculo de las cargas estructurales que implicaría la instalación del sistema anteriormente descrito dentro de una torre autosoportada de 70 metros de altura.

Para este apartado se consideraron las siguientes condiciones de cálculo:

- Torre autosoportada de 70 metros de altura, de área transversal cuadrada construida de acuerdo al estándar ANSI-TIA 222-G
- Categoría de exposición al viento C (terreno abierto nivelado)
- 12 turbinas eólicas (3 por cada cara de la torre)
- Cada turbina cuenta con un peso de 60kg, altura de 1.93m y ancho de 1.6m (aprox. Área frontal de 3.1 m² [19])
- Coeficiente de arrastre C_d de 0,4 (el mismo utilizado para el cálculo del efecto estela)
- Viento de ráfaga (máximo a una altura de 72 metros) de 18.58 m/s de acuerdo con la tabla 2

6.4.1 Cargas muertas

El peso total de las turbinas corresponde a 720 kg adicionales que ejercerán una fuerza vertical de 7kN. Si bien no corresponden a un aporte significativo en comparación con el peso total de la estructura, puede aumentar las fuerzas axiales de los pilares, que se debe de tener en cuenta en el total del análisis.

6.4.2 Carga de viento estáticas y dinámicas

Se procede a calcular inicialmente las presiones dinámicas del viento q_z , de acuerdo con la ecuación 6. Se emplean los siguientes datos:

$K_{zt} = 1$ teniendo en cuenta que no se tiene una topografía significativa

$K_d = 1$. El peor de los casos es con el viento directamente sobre una de sus caras. Es la misma consideración que se tuvo en cuenta con el cálculo del efecto estela

$I = 1$. Factor de importancia medio de acuerdo con la norma [23]

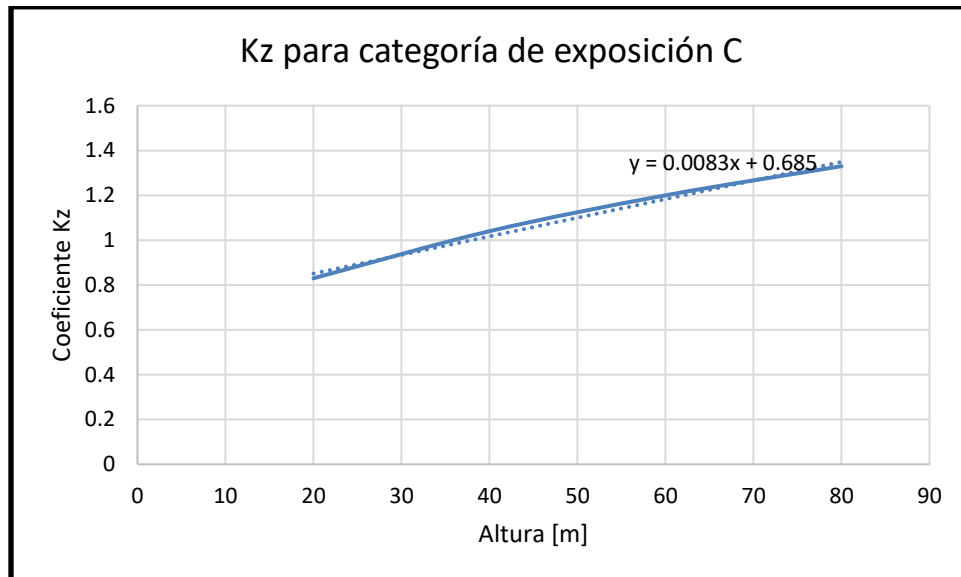


Figura 21 Coeficiente K_z para categoría de exposición C [23]

De acuerdo con la regresión realizada en la figura 21 se obtiene el coeficiente K_z para las alturas 72, 70 y 68 metros. Adicionalmente se considera un área efectiva de $3,1 \text{ m}^2$ y un coeficiente de arrastre de 0,4.

Tabla 5 Datos calculados de fuerzas y momento flector ejercidos sobre la estructura

Altura [m]	K_z	Q_z [N/m ²]	F [N]	M [Nm]
72	1.3	269.1	333.7	24 024
70	1.3	265.6	329.4	23 055
68	1.2	262.1	325.0	22 102

6.4.3 Carga de viento base de la torre

Para analizar la influencia de las fuerzas adicionales por efecto de las turbinas, se considera una estructura vertical autosoportada con área de base de 4 metros por cara, que disminuye a 1 metro por cara a la altura de 70 metros. Teniendo en cuenta eso, y un promedio de solidez de cada cara de la torre del 20% (este factor puede variar en función de la ocupación de la torre y la ubicación de las antenas, por esta razón se toma una ocupación estándar de la industria) aproximadamente, se tendría una fuerza total de aproximadamente 16kN y un momento flexor sobre la base de 630 kN. Con estos datos y teniendo en cuenta una fuerza total de 988,1 N y un momento flexor total sobre cada cara de 69,1 kN m. De acuerdo con la tabla 5 en donde se calculan fuerzas y momentos de los accesorios, se obtiene que esto efectuaría cargas adicionales sobre la estructura del 6,2% sobre la fuerza total y del 10,9% sobre el momento flector.

Estas cargas adicionales se deberán de tener en cuenta en la estructura vertical sobre la cual una solución de este tipo se pretenda instalar y realizar un análisis independiente por persona calificada de acuerdo a los estándares de cumplimiento de infraestructura descritos entre otros en la resolución 4272 del 2021 [35]

6.5 Estudio económico y viabilidad financiera

Esta sección tiene como objetivo desarrollar un análisis económico detallado para la instalación tipo con VAWT. Teniendo en cuenta lo descrito en el apartado técnico, la turbina DS-700 .

