

**MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL  
RECURSO EÓLICO PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA BASADO EN  
FLUJOS TURBULENTOS**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:  
MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL  
RECURSO EÓLICO PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA BASADO EN  
FLUJOS TURBULENTOS**

**AUTOR:  
NELSON ANTONIO CASTRO RODRÍGUEZ**

**TUTOR:  
CRISTIAN CRISTÓBAL CUJI CUJI**

**Quito, julio de 2018**

Nelson Antonio Castro Rodríguez

**MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL RECURSO  
EÓLICO PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA BASADO EN FLUJOS TURBULENTOS**

Universidad Politécnica Salesiana  
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:

**Nelson Antonio Castro Rodríguez** (Y'1983-M'15). Realizó sus estudios secundarios en el Colegio Nacional Técnico Ascázubi, se graduó de Técnico Industrial en Electricidad y Electrónica. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en el Modelamiento y simulación para la evaluación del recurso eólico para generación eléctrica basado en flujos turbulentos.  
[ncastror@est.ups.edu.ec](mailto:ncastror@est.ups.edu.ec)



Dirigido por:



**Cristian Cristóbal Cuji Cuji** (Y'1986-SM'03). Se graduó de Ingeniero Electrónico de la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador en 2014 y Máster en Energía, Facultad de Ciencias Físicas en la Universidad Complutense de Madrid – España en 2015. Actualmente es profesor e investigador en la Universidad Politécnica Salesiana - Quito Ecuador.  
[ccuji@ups.edu.ec](mailto:ccuji@ups.edu.ec)

**Todos los derechos reservados:**

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS  
©2017 Universidad Politécnica Salesiana  
QUITO-ECUADOR

### **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR**

Yo, Cristian Cristóbal Cuji Cuji declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL RECURSO EÓLICO PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA BASADO EN FLUJOS TURBULENTOS realizado por Nelson Antonio Castro Rodríguez, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, julio del 2018



.....  
Cristian Cristóbal Cuji Cuji

Cédula de identidad: 171800222-1

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Yo Nelson Antonio Castro Rodríguez, con documento de identificación N°1720273067, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación titulado: “MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL RECURSO EÓLICO PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA BASADO EN FLUJOS TURBULENTOS ”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIERO ELÉCTRICO, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



.....  
Nombre: Nelson Antonio Castro Rodríguez  
Cédula: 172027306-7  
Fecha: Quito, julio del 2018

## ***ÍNDICE GENERAL***

Resumen.....	1
Abstract.....	1
1. Introducción.....	2
1.1. La Energía Eólica.....	2
1.2. Arquitectura Bioclimática.....	3
2. Análisis de probabilidad de Viento y Recurso Energético.....	3
2.1. Ajuste No Lineal.....	6
2.2. Ajuste Lineal.....	7
2.3. Evaluación del Recurso Eólico con Datos de las mediciones realizadas.....	8
2.4. Potencia Suministrada por el Viento.....	10
2.5. Potencia Suministrada por el Generador Eólico.....	10
2.6. Planteamiento del problema.....	11
3. Evaluación del Recurso Eólico en Edificios.....	11
3.1. Ubicación de los aerogeneradores en los edificios.....	12
3.2. Evaluación de Recurso Energético Eólico Turbulento.....	16
4. Conclusiones.....	18
5. Trabajos futuros.....	18
6. Referencias.....	19
6.1. Estado del arte.....	21

## ***ÍNDICE DE FIGURAS***

Figura 1. Aprovechamiento de recurso eólico en flujos turbulentos. ....	2
Figura 2. Registro de velocidades de viento desde enero 2007 a octubre 2017 en la estación Carapungo. ....	5
Figura 3. Representación en barras de datos procesados estación Carapungo. ....	5
Figura 4. Ajuste no lineal de la función de Weibull .....	7
Figura 5. Ajuste lineal de datos.....	8
Figura 6. Ajuste lineal de la distribución de Weibull a los datos estación Carapungo. ....	8
Figura 7. Modelo del generador eólico SmarttWister ST-1000.....	9
Figura 8. Curva de potencia del generador eólico. ....	9
Figura 9. Probabilidad de trabajo del generador en intervalo 1 m/s a 10 m/s.....	9
Figura 10. Vista superior de un edificio al ser sometido a una velocidad de viento de 5 m/s.....	12
Figura 11. Plano lateral del edificio visualización de direcciones de viento. ....	12
Figura 12. Zonas en donde el viento aumenta en mayor magnitud su velocidad vista frontal a la dirección del viento .....	13
Figura 13: Análisis turbulencia de viento vs altura de edificio.....	14
Figura 14. Análisis del viento con respecto a la altura de las edificaciones. ....	14
Figura 15. Análisis de Velocidad vs altura del edificio. ....	15
Figura 16. Probabilidad de trabajo del aerogenerador a 21 metros de altura.....	17
Figura 17. Ajuste de la curva de potencia del aerogenerador .....	17

## ***ÍNDICE DE TABLAS***

Tabla 1. Estaciones meteorológicas ubicadas en el Distrito Metropolitano de Quito. ....	4
Tabla 2: Análisis de Velocidades desde el año 2007 - 2017.....	5
Tabla 3. Resumen de datos estadísticos estación Carapungo .....	7
Tabla 4. Resumen de Resultados .....	8
Tabla 5: Algoritmo evaluación del recurso eólico .....	11
Tabla 6: Velocidades de viento en la simulación.....	13
Tabla 7. Variación de la velocidad del viento con respecto a la altura.....	15
Tabla 8. Variación de la velocidad del viento con respecto a la altura velocidad inicial 4.5 m/s.....	16
Tabla 9. Nuevos Valores de Velocidad de Viento Obtenidos para la estación Carapungo a 21 metros de Altura.....	16
Tabla 10. Ajuste de la potencia del aerogenerador a los datos de la curva de función de distribución de Weibull.....	17
Tabla 11. Resumen de resultados cálculo de la potencia y energía total producida. ....	18

# MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL RECURSO EÓLICO PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA BASADO EN FLUJOS TURBULENTOS

## Resumen

A continuación, se presentan los resultados de la evaluación del recurso eólico en las zonas urbanas. Enfocando el análisis en flujos de vientos no laminares o vientos turbulentos. Mismos que se presentan en mayor magnitud cuando el viento entra en contacto con superficies accidentadas geográficamente o al encontrar obstáculos como montañas, valles, bosques, construcciones artificiales o edificaciones, vías, calles presentes en ciudades, etc... Lo que ocasiona que el viento turbulento alcance mayores velocidades y cambios de direcciones que en flujo laminar no podrían ser aprovechados para la generación de energía eléctrica.