6.5.1 Costos de inversión (CAPEX)

El costo de inversión de turbinas VAWT de 700W puede variar significativamente según el proveedor y las especificaciones técnicas.

De acuerdo con una revisión del mercado, se identificaron los siguientes valores de referencia:

- Turbina Etneo DS-700 : 6500 dólares, diseño híbrido Darrieus-Savonius [36]
- Turbina VAWT 800W: 3261 dólares [37]

Para efectos del análisis económico y teniendo en cuenta el amplio margen de precios del que constan estos equipos, se tomará el precio comercial de la referencia usada 6500 USD

- Inversor y controlador de carga: Se tiene que evaluar que sea conectado a la red o aislado a la red de acuerdo con los dos casos. Debe tener entrada de 12V/24V/48V DC y salida a 120VAC. Para efectos de este análisis se tendrá en cuenta \$2.472.893 COP para un inversor de 3kW [38]

Si bien fue concebido el objeto del estudio como una forma de proveer de energía a las estaciones base que no tienen una conexión económicamente viable a la red comercial, pero que sin embargo debe de existir para democratizar el acceso a las tecnologías de la información y comunicación; el análisis económico se realizará en dos escenarios que se explican a continuación:

Escenario 1: Datos de consumo de combustible evitado a partir de datos de generadores comerciales y su consumo en stand-by (es decir con baja o nula potencia de generación)

Escenario 2: Beneficios económicos del sistema funcionando como un AutoGenerador a Pequeña Escala de acuerdo con la resolución 174 de la CREG. [39]

6.5.2 Escenario 1 – Zona aislada alimentada exclusivamente con generador diesel

Para el primer escenario de análisis, se consideraron múltiples modelos de generadores que se pueden encontrar comercialmente en el mercado . A partir de estos y de su tabla de datos

de consumo de combustible en función de su porcentaje de carga, se realizó un gráfico con el fin de determinar una curva que describiera el consumo de combustible del generador en función de la carga, como se representa en la figura 22. Con base en los valores de energía producida (teniendo en cuenta la corrección por altura, y pérdidas por estela) calculados en la sección 6.2, se desarrolla un análisis económico orientado a cuantificar beneficios económicos con la instalación del sistema eólico.

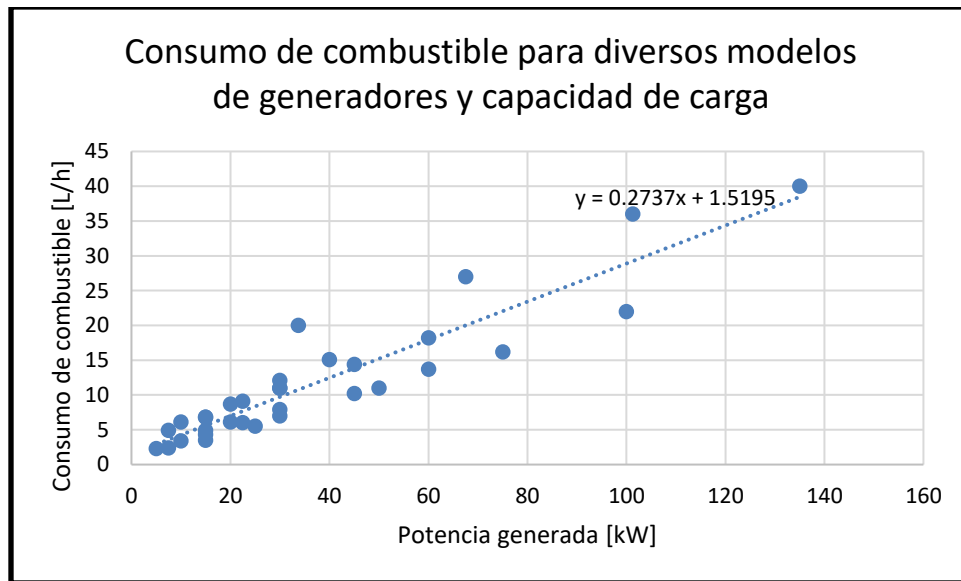


Figura 22 Consumo de combustible para diversos modelos de generación y capacidad de carga

Para el cálculo del combustible evitado, se tomó las frecuencias de cada clase del histograma presentado en la figura 15, y se cruzó con la regresión lineal realizada a partir de los datos de la figura 22 con el objetivo de obtener el consumo de combustible del generador que se evitaría gracias a la potencia generada por el sistema eólico.

Es importante mencionar que, para el caso de sistemas aislados de la red eléctrica comercial, el generador diésel debe estar operando permanentemente debido a lo súbito que puede ser el aumento de potencia en el día, de acuerdo con la figura 16. Para identificar el consumo con cero cargas se identificaron varios generadores comerciales que serían adecuado para las potencias de consumo diaria de una estación base.

Tabla 6 Consumo sin carga (en vacío) de generadores comerciales [40]

Modelo	Potencia nominal [kW]	Consumo en vacío [L/h]
Cummins Onan Commercial Mobile – 10 kW / 60 Hz	10	1.1
Cummins Onan Commercial Mobile – 8 kW / 60 Hz	8	0.98

De acuerdo con la tabla 6, para tomar una medida pesimista sobre el consumo en vacío, se tomó un 1.1 L/h.