Entre los resultados de la investigación se ha logrado realizar una evaluación del potencial energético presente en este tipo de escenarios, apoyados en simulaciones realizadas en programas computacionales como Autodesk CFD, el mismo que permite el planteamiento de diferentes escenarios que se podrían presentar y ayuda en la toma de decisiones, para conocer el mejor lugar de una infraestructura donde sea factible instalar microturbinas. Los datos obtenidos pueden ser analizados matemáticamente con el objetivo de conocer de manera más precisa el potencial eléctrico de dichas microturbinas.

La evaluación del recurso energético presente ha permitido llegar a cuantificar la potencia eléctrica que se obtiene mostrando resultados favorables y abriendo una nueva alternativa para la generación de fuentes de energía eléctrica que nos permitan reducir el impacto medioambiental a nuestro planeta.

**Palabras Clave:** Electricidad, eólico, Generación, turbulencia, Velocidad de Viento.

## Abstract

The results of the evaluation of the wind resource in urban areas are presented below. Focusing the analysis on flows of non-laminar winds or turbulent winds. Same as they occur in greater magnitude when the wind comes into contact with geographically uneven surfaces or when encountering obstacles such as mountains, valleys, forests, artificial constructions or buildings, roads, streets present in cities, etc. Which causes the turbulent wind to reach higher speeds and changes of directions than in laminar flow could not be used for the generation of electric power.

Among the results of the research, an evaluation of the energy potential present in this type of scenarios has been achieved, supported by simulations carried out in computer programs such as Autodesk CFD, which allows for the presentation of different scenarios that could be presented and helps in the making decisions, to know the best place of an infrastructure where it is feasible to install microturbines. The data obtained can be analyzed mathematically with the aim of knowing more precisely the electric potential of said microturbines.

The evaluation of the present energy resource has allowed to quantify the electric power that is obtained showing favorable results and opening a new alternative for the generation of electric energy sources that allow us to reduce the environmental impact to our planet.

**Keywords:** Electricity, wind, Generation, turbulence, Wind speed.

# 1. Introducción

El viento es un fenómeno meteorológico que aparece en la superficie terrestre por causas naturales originado por el movimiento de traslación y rotación de la tierra, el mismo que puede ser considerado como un recurso presente en la naturaleza para la generación de energía eléctrica la cual forma parte fundamental en el desarrollo de la sociedad [1], [2]. Esto ha llevado a que existan diferentes fuentes de generación de

electricidad que no son amigables con nuestro planeta, como por ejemplo las centrales termoeléctricas que utilizan combustibles fósiles para su funcionamiento [3], por lo que cada vez los gobiernos se ven en la necesidad de impulsar la generación eléctrica por medio de centrales que sean amigables con el medio ambiente, con la finalidad de mitigar la destrucción de nuestro planeta [3].



Figura 1. Aprovechamiento de recurso eólico en flujos turbulentos.

Actualmente, los gobiernos son más conscientes en cuanto al impulso que se debe dar para crear energía eléctrica mediante fuentes renovables [4], por ejemplo agua, aire, radiación solar, etc...una de estas fuentes que cada vez toma más impulso es la utilización del potencial eólico para generación eléctrica, lo cual queremos desarrollar en este documento científico [5].

## 1.1. La Energía Eólica

La energía eólica es aquella que se la obtiene a partir del viento, es decir con el aprovechamiento de la energía cinética generada por las corrientes de aire, y que es convertida en otras formas de

energía para las actividades humanas. En la actualidad la energía eólica es utilizada para generar energía eléctrica por medio de aerogeneradores que se pueden conectar a la red eléctrica de distribución [6], [7].

Los parques eólicos suponen una fuente de energía cada vez más barata y competitiva frente a otros tipos de fuentes de energía convencionales. Incluso podría ser de mucha ayuda para poder llevar energía eléctrica a lugares muy alejados en donde por diferentes circunstancias no es posible llegar con redes convencionales de energía eléctrica [8].

El interés que ha despertado la generación de energía eléctrica con el aprovechamiento del

potencial eólico ha llevado a que muchos gobiernos apunten a la creación de parques eólicos en diferentes sitios, por ejemplos en planicies, llanuras, o incluso a orillas del mar en donde la energía del viento es más fuerte y estable que en tierra [9], [10].

El viento es un recurso abundante, renovable y limpio, que nos ayuda a disminuir muy significativamente el gran impacto ambiental provocado por generación de energía eléctrica a través de otras fuentes, con ello se disminuye la emisión de gases de efecto invernadero. La energía eólica es considerada una gran alternativa para la generación eléctrica desde el punto de vista social y del medio ambiente [11], [12]. Se debe de considerar varios factores locales que influyen o determinan la intensidad y periodicidad del viento, el conocimiento exhaustivo del comportamiento del viento es esencial para este tipo de centrales de generación eléctrica [13].

En este trabajo se realiza la evaluación del potencial eólico existente en las zonas pobladas, realizando simulaciones de viento en escenarios que tengan gran similitud con las mismas, para determinar cuál sería el aprovechamiento que se puede dar a este recurso natural en la generación de energía eléctrica; el viento choca contra las paredes de los edificios provocando túneles de viento en donde se produce un cambio repentino tanto en magnitud de velocidad como de dirección [14], este trabajo contempla el análisis de estos tipos de escenarios aprovechando el choque del viento en las paredes de los edificios de las ciudades, donde se determina mediante simulaciones y modulaciones matemáticas cuanta cantidad de energía cinética proveniente del viento se puede aprovechar para dar movimiento a la turbina de un generador eólico y mediante esta generar energía eléctrica limpia y amigable con el medio ambiente.

## **1.2. Arquitectura Bioclimática**

Un nuevo concepto de arquitectura es la llamada arquitectura bioclimática, la misma que consiste en el diseño de edificios o viviendas considerando el mayor aprovechamiento de los recursos naturales como sol, viento, flora, lluvia, etc... para la reducción de los impactos medioambientales procurando reducir al mínimo

el consumo de energía eléctrica o creando sus propias fuentes de energía para su normal funcionamiento [15],[16]. El concepto del ahorro forma parte de este tipo de arquitectura ya que teniendo en consideración los diferentes recursos ya mencionados el consumo energético es reducido, brindando las mismas comodidades a los habitantes que en ella habitan [17].

En este documento se considera este tipo de arquitectura bioclimática, ya que las edificaciones futuras pueden ser diseñadas pensando en una nueva fuente propia para la generación de energía eléctrica utilizando el recurso eólico existente en cada zona geográfica.

## **2. Análisis de probabilidad de Viento y Recurso Energético.**

El viento se origina con el desigual calentamiento de la atmosfera terrestre, según estudios el 2% de la radiación proveniente del sol es transformada en energía eólica [11]; el potencial eólico urbano es uno de los fenómenos que mayor dificultad presenta al momento de querer realizar su evaluación para obtener de este, energía cinética, que nos permita aprovechar la misma para mover las paletas de un aerogenerador, esto se da principalmente por la alta cantidad de obstáculos con los que el viento se encuentra al momento de llegar a las zonas urbanas, por ejemplo podemos mencionar las edificaciones, variaciones de pendientes, relieves en que se encuentran las ciudades, etc.[11]

La capacidad de generación de una turbina eólica depende principalmente de la velocidad del viento [18], y este a su vez depende de varios factores como la humedad, la altura, la zona geográfica [19], además sumar los otros factores mencionados al momento de ingresar a la zona urbano, por lo que se hace difícil la estimación de este potencial para la generación del recurso eólico en zonas urbanas donde el flujo del viento deja de ser lineal y pasa a ser turbulentos [20].

Considerando la importancia de generar energía eléctrica limpia que contribuya al mejoramiento de la vida humana sin causar destrucción al medio ambiente se desarrolla la evaluación de este recurso para generar energía eléctrica en zonas urbanas. Se plantea el desarrollo de este trabajo de investigación basados en datos

recopilados de las mediciones del viento realizadas en la ciudad del Distrito Metropolitano de Quito, los mismos que han sido tomados de la página web de la secretaria de ambiente municipal, que resumen datos de mediciones desde el año 2004 hasta el año 2017 [21]. Los cuales se encuentran a disposición pública.

El Distrito Metropolitano de Quito cuenta con una red de monitoreo permanente, la cual adopta el nombre de red metropolitana de monitoreo atmosférico de quito (REMMAQ). La cual tiene como finalidad producir datos confiables sobre las diferentes condiciones climatológicas y concentración de contaminantes atmosféricos en el territorio del Distrito Metropolitano de Quito que sirvan como insumo para la planificación, formulación, ejecución y evaluación de políticas y acciones orientadas al mejoramiento de la calidad del aire y difundir esta información en condiciones comprensibles para el público en general [21].

Cuenta con 8 estaciones instaladas en el Distrito Metropolitano de Quito con la capacidad de realizar el monitoreo permanente y automático de las condiciones climáticas que se den en el distrito, y así poder analizar continuamente los eventos que se pudieran presentar.

**Tabla 1.** Estaciones meteorológicas ubicadas en el Distrito Metropolitano de Quito.

Nombre	Coord. Geográfica	Altitud (msnm)
Carapungo	78°26'50" W, 0°5'54" S	2660
Cotocollao	78°29'50"W, 0°6'28" S	2739
Jipijapa	78°28'48" W, 0°09'36" S	2781
Belisario	78°29'24" W, 0°10'48" S	2835
El Camal	78°30'36" W, 0°15'00" S	2840
Centro	78°30'36" W, 0°13'12" S	2820
Tumbaco	78°24'00" W, 0°12'36" S	2331
Los Chillos	78°27'36" W, 0°18'00" S	2453

Estas estaciones mencionadas en la Tabla 1, nos presentan datos de mediciones de velocidad de viento desde enero del 2004 hasta octubre del 2017, los mismos que son presentados en formatos resumidos de cuál ha sido el promedio por hora durante las 24 horas de todos los días comprendidos en este lapso de tiempo, esto representa una base de datos bastante amplia, para poder realizar un estudio sobre el

comportamiento del viento en el Distrito Metropolitano de Quito [21] [7], y aprovechar los resultados, teniendo como objetivo el aprovechamiento de este potencial eólico para generación de energía eléctrica, esto puede ser aplicando microturbinas de generación eléctrica que aproveche la energía cinética del viento.

Los datos recopilados fueron sometidos a un análisis tanto cualitativo como cuantitativo, apoyado con la función de distribución de Weibull esto debido a la gran variabilidad que presenta el potencial eólico y más aún cuando estamos realizando este tipo de análisis en zonas turbulentas.

Para este análisis vamos a tomar como referencia la función de distribución de Weibull [1], [22], cuya ecuación se muestra en (1), la cual depende de dos parámetros denominados, c y k, donde c, representa el factor de escala de curva de distribución de Weibull y k, representa el factor de forma de la misma función de distribución, la cual presenta variación en función de los datos que son analizados.

$$f(x) = \frac{k}{c} \left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

Donde:

$$(k > 0, x > 0, c > 1)$$

- f(x) : Función de probabilidad
- k : Factor de forma de la curva de la distribución de Weibull.
- c : Factor de Escala de la curva de la distribución de Weibull.

Para realizar el análisis de los datos de manera rápida y confiable se utiliza el programa de cálculo computacional Matlab, el mismo que nos servirá de apoyo durante todo el desarrollo de esta investigación [23] , este programa ha permitido mostrar resultados como los que se puede apreciar en la Figura 2, donde se observa como varía la velocidad del viento en la estación Carapungo a la cual la vamos a tomar como base para este análisis, en el periodo comprendido desde enero 2007 a octubre 2017. Los resultados del análisis y valores promedios se presentan a continuación en la Figura 2.