Con ello se realiza un análisis económico teniendo en cuenta los costos descritos anteriormente, adicionando gastos de mantenimiento anual del 3% sobre el valor total de la inversión inicial de capital y un precio de combustible de acuerdo con el precio promedio de enero de 2025 publicado por el ministerio de Hacienda y Crédito Público [41]

Tabla 7 Costos e ingresos para análisis económico del escenario 1

Concepto	Valor	Unidad
Costo inicial turbina	\$ 6 500	USD
Costo electrónica de potencia	\$ 603	USD
Combustible evitado	3 685.45	L
Valor combustible	\$ 10 441 790	COP
Valor combustible	\$ 30 561	USD
Valor mantenimiento anual	\$ 2 557.13	USD

De acuerdo con la configuración descrita en la figura 20, se requiere un total de 12 turbinas por estructura vertical, entregando un total de inversión de \$ 46 369.79 USD. Al valor del combustible evitado se resta el valor del mantenimiento anual para obtener el ingreso de la instalación de este sistema anual a precios constantes de \$ 11 279 USD.

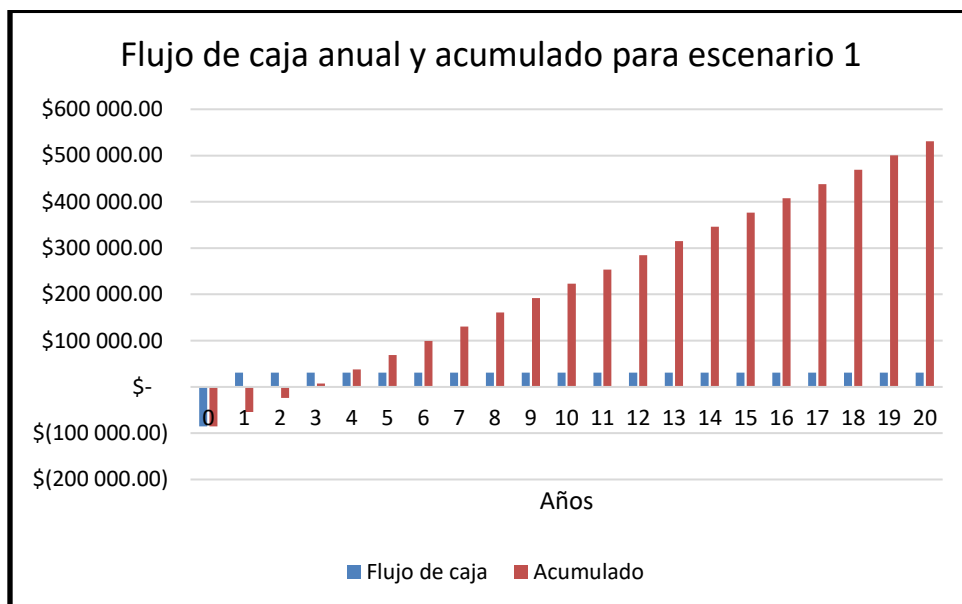


Figura 23 Flujo de caja y acumulado para análisis económico del escenario 1

Tal y como se muestra en la figura 19, se tiene un tiempo estimado de retorno de inversión de 3 años con una tasa interna de retorno calculada de 36% y un valor presente neto calculado con una tasa de descuento del 20% anual de \$ 53 982 USD a 20 años [42]

6.5.3 Escenario 2 – Zona conectada a red comercial con remuneración de acuerdo con resolución CREG 174

Para el escenario 2, se emplea la metodología de remuneración descrita en la resolución CREG 174 para autogeneradores a pequeña escala. Allí se indica que para un periodo de facturación (en la mayoría de cuentas comerciales de energía corresponde a un mes) las exportaciones de energía son menores a las importaciones de energía, el costo de

remuneración por parte del operador de red será costo unitario menos el costo de comercialización. Si las exportaciones en un periodo de facturación son superiores a las importaciones, se remuneraría esas exportaciones “excedentes” a precio de bolsa. [39]

Para la estimación del potencial energético, se realizó un análisis mensual de la capacidad de generación eólica, considerando los datos de velocidad promedio del viento y la curva de potencia de las turbinas seleccionadas. De esta manera, se evaluó el comportamiento del recurso a lo largo del año, permitiendo identificar los periodos en los que la energía generada por el sistema eólico podría superar la demanda eléctrica del sitio, evidenciando así su grado de autosuficiencia energética.

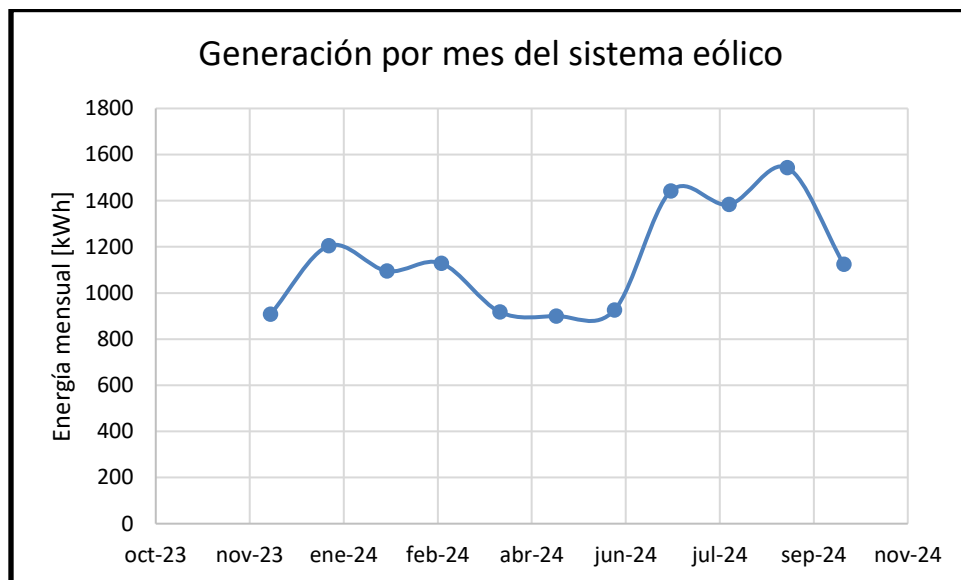


Figura 24 Generación del Sistema eólico por mes

La figura 24 muestra la estimación de energía generada por el sistema eólico desde noviembre de 2023 hasta noviembre de 2024. Esto incluye el sistema completo de 12 turbinas eólicas considerando las pérdidas por estela para cada una de las caras de la estructura vertical en concordancia con el Anexo B de este documento.

El pico de generación, como se observa en la figura 20, corresponde al mes de septiembre con 1542.7 kWh. Sin embargo, de acuerdo con el perfil de carga descrito en la sección 6.3 y la tabla 4, el consumo mensual correspondería a 1730 kWh. Teniendo esto en cuenta, se realiza el cálculo del retorno económico con la totalidad de la energía generada siendo costo unitario menos costos de comercialización.

Para ello, y teniendo en cuenta que los datos de velocidad de viento fueron tomados de la estación meteorológica del aeropuerto el dorado, se toman los datos tarifarios de ENEL COLOMBIA S.A. E.S.P. para el mes de junio del 2025.

Tabla 8 Costos por kWh del pliego tarifario de ENEL para junio 2025 [43]

Concepto	Costo por kWh
Comercialización	77.1222
Costo unitario	836.2799

Para efectos de este ejercicio, se va a emplear un análisis sin permuta directa de energía (es decir, sin considerar la energía que por acople de impedancias iría en un sistema conectado a la red directo a la carga), esto es, considerando que toda la energía generada corresponde a excedente para obtener un beneficio económico pesimista.

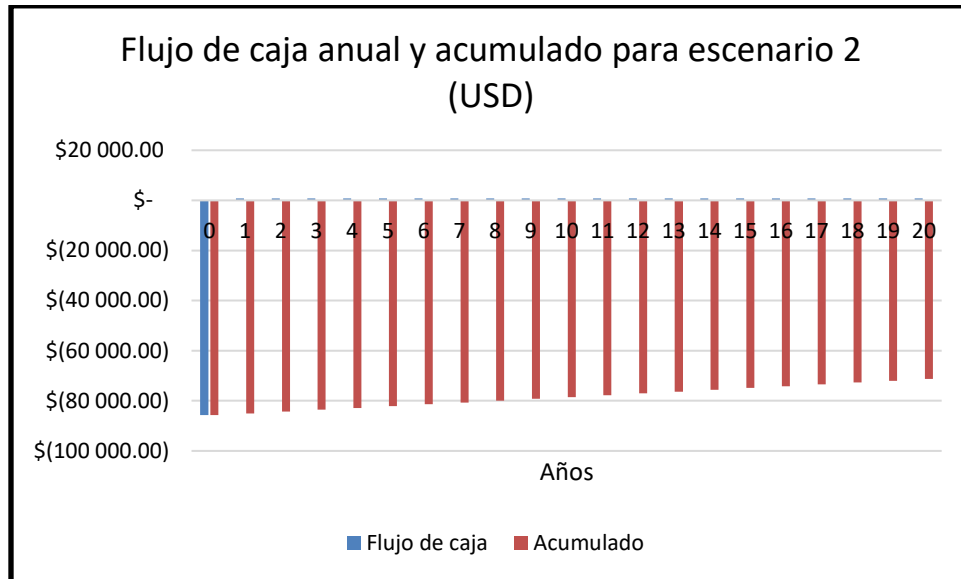
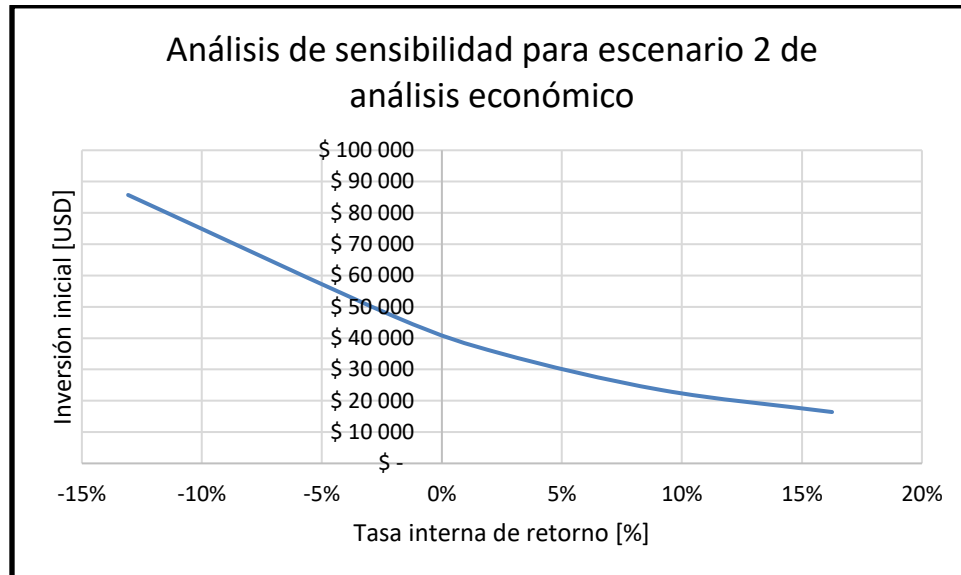


Figura 25: Flujo de caja y acumulado para el análisis económico del escenario 2

De acuerdo con la figura 25, se puede observar que el ingreso, para un sistema funcionando como Autogenerador a Pequeña Escala dentro del esquema tarifario de ENEL, para junio del 2025 no recibe un retorno para hacer económicamente viable la inversión. En ese orden de ideas se procede a realizar un análisis de sensibilidad variando el costo de la tecnología y observando la tasa interna de retorno, para que esta aplicación pueda ser empleada en sistemas conectados a la red comercial de energía



*Figura 26 Análisis de sensibilidad de la TIR vs inversión inicial para el retorno del
escenario 2.*

De acuerdo con la figura 26, se puede observar que los costos iniciales de esta tecnología son, para el momento de redacción de este trabajo, lo suficientemente altos como para no representar una inversión atractiva para los mantenedores de estaciones base. Sin embargo, se espera que con la maduración de la tecnología y disminución de costos (35% con respecto a la turbina híbrida más económica de la sección 6.5.1), se pueda generar un caso de negocio que atraiga las inversiones hacia sistemas de alimentación renovables con un TIR superior al 15%.