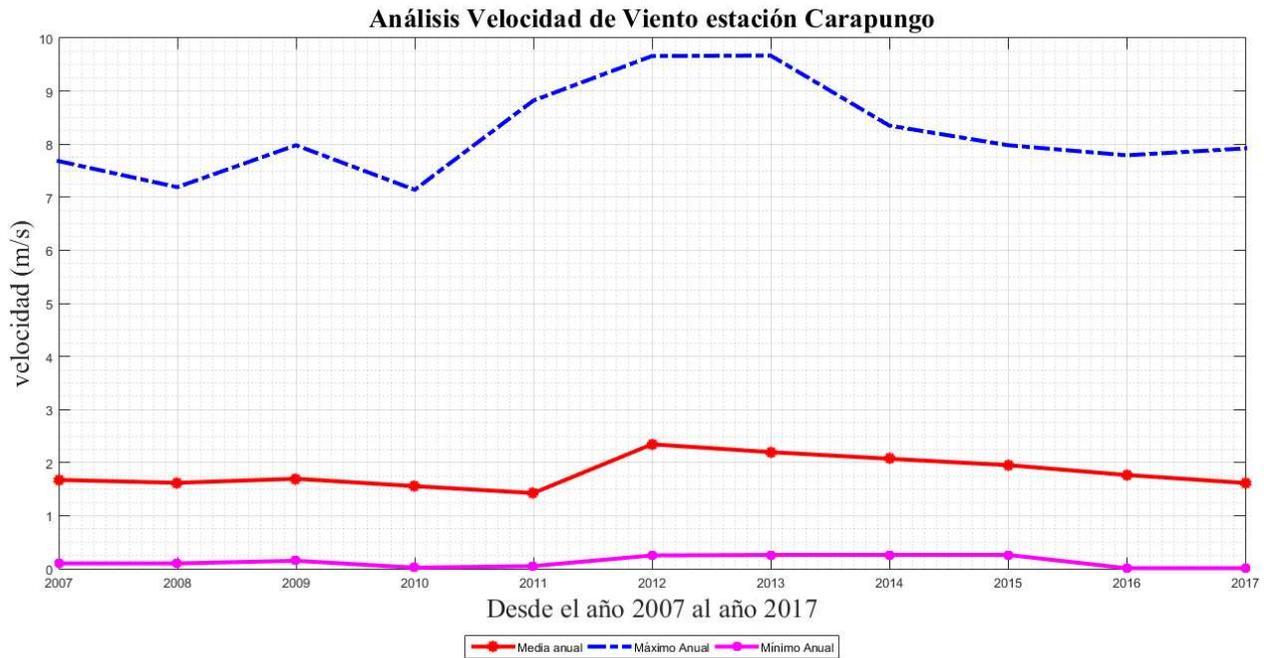


Figura 2. Registro de velocidades de viento desde enero 2007 a octubre 2017 en la estación Carapungo.

En la Figura 2, se observa que la velocidad del viento varía en relación con el tiempo, alcanzando un valor máximo de velocidad en este lapso de 9,67 m/s, y manteniendo una velocidad media de 1.8 m/s. Para la mejor apreciación los resultados son mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2: Análisis de Velocidades desde el año 2007 - 2017.

Año	Media anual m/s	Máxima anual m/s	Mínima anual m/s
2007	1,67	7,68	0,10
2008	1,62	7,19	0,10
2009	1,69	7,98	0,15
2010	1,56	7,14	0,02
2011	1,43	8,82	0,05
2012	2,34	9,66	0,25
2013	2,20	9,67	0,26
2014	2,07	8,35	0,26
2015	1,95	7,98	0,26
2016	1,77	7,79	0,01
2017	1,62	7,92	0,01

Datos que nos servirán para partir nuestro estudio y simulaciones al respecto. Realizando el análisis correspondiente a los datos recopilados de la estación Carapungo en el programa de cálculo ya mencionado anteriormente se logró una proyección visual de como varía el viento en relación con el tiempo, lo cual es mostrado en gráficas de barras de la Figura 3, mismas que son

utilizadas para la evaluación del recurso eólico; se aprecia claramente que la mayor cantidad de medidas de viento se encuentran entre 0 y 4 m/s a la vez se observa la existencia de medidas que sobrepasan los 9 m/s, pero que la cantidad de muestras presentadas son bajas en comparación con las muestras presentes de velocidades de vientos por debajo de los 4 m/s.

Como se lo mencionó anteriormente se parte de este primer análisis, para posterior realizar la cuantificación del potencial eólico que sería aprovechable para la generación de energía eléctrica.

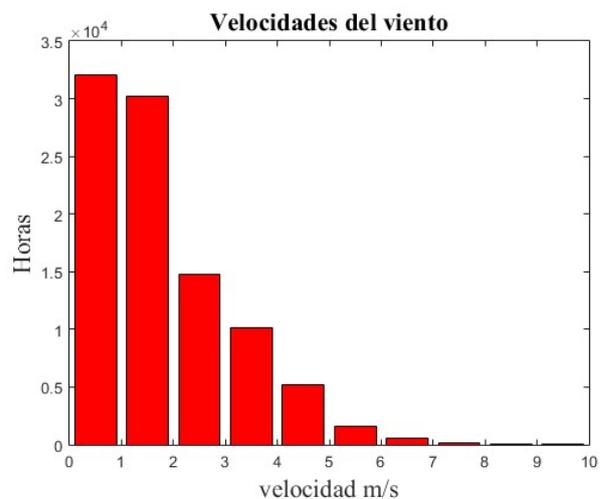


Figura 3. Representación en barras de datos procesados estación Carapungo.

Con estos datos procesados y mostrados en la Figura 3, ya podemos tener una idea más clara de la variación de las mediciones del viento, ahora nos apoyaremos en la función de distribución de Weibull, para realizar nuestro análisis.

Weibull cuya función ya se presentó en la ecuación (1), en donde se mencionó que toma dos parámetros los cuales son  $c$  y  $k$ , con los datos adquiridos se realiza el cálculo de estos parámetros con los cuales se efectúa el ajuste a la función de distribución los mismos que corresponden a los datos recopilados de la estación Carapungo la cual es nuestro caso de estudio.

Para lograr nuestro objetivo el cual es ajustar los datos a la función de distribución de Weibull, existen 2 maneras de hacerlo, la primera es mediante un ajuste no lineal, y la segunda es mediante un ajuste lineal; estas dos maneras se las presenta a continuación.

## 2.1. Ajuste No Lineal

El Ajuste no lineal permite determinar los valores de los parámetros  $c$  y  $k$  de la función de distribución de Weibull [24], para esto se utilizan datos de frecuencia en las que se dan las repeticiones de los valores dentro de nuestra toma de datos medidos de viento, apoyados en el programa de cálculo con la utilización del comando `nlinfit`, se hace el ajuste para determinar los parámetros  $c$  y  $k$ , de la función de distribución.