Capítulo 7

CONCLUSIONES.

- La caracterización del recurso eólico realizada en Bogotá y corregida a la altura operativa de la torre de comunicaciones arrojó un promedio de 4,02 m/s a 72m el cual, si bien es bajo para turbinas de eje horizontal (muchas de ellas tienen una velocidad de arranque de 4m/s), resulta adecuado para turbinas como la DS-700 debido a su baja velocidad de arranque lo que valida técnicamente su implementación
- Con la configuración y disposición propuesta para las turbinas en la estructura vertical, se lograría suplir el 63,9% de la carga demanda por una estación base 5G, lo que permitiría reducir la dependencia de fuentes convencionales sin comprometer la calidad de servicio y la operación continua del sistema
- El análisis estructural basado en la ANSI-TIA 222-G determinó que las cargas adicionales por peso y viento inducidas con la instalación de las turbinas corresponden al 6,3% de la fuerza total y al 10,9% del momento flector. Estos resultados indican que, si bien se requiere un análisis estructural puntual para cada caso, no compromete la integridad de la infraestructura si se siguen recomendaciones del refuerzo por persona calificada
- En el escenario de conexión del sistema a una estación base en una zona no interconectada, el sistema nos permite un ahorro de 3.685L de combustible anual. Esto se traduce en un ROI de aproximadamente 3 años, con una tasa interna de retorno del 36% y un valor presente neto positivo con una tasa de descuento del 20% anual ante una proyección de 20 años, evidenciando su conveniencia económica en este caso de negocio. Esto sobre una estación meteorológica en Bogotá.
- En el escenario de conexión del sistema a una estación base conectada al sistema interconectado nacional con entrega de excedentes como AGPE bajo la regulación CREG 174 de 2021, la inversión no resulta atractiva con una tasa interna de retorno negativa. De acuerdo con el análisis de sensibilidad se puede estimar una reducción

de costos del 65% para hacer este tipo de sistemas viables lo que destaca la necesidad de incentivos o subsidios para masificar este tipo de tecnología.

- La integración de microgeneradores eólicos con turbinas de eje vertical en estaciones base 5G podría contribuir a la descarbonización del sector TIC, alineándose con metas de transición energética y ofreciendo una alternativa resiliente y limpia. La viabilidad económica se tiene que evaluar para los todos los casos de usos en entornos urbanos y rurales

Referencias

- [1] Departamento Nacional de Planeación (DNP), «Departamento Nacional de Planeación,» 7 Julio 2023. [En línea]. Available: https://www.dnp.gov.co/Prensa_/Noticias/Paginas/el-plan-nacional-de-desarrollo-marca-la-ruta-de-la-transicion-energetica-del-pais.aspx. [Último acceso: 26 Mayo 2025].
- [2] E. A. Guauque Pesca, «Análisis aerodinámico de una microturbina eólica de eje vertical para la generación de energía eléctrica en una zona urbana de Bogotá, Colombia,» Bogotá, 2014.
- [3] A. Cusaria y J. Quiroga, «Análisis del potencial de generación de energía eólica en la zona del páramo de Chontales, municipios de Paipa y Sotaquirá, departamento de Boyacá a 3534 m.s.n.m.,» Bogotá, 2014.
- [4] D. Swinhoe, «DatacenterDynamics,» 21 Diciembre 2022. [En línea]. Available: Torres celulares autosuficientes; ¿Cuándo se desconectarán de la red en masa?. [Último acceso: Mayo 26 2025].
- [5] I. E. Maulani y C. A. Johansyah, «The Development of 5G Technology and its Implications For the Industry,» *Devotion: Journal of Research and Innovation*, vol. 4, n° 2, 2023.
- [6] M. Matracia, M. A. Kishk y M.-S. Alouini, «Exploiting Wind Turbine-Mounted Base Stations to Enhance Rural Connectivity,» 2021.
- [7] R. Hassanian, H. Myneni, Á. Helgadottir y M. Riedel, «Vertical Axis Wind Turbine Powers Telecom Towers: Green and Clean Configuration,» de *6th International Conference on Electrical Engineering and Green Energy (CEEGE 2023)*, Grimstad, 2023.
- [8] C. Handforth, «Closing the Coverage Gap: How Innovation Can Drive Rural Connectivity,» *Connected Society – GSMA*, Londres, 2019.
- [9] A. Ichimescu, N. Popescu y E. C. Popovici, «Energy Efficiency for 5G and Beyond 5G: Potential, Limitations, and Future Directions,» *Sensors*, vol. 24, n° 22, p. 7402, 2024.
- [10] T. Zsolt, «Review of Frequency Spectrum and Energy Consumption in 5G,» de *IEEE International Conference on Applied Electronics (CANDO-EPE 2019)*, Budapest, 2019.
- [11] N. S. Kurian, V. Nagaraju, L. Saravanan y V. Subashini, «Green Base Station Using WSN,» *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, vol. 9, p. 3660–3665, 2019.
- [12] Huawei Technologies Co., Ltd.; Analysys Mason, «Green 5G White Paper,» 2021.
- [13] Ericsson, «Breaking the Energy Curve,» Stockholm, Sweden, 2020.
- [14] J. Manwell, J. McGowan y A. Rogers, *Wind Energy Explained*, John Wiley & Sons, 2009.