La utilización del comando `nlinfit` nos permite encontrar la respuesta más favorable a los datos experimentales lo cual se detalla a continuación:

Partiendo de valores de datos  $X_j$  y  $Y_j$  se trata de calcular valores de coeficientes  $a$  y  $b$  que mejor se ajusten a los datos experimentales.

Si  $(X_j, Y_j)$  son las coordenadas de un dato experimental, a la abscisa  $X_j$  le corresponde la ordenada.

$$y = \frac{a}{x_j} + \frac{b}{x_j} \quad (2)$$

Donde:

- a: Coeficientes que mejor se ajustan a los
- b: datos experimentales

$X_j$ : Dato experimental en el eje de las abscisas.

$y$ : Valor al cual le corresponde el dato experimental en el eje de las ordenadas.

La diferencia es:

$$d_j = y_j - \frac{a}{x_j} - bx_j \quad (3)$$

Se calcula los Valores de los parámetros  $a$  y  $b$ , que hacen que la suma

$$S(a, b) = \sum_1^m d_j^2 = \sum_1^m \left( y_j - \frac{a}{x_j} - bx_j \right)^2 \quad (4)$$

Sea mínima.

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 0 \quad (5)$$

$$\sum_1^m 2 \left( y_j - \frac{a}{x_j} - bx_j \right) \left( -\frac{1}{x_j} \right) = 0 \quad (6)$$

$$\left( \sum_1^m \frac{1}{x_j^2} \right) a + mb = \sum_1^m \frac{y_j}{x_j} \quad (7)$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = 0 \quad (8)$$

$$\sum_1^m 2 \left( y_j - \frac{a}{x_j} - bx_j \right) (-x_j) = 0 \quad (9)$$

$$ma + \left( \sum_1^m x_j^2 \right) b = \sum_1^m x_j y_j \quad (10)$$

Resolviendo el sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas para determinar los coeficientes de  $a$  y  $b$ .

$$b = \frac{m \left( \sum_1^m \frac{y_j}{x_j} \right) - \left( \sum_1^m \frac{1}{x_j^2} \right) \left( \sum_1^m x_j y_j \right)}{m^2 \left( \sum_1^m x_j^2 \right) - \left( \sum_1^m \frac{1}{x_j^2} \right)} \quad (11)$$

$$a = \frac{\left( \sum_1^m x_j y_j \right) - \left( \sum_1^m x_j^2 \right) b}{m} \quad (12)$$

lo cual lo presentamos de forma gráfica con sus respectivos valores en la Figura 4.

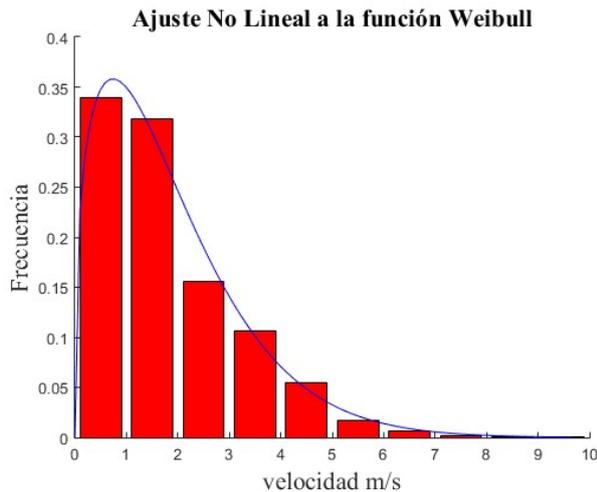


Figura 4. Ajuste no lineal de la función de Weibull

Mediante este ajuste No Lineal se obtuvo los parámetros  $c$  y  $k$ , los cuales se constituyen en valores referenciales solo para la estación Carapungo la cual se encuentra en el Distrito Metropolitano de Quito los mismos que se presentan a continuación:

$$k = 1.340$$

$$c = 2.0497$$

## 2.2. Ajuste Lineal

Para poder determinar nuestro ajuste lineal de la distribución de Weibull resulta necesario trabajar con la frecuencia acumulada [25], la cual se resume en la Tabla 3 y nos ayudará a determinar al igual que en el caso anterior nuestros valores de  $c$  y  $k$ , que más se ajusten a nuestro registro de datos:

Tabla 3. Resumen de datos estadísticos estación Carapungo

Orden i	Vel m/s x	Obser w	Frec f	Frec. Acum F
1	0,5	32113	0,3389	0,3389
2	1,5	30184	0,3185	0,6574
3	2,5	14784	0,1560	0,8134
4	3,5	10113	0,1067	0,9202
5	4,5	5168	0,0545	0,9747
6	5,5	1572	0,0166	0,9913
7	6,5	599	0,0063	0,9976
8	7,5	181	0,0019	0,9995
9	8,5	39	0,0004	0,9999
10	9,5	7	0,0001	1,0000

De la expresión de frecuencia acumulada, la cual la detallamos en la ecuación (13).

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{c}\right)^k\right] \quad (13)$$

Realizamos el despeje de  $1-f(x)$ , y tomamos 2 veces logaritmos neperianos, con lo cual obtenemos la ecuación (14).

$$\ln[-\ln(1 - F(x))] = k \ln(x) - k \ln(c) \quad (14)$$

Lo cual es la ecuación de una recta de pendiente  $a$  y de ordenada en el origen  $b$ , la misma que se detalla en la ecuación (15).

$$z = au + b \quad (15)$$

Donde  $u$  y  $z$  son variables.

$$z : \quad \ln[-\ln(1 - F(x))]$$

$$a : \quad k$$

$$u : \quad \ln(x)$$

$$b : \quad -k \ln(c)$$

En base a este análisis y con la utilización del comando polyfit, el cual ajusta los pares de datos a un polinomio de grado  $n$ .

Conocidos los  $n$  pares de datos  $(x_i, y_i) i = 1, 2 \dots n$  se resuelve el sistema de  $n$  ecuaciones para determinar las incógnitas, los coeficientes  $a_1, a_2, a_3$  del polinomio que mejor se ajustan a los datos.

$$y = a_1 x^2 + a_2 x + a_3 \quad (16)$$

De la matriz de datos

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_n^2 & x_n & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \quad (17)$$

Como se lo puede apreciar en la Figura 5.

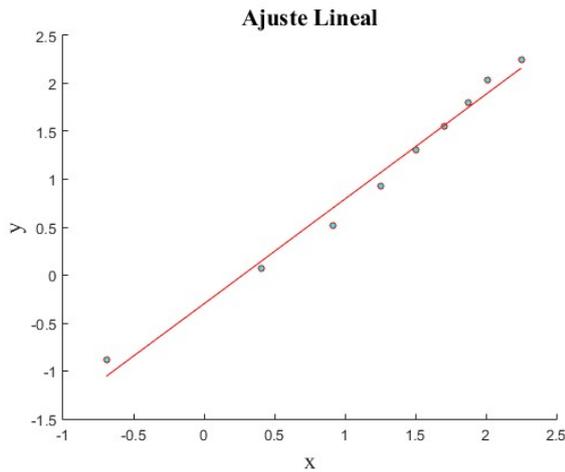


Figura 5. Ajuste lineal de datos.

Al igual que en nuestro caso anterior necesitamos determinar los valores de  $p(1)$  y  $p(2)$ , los cuales son los siguientes:

$$\begin{aligned} p(1) &= 1.0919 \\ P(2) &= -0.2986 \end{aligned}$$

La pendiente de la recta de ajuste  $p(1)$  es  $k$  cuyo valor corresponde a  $k=1.0919$ , el parámetro  $c$  se calcula a partir de  $k$  y la ordenada en el origen  $p(2)$ , lo cual queda de la siguiente manera.

$$k = p(1) \quad (18)$$

$$c = \exp\left(-\frac{p(2)}{k}\right) \quad (19)$$

Remplazando los valores de  $k$  y  $p(2)$  en la ecuación (19) nos queda:

$$\begin{aligned} k &= 1.0919 \\ c &= 1.3145 \end{aligned}$$

Se observa que los valores obtenidos de  $c$  y  $k$  difieren de los valores determinados mediante un ajuste no lineal, es decir con un ajuste no lineal se obtienen valores más cercanos a la realidad lo cual nos ayuda a determinar mejores resultados en cálculos futuros.

En la siguiente Figura 6 se observa cómo se ajusta la distribución de Weibull a los datos mediante un ajuste lineal, la curva realizada mediante este método no se ajusta de manera muy proporcional a los datos de las mediciones realizadas a nuestro caso de estudio.

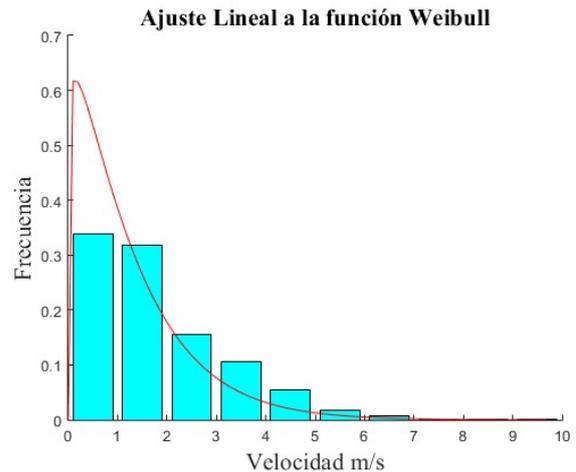


Figura 6. Ajuste lineal de la distribución de Weibull a los datos estación Carapungo.

Para realizar la comparación de resultados entre un método a otro se muestra la Tabla 4, en donde se encuentran también el resultado de análisis estadístico convencional.

Tabla 4. Resumen de Resultados

	Método Estadístico	Weibull Ajuste No Lineal	Weibull Ajuste Lineal
c	-	1.3400	1.0919
k	-	2.0497	1.3145
Media	1.8286	1.8821	1.2715
Estándar	1.3080	1.4190	1.1657

Como ya se mencionó anteriormente, la magnitud de los datos varía de un método a otro, lo cual puede provocar grandes variaciones de resultados lo más recomendable cuando se realiza análisis de viento es trabajar con el ajuste no lineal de Weibull, debido que los factores de  $c$  y  $k$  son los que hacen que Weibull de ajuste lo más próximo a los datos que se vayan a analizar.

En nuestro caso para continuar con el desarrollo de este trabajo de investigación, tomaremos como válidos los datos determinados con el ajuste no lineal de la función de distribución de Weibull los cuales los podemos observar en la Tabla 4.

### 2.3. Evaluación del Recurso Eólico con Datos de las mediciones realizadas.

Una vez realizado el análisis de los datos, tomamos como más próximos los resultados determinados por medio de la distribución de Weibull [1] mediante un ajuste no lineal, y se

procede a realizar la evaluación del recurso eólico, considerando un generador eólico existente en el mercado el mismo que se detalla a continuación.

El generador eólico adoptado para nuestro caso de estudio es el modelo smartwister-st-1000w [26]. El cual es de eje vertical con hélice helicoidal, esto nos ayuda en este tipo de condiciones ya que estamos trabajando con vientos turbulentos y no es posible determinar con precisión la dirección de este, comienza a funcionar con vientos de 1 m/s y alcanza su funcionamiento nominal cuando alcanza los 7.55 m/s [25], además entre sus características es muy silencioso considerando que es un equipo para instalación en zonas urbanas, como descripción podemos observar la

Figura 7, correspondiente a la ubicación de este tipo de aerogeneradores en los edificios de las zonas urbanas.



Figura 7. Modelo del generador eólico SmartWister ST-1000

Con datos aportados por el fabricante se ha determinado la curva de potencia del aerogenerador, la cual se presenta en la Figura 8. En esta figura se puede observar que la generación de energía eléctrica tiene su inicio cuando el aerogenerador recibe una velocidad de viento de 1 m/s, y alcanza su funcionamiento nominal de trabajo cuando el viento que recibe es de 7.55 m/s, manteniéndose a su máximo nivel de generación cuando el viento sobrepasa los valores de 7.55 m/s, es necesario mencionar que el aerogenerador no presenta desconexión o sale de funcionamiento sino, hasta cuando se alcanzan más de 25 m/s, los cual puede darse en caso de tormentas, tornados, etc.