- [15] Academia Aeronáutica Italiana, «Flight Mechanics for Pilots,» 2023. [En línea]. Available: https://tse1.mm.bing.net/th/id/OIP.MU4nQiqHHND_mauK58VcMwHaGx. [Último acceso: 2 Septiembre 2025].
- [16] M. Abdalrahman, A. F. Obed y H. A. Mohammed, «Performance Analysis of Darrieus Vertical Axis Wind Turbines with Modified Blade Shapes,» *Renewable Energy*, vol. 87, p. 897–906, 2016.
- [17] X.-H. Wang, J. S.-Y. Foo, A. Fazlizan, W.-T. Chong y K.-H. Wong, «Effects of endplates designs on the performance of Savonius vertical axis wind turbine,» *Energy*, vol. 2024, p. 133205, 2024.
- [18] Z. Shen, S. Gong, Z. Zuo, Y. Chen y W. Guo, «Darrieus vertical-axis wind turbine performance enhancement approach and optimized design: A review,» *Ocean Engineering*, vol. 311, n° 2, p. 118965, 2024.
- [19] HiVAWT, «Vertical Axis Small Wind Turbine Model DS700 Specification».
- [20] HiVAWT, «Vertical Axis Wind Turbine Power System Model: DS3000 Specification».
- [21] N. O. Jensen, «A Note on Wind Generator Interaction,» Riso National University, 1983.
- [22] F. Famoso, S. Brusca, D. D'Urso, A. Galvagno y F. Chiacchio, «A novel hybrid model for the estimation of energy conversion in a wind farm combining wake effects and stochastic dependability,» *Applied Energy*, vol. 280, p. 115967, 2020.
- [23] Telecommunications Industry Association (TIA), «Structural Standard for Antenna Supporting Structures and Antennas ANSI/TIA-222-G,» Arlington, VA, 2025.
- [24] Universidad Ean, «ColViento, la turbina eólica que busca transformar el acceso a energía limpia en zonas rurales y urbanas,» Universidad Ean – Noticias, 29 Mayo 2025. [En línea]. Available: <https://universidadean.edu.co/noticias/colviento-la-turbina-eolica-que-busca-transformar-el-acceso-energia-limpia-en-zonas-rurales-y-urbanas>. [Último acceso: 17 Junio 2025].
- [25] Energías Renovables (ER), «Kliux propone híbridos eólico-fotovoltaicos para abastecer de electricidad las antenas de telecomunicaciones,» 7 Mayo 2013. [En línea]. Available: <https://www.energias-renovables.com/eolica/kliux-propone-hibridos-eolicofotovoltaicos-para-abastecer-de-20130507>. [Último acceso: 2025 Junio 17].
- [26] ImpactAlpha, «Hybrico raises \$2 million to shift cell tower operators to green energy,» Mayo 2024. [En línea]. Available: <https://impactalpha.com/hybrico-raises-2-million-to-shift-cell-tower-operators-to-green-energy/>. [Último acceso: 17 Junio 2025].
- [27] S. Eriksson, H. Bernhoff y M. Bergkvist, «Design of a unique direct driven PM generator adapted for a telecom tower wind turbine,» *Renewable Energy*, vol. 44, pp. 453-456, 2012.
- [28] Wind-It, «BTE Towers: Built-To-Energy towers integrating scalable vertical wind turbines,» [En línea]. Available: <https://www.wind-it.fr/phone/bte-towers.html>. [Último acceso: 2025 Julio 22].
- [29] Agencia Nacional de Infraestructura, «Agencia Nacional de Infraestructura,» 25 Abril 2024. [En línea]. Available: <https://www.ani.gov.co/avanzan-las-obras-de-mejoramiento->

- del-aeropuerto-internacional-el-dorado?utm_source=chatgpt.com. [Último acceso: 1 Septiembre 2025].
- [30] J. A. Aragón-Moreno, E. D. Serna-Castaño y D. S. Solano-Romero, «Estudio climatológico de los vientos para la ciudad de Bogotá en el periodo 2010 – 2016,» *Entramado*, vol. 15, n° 2, pp. 286-307, 2019.
- [31] A. J. González Díaz, L. J. Geovo Coronado y Y. E. González Doria, «Diseño y modelamiento de un aerogenerador VAWT Darrieus tipo H para la zona costera del departamento de Córdoba,» *Ingeniare*, n° 20, pp. 33-46, 2016.
- [32] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), «Boletín Climatológico de Bogotá 2022,» IDEAM, Bogotá, 2022.
- [33] G. Tescione, J. Ragni, G. v. Bussel y D. Ragni, «Near-wake measurements of a vertical axis wind turbine in a wind tunnel,» de *Journal of Physics: Conference Series*, 2014.
- [34] Y. Liu, «The effect of vertical arrangement on performance and wake characteristics of two tandem offshore wind turbines under various operating conditions,» *Energy Conversion and Management*, vol. 278, p. 116743, 2023.
- [35] Ministerio del trabajo, «Resolución 4272 de 2021 - Por la cual se establecen los requisitos de trabajo mínimos de seguridad para el desarrollo de trabajos en altura,» 2021.
- [36] Etneo, «Turbina híbrida eólica vertical 700W,» [En línea]. Available: <https://etneo.com/prodotto/turbina-hibrida-eolica-vertical-700w/?lang=es>. [Último acceso: 17 Junio 2025].
- [37] Amazon.com, «FLTXNY POWER VAWT controlador industrial,» [En línea]. Available: <https://www.amazon.com/-/es/FLTXNY-POWER-VAWT-controlador-industrial/dp/B0BGRTX6RM?th=1>. [Último acceso: 17 Junio 2025].
- [38] AutoSolar, «Inversor Cargador Growatt SPF 3000TL LVM 24V,» [En línea]. Available: https://autosolar.co/inversores-cargadores-24v/inversor-cargador-growatt-spf-3000tl-lvm-24v?srsId=AfmBOoqe7iYkf4QDFnAkwlV4__AsQidsL5liEmbVJx_bZZnwm0b5RSnv. [Último acceso: 17 Junio 2025].
- [39] Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), «Resolución CREG 174 de 2021 – Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional,» Bogotá, Colombia , 2021.
- [40] Cummins®, «Cummins Onan Commercial Mobile Generators Pocket Guide (datasheet),» Cummins.
- [41] Ministerio de Hacienda y Crédito Público, «Conoce el precio de los combustibles que rige a partir del primero de enero de 2025,» [En línea]. Available: <https://www.minhacienda.gov.co/w/conoce-el-precio-de-los-combustibles-que-rige-a-partir-del-primero-de-enero-de-2025>. [Último acceso: 17 Junio 2025].