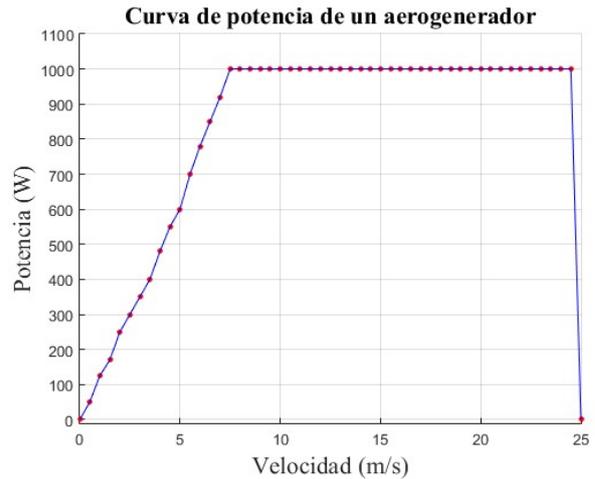


Figura 8. Curva de potencia del generador eólico.

Para la evaluación de nuestro recurso eólico existente en la ciudad, partiremos de la curva de distribución de Weibull [27], la cual ya encontramos anteriormente, además consideraremos los datos del generador eólico SmartWister st-1000 con lo cual realizaremos una evaluación para generar energía eléctrica, como se muestra a continuación.

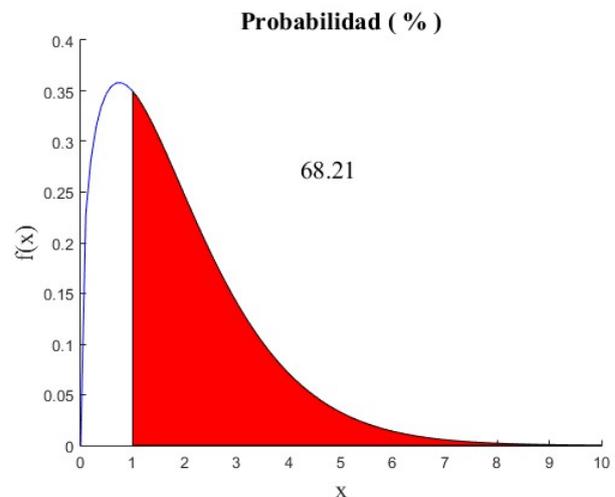


Figura 9. Probabilidad de trabajo del generador en intervalo 1 m/s a 10 m/s.

En la Figura 9, se observa con color rojo el intervalo en el cual trabajará nuestro generador eólico, a su vez se manifiesta que la probabilidad de trabajo será de un 68.21 %.

El tiempo de funcionamiento del generador es calculado a partir del rango antes mencionado que va desde 1 m/s a 7 m/s, ya que en nuestro caso de estudio la velocidad máxima del viento es 9.67 m/s y nuestro equipo puede soportar velocidades máximas de hasta 25 m/s, luego de

lo cual se procederá a su desconexión y bloqueo respectivamente.

En el modelo estadístico de Weibull la probabilidad de que la velocidad del viento (x) se encuentre el rango x0 y x1, estará determinado por la ecuación (20).

$$P(x_0 \leq x \leq x_1) = \int_{x_0}^{x_1} f(x) \cdot dx$$

$$P(x_0 \leq x \leq x_1) = \exp\left[-\left(\frac{x_0}{c}\right)^k\right] - \exp\left[-\left(\frac{x_1}{c}\right)^k\right] \quad (20)$$

Donde:

- P: Probabilidad
- x: Velocidad del viento
- x0: Rango de inicio Trabajo del generador
- x: Rango Máximo del Generador
- c, k: Coeficientes Distribución de Weibull

Remplazando los valores de los parámetros  $c=2.0497$  y  $k=1.340$ ; los cuales se calcularon anteriormente mediante Weibull, nos daría un resultado de 64630 horas de trabajo del generador eólico durante los diez años de mediciones realizadas.

#### 2.4. Potencia Suministrada por el Viento.

La potencia que aporta el viento está determinada por la ecuación (21).

$$P_v = A \frac{1}{2} \rho x^3 \quad (21)$$

Donde:

- $P_v$ : Potencia por densidad de área en  $W/m^2$
- A: Área de las palas del aerogenerador en nuestro caso  $\varnothing=0.34$  m
- $\rho$ : Densidad del aire  $1.225 \text{ kg/m}^3$  a nivel del mar y 15 grados Centígrados
- x: Velocidad del viento

Incluyendo en esta ecuación (21), la distribución de Weibull queda determinada como se muestra en la ecuación (22):

$$P_v = A \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} x^3 f(x) dx = A \frac{1}{2} \rho (x)^3 \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)}{\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (22)$$

Haciendo uso de los datos de velocidad de viento, y ajustándonos a la distribución de Weibull se realiza el cálculo de la energía que suministra el viento en este sector, lo cual representa el área de barrido, determinando que existe una potencia por densidad de área de  $52.7 \text{ W/m}^2$ .

#### 2.5. Potencia media suministrada por el Generador Eólico.

Para realizar el cálculo de la potencia media suministrada por el aerogenerador, se considera la curva de características del mismo ya trabajada anteriormente, la cual se muestra en la Figura 8, y adicional se toma en cuenta los datos de potencia del viento, considerando que el generador eólico va a trabajar desde 1 m/s y alcanzara su valor de trabajo nominal a los 7.5 m/s, si  $p_e(x)$  es la función que describe la potencia del generador en función de la velocidad del viento  $f(x)$ , la potencia quedara determinada por la ecuación [27].

$$P_w = \int_{V_1}^{V_2} P_e(x) f(x) dx \quad (23)$$

Donde:

- $P_w$ : Potencia del generador Eólico
- $P_e(x)$ : Función de la Potencia del Generador.
- $f(x)$ : Función de la Velocidad del viento
- V1: Velocidad inicial del aerogenerador
- V2: Velocidad Nominal del aerogenerador

Se Realizan los cálculos considerando la velocidad del viento  $X_j$  y sus respectivas frecuencias  $F_j$ , como se muestra en la ecuación (24).

$$P_w = \sum_{j=1}^m F_j P_e(x_j) \quad (24)$$

Donde:

- $P_w$ : Potencia del generador Eólico W
- $F_j$ : Frecuencia de repetición de viento.
- $P_e$ : Potencia parcial del generador eólico
- $X_j$ : Punto de evaluación de la potencia

Determinando que la potencia que suministra el generador eólico queda definida por la sumatoria

de todas las potencias parciales, evaluadas en determinados puntos.