- [42] V. Kouloumpis, R. A. Sobolewski y X. Yan, «Performance and life cycle assessment of a small scale vertical axis wind turbine,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 247, p. 119520, 2019.
- [43] Enel Colombia S.A. E.S.P., «Pliego tarifario – junio de 2025,» Bogotá, Colombia, 2025.

ANEXO A: CÁLCULO DE VELOCIDAD DE VIENTO CORREGIDA POR ALTURA Y PÉRDIDAS POR ESTELA

1. Corrección por altura

Sobre los datos medidos en la estación meteorológica ubicado sobre el edificio de la terminal 1 del Aeropuerto el Dorado, y teniendo en cuenta que solo se cuentan con datos de una sola altura, se realiza por medio del método de Justus-Mikkail hallando el coeficiente cortante de viento por cada valor conocido. Se obtiene entonces los valores de altura y velocidad de viento para un tiempo determinado:

Fecha simple	Velocidad de viento (m/sec)	Altura (m)
6/11/2023 0:00	2.7	20

El coeficiente cortante de viento para cada valor de velocidad de viento se obtiene de la siguiente ecuación empírica:

$$\alpha = \frac{0.37 - 0.088(\ln(U_o))}{1 - 0.088(\ln(\frac{z_o}{10}))}$$

Donde:

$\alpha \rightarrow$ Coeficiente cortante del viento o coeficiente de Hellman

$z_o \rightarrow$ Altura de la medición

$U_o \rightarrow$ Velocidad de viento medida

Reemplazando los datos para ese dato particular de velocidad y altura se obtiene:

$$\alpha = 0.300095$$

La velocidad de viento a una altura z se obtiene de la siguiente ecuación:

$$U(z) = U_o \left(\frac{z}{z_o} \right)^\alpha$$

Teniendo en cuenta que se requiere calcular la velocidad de viento para un $z = 72\text{m}$, se procede con el cálculo teniendo en cuenta el coeficiente cortante de esta medición puntual obteniendo:

$$U(72) = 2.7 \frac{m}{s} \left(\frac{72}{20} \right)^{0.300095} = 3.97 \frac{m}{s}$$

Se aclara que debido a que la ecuación empírica para el cálculo del coeficiente de Hellman es función de la velocidad de viento, este cálculo se debe realizar de forma individual para cada medición.

2. Pérdidas por estela

Para realizar una estimación de pérdidas por estela, se debe tener en cuenta la dirección de viento (para observar el cuadrante de donde viene) y realizar el cálculo de velocidad de viento para cada una de las caras en ese momento

Fecha simple	Velocidad de viento corregida por altura (m/sec)	Dirección del viento (°)
6/11/2023 0:00	3.97	20

Se estima un área transversal de 6 metros para una estructura vertical de 60 metros de altura. En ese punto, y teniendo en cuenta que el viento proviene mayoritariamente del norte, se toma la velocidad de la cara norte de la estructura vertical como viento libre. Las caras este-oeste, de acuerdo con la figura 16, estarán a 4,24 m. Y la cara sur a 4,24 metros de las turbinas este-oeste

Las dos primeras caras afectadas son las este-oeste por la estela de la turbina de la cara norte, por esta razón se procede a realizar el cálculo de la velocidad de viento resultante

$$V(x) = V_o \left(1 - \frac{1 - \sqrt{1 - C_T}}{\left(1 + 2k \frac{x}{D} \right)^2} \right)$$

Donde:

$V(x)$

→ *Velocidad de viento en el área de influencia de la estela a una distancia x*

V_o → *Velocidad libre del viento*

C_T → *Coficiente de empuje*

k → *Coficiente de decaimiento*

D → *Diametro del rotor*

De acuerdo con [33] para un rotor Darrieus se pueden tomar como referencia $C_t = 0.4$ y $k = 0.12$. Para la medición ejemplo, se obtendría:

$$V(x) = 3.97 \frac{m}{s} \left(1 - \frac{1 - \sqrt{1 - 0.4}}{\left(1 + 2(0.12) \left(\frac{4.24}{1.93} \right) \right)^2} \right) = 3.5864 \frac{m}{s}$$

Para la turbina en la cara sur, ya se ve afectado el viento por la turbina de en la norte y las turbinas este-oeste. Por este motivo se realiza el mismo cálculo, pero tomando como velocidad libre del viento la resultante para las turbinas este-oeste obteniendo el siguiente resultado:

$$V(x) = 3.5864 \frac{m}{s} \left(1 - \frac{1 - \sqrt{1 - 0.4}}{\left(1 + 2(0.12) \left(\frac{4.24}{1.93} \right) \right)^2} \right) = 3.24 \frac{m}{s}$$

Esto se realizaba de forma independiente para cada medición del año calendario tomado.

ANEXO B. CÁLCULO DE GENERACIÓN POR CADA TURBINA EN LAS CARAS DE LA ESTRUCTURA VERTICAL

La energía anual generada del sistema se determinó a partir del cálculo individual de la generación estimada para las turbinas ubicadas en la cara frontal, lateral y posterior de la estructura de telecomunicaciones.

Para cada orientación se emplearon las mediciones de viento horarias durante un año calendario, los cuales fueron ajustados por altura y corregidos según las pérdidas por estela, determinadas mediante el modelo Jensen/PARK descrito en el anexo correspondiente.

Posteriormente, se construyó la frecuencia anual de ocurrencia del viento (histograma o distribución de Weibull) para cada cara, con el fin de ponderar la contribución energética de cada intervalo de velocidad. Dichas frecuencias se cruzaron con la curva de potencia de la turbina seleccionada, suministrada por el fabricante de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} & \text{Energía generada intervalo A (kWh)} \\ & = \frac{\text{Frecuencia de velocidad en intervalo A (h)} * \text{Potencia de turbina bajo velocidad en intervalo A (W)}}{1000} \end{aligned}$$

Los datos se pueden observar en la siguiente tabla:

Velocidad de viento (m/s)	Potencia generada turbina (W)	Frecuencia turbina frontal (horas al año)	Energía generada [kWh]	Frecuencia turbina lateral (horas al año)	Energía generada turbina lateral	Frecuencia turbina trasera (horas al año)	Energía generada turbina trasera
1	16.67	127	2.12	127	2.12	127	2.12
2	33.33	1483	49.43	2811	93.70	2811	93.70
3	58.33	1328	77.47	1378	80.38	2344	136.73
4	105.56	2344	247.42	1687	178.07	1699	179.34
5	158.33	721	114.16	978	154.85	660	104.50
6	233.33	978	228.20	330	77.00	608	141.87
7	341.67	330	112.75	790	269.92	222	75.85

Velocidad de viento (m/s)	Potencia generada turbina (W)	Frecuencia turbina frontal (horas al año)	Energía generada [kWh]	Frecuencia turbina lateral (horas al año)	Energía generada turbina lateral	Frecuencia turbina trasera (horas al año)	Energía generada turbina trasera
8	466.67	551	257.13	272	126.93	22	10.27
9	625.00	387	241.88	98	61.25	34	21.25
10	797.22	188	149.88	40	31.89	1	0.80
11	822.22	34	27.96	17	13.98	0	0.00
12	836.11	40	33.44	0	0.00	0	0.00
Total		8511	1541.83	8528	1090.09	8528	766.42

ANEXO C. CÁLCULO DE COMBUSTIBLE EVITADO A PARTIR DEL SISTEMA DE GENERACIÓN SOBRE LA ESTRUCTURA VERTICAL

El cálculo del combustible evitado por la integración del sistema eólico en la estructura vertical de telecomunicaciones se realizó con el propósito de cuantificar el beneficio energético y ambiental derivado de la sustitución parcial del consumo del generador diésel por la energía proveniente de las microturbinas.

El procedimiento partió de las frecuencias de ocurrencia del viento a partir de las cuales se obtuvo el cálculo de energía anual generada de acuerdo con el Anexo 2. Con esos mismos intervalos y a la regresión lineal empleada en la figura 22 se realizó el cálculo del combustible evitado de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Combustible evitado (L)} = 0.2737 * \text{Energía (kWh)} + 1,5195$$

Sin embargo, hay una consideración a tener en cuenta, para aumentar la confiabilidad del servicio de energía, el generador diésel debe estar permanentemente encendido. Por este motivo se tiene que tener en cuenta un valor de consumo sin carga (tomado como 1.1 L/h) que se descuenta del combustible evitado [39] .

En la siguiente tabla se pueden observar estos resultados:

Velocidad de viento (m/s)	Energía generada turbina frontal [kWh]	Energía generada turbina lateral	Energía generada turbina trasera	Combustible requerido [L/h]	Combustible evitado [L/h]	Combustible evitado total [L] turbina frontal	Combustible evitado total [L] turbina Lateral	Combustible evitado total [L] turbina trasera
1	2.12	2.12	2.12	1.52	0.42	53.86	53.86	53.86
2	49.43	93.70	93.70	1.53	0.43	635.65	1204.86	1204.86
3	77.47	80.38	136.73	1.54	0.44	578.30	600.07	1020.73
4	247.42	178.07	179.34	1.55	0.45	1051.03	756.43	761.82
5	114.16	154.85	104.50	1.56	0.46	333.70	452.65	305.47
6	228.20	77.00	141.87	1.58	0.48	472.73	159.51	293.88
7	112.75	269.92	75.85	1.61	0.51	169.29	405.28	113.89
8	257.13	126.93	10.27	1.65	0.55	301.52	148.85	12.04
9	241.88	61.25	21.25	1.69	0.59	228.55	57.88	20.08
10	149.88	31.89	0.80	1.74	0.64	119.89	25.51	0.64
11	27.96	13.98	0.00	1.74	0.64	21.91	10.96	0.00
12	33.44	0.00	0.00	1.75	0.65	25.93	0.00	0.00