Con lo cual se obtiene que la potencia media de trabajo del generador eólico es: 204.6 W.

En resumen, de los resultados, los valores obtenidos con respecto al aprovechamiento del potencial eólico utilizando los valores recopilados a través de la estación meteorológica son resultados bajos y no representarían mayor aprovechamiento de este potencial en estas zonas bajo estas condiciones de viento.

## 2.6. Planteamiento del problema

En la presente investigación se plantea como problemática llegar a determinar la cantidad de recurso eólico que puede ser aprovechado para la generación de energía eléctrica en flujos turbulentos que se producen cuando el viento entra en contacto con las edificaciones de las zonas urbanas, las nuevas magnitudes de velocidad y dirección de viento producto de este fenómeno son difíciles de apreciar, para llegar al objetivo se plantea realizar simulaciones por medio de programas computacionales como el CFD, y se desarrollan cálculos matemáticos por medio del programa Matlab, partiendo de mediciones de vientos realizadas en un área en particular, como lo es nuestro caso de estudio la estación meteorológica Carapungo la cual se encuentra en el distrito metropolitano de Quito.

Para el análisis de los datos recopilados de la estación meteorológica en mención se plantea la utilización de la función de distribución de Weibull, y además tomaremos como referencia un modelo de aerogenerador de eje vertical y hélices helicoidales existente en el mercado y utilizando su curva de potencia realizar cálculos y determinar la cantidad de energía que puede ser generada a partir de los datos existente de la estación meteorológica.

El algoritmo que nos permite realizar la evaluación del recurso eólico aprovechable en los datos se lo expresa en la Tabla 5. El mismo que puede ser usado en un futuro como base para el desarrollo de nuevas investigaciones relacionadas al aprovechamiento del recurso eólico.

**Tabla 5:** Algoritmo evaluación del recurso eólico

Paso 1:	Inicialización
Paso 2:	Entrada de registros de datos medidos $(X_j, Y_j)$ los cuales forman la función $f(x)$ .
Paso 3:	Determinación de los parámetros $c$ y $k$ de la función de distribución de Weibull que satisfaga la función $f(x)$ , mediante el ajuste no lineal. $f(x) = \frac{k}{c} \left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{c}\right)^k\right]$ Donde: $f(x)$ : Función de probabilidad $k$ : Factor de forma de la curva de la distribución de Weibull. $c$ : Factor de Escala de la curva de la distribución de Weibull.
Paso 4:	Entrada de datos de curva de potencia del aerogenerador, para determinar los puntos $X_0$ y $X_1$ , que representan el rango de trabajo del aerogenerador generador, $P(x_0 \leq x \leq x_1) = \int_{x_0}^{x_1} f(x) \cdot dx$
Paso 5:	Evaluación de la potencia por unidad de área que suministra el viento. $p_v = A \frac{1}{2} \rho x^3$ Donde: $P_v$ : Potencia por densidad de área en $W/m^2$ $A$ : Área de las palas del aerogenerador en nuestro caso $\varnothing=0.34$ m $\rho$ : Densidad del aire 1.225 $kg/m^3$ a nivel del mar y 15 grados Centígrados $x$ : Velocidad del viento
Paso 6:	Cálculo de la potencia suministrada por el aerogenerador. $P_w = \int_0^{\infty} P_e(x) f(x) dx$ Donde: $P_w$ : Potencia del generador Eólico $P_e(x)$ : Función de la Potencia del Generador. $f(x)$ : Función de la Velocidad del viento

## 3. Evaluación del Recurso Eólico en zonas urbanas.

Con los resultados obtenidos se desarrolla el estudio de la evaluación del potencial eólico, pero a nivel de las azoteas de los edificios, para lo cual se utiliza otra herramienta computacional llamada Autodesk CFD [8] [28] [24], misma que permite realizar simulaciones de viento

considerando los valores de viento que ya fueron obtenidos en los análisis anteriores.

Autodesk CFD, es un software de la familia de autodesk, por sus siglas en ingles CFD significa computational fluid dynamics, proporciona herramientas de dinámica de fluidos computacional y simulación térmica para ayudar a predecir el rendimiento del producto, permitiendo mejorar el diseño y validar el comportamiento del producto antes de la fabricación.

Al utilizar este software en nuestro análisis se consiguió reducir los tiempos, ya que basados en simulaciones y con la obtención de graficas determinamos diferentes escenarios proyectados a nuestro caso de estudio, bajo condiciones que ya anteriormente fueron medidas consiguiendo resultados que permitieron observar beneficiosos detalles que no podrían ser apreciados a simple interpretación visual, como por ejemplo que ocurre con el flujo del viento al encontrarse con obstáculos en su camino, y a su vez nos ha permitido determinar los puntos más favorable para la ubicación de los aerogeneradores en las azoteas de las edificaciones.

### 3.1. Ubicación de los aerogeneradores en los edificios.

Para la determinación de los puntos más favorables en el aprovechamiento de velocidad de viento y para la mejor ubicación de aerogeneradores, se ha considerado realizar simulaciones de un edificio y una urbanización, a estos escenarios se les ha aplicado un flujo de viento de 5 m/s, con la idea de apreciar cómo se comporta el viento al pasar por cada uno de ellos, lo cual se observa en la Figura 10. En donde se aprecia en una vista superior del edificio sometido a una velocidad de viento de 5 m/s, la existencia de zonas con diferentes niveles de velocidad de viento que aparecen debido a los obstáculos que este ha encontrado a su paso, se aprecian zonas con magnitud de velocidad de viento inferiores a la magnitud ingresada en un inicio, pero también a su vez se observan otras áreas en donde la velocidad de viento es superior, alcanzando valores por sobre los 8 m/s, también se pueden visualizar diferentes direcciones de viento producto del impacto que este tiene con las paredes del edificio, estas nuevas direcciones

de viento y estas nuevas áreas con magnitudes superiores de velocidad son las que en esta investigación serán estudiadas para dar un mejor aprovechamiento al recurso eólico para la generación de energía eléctrica.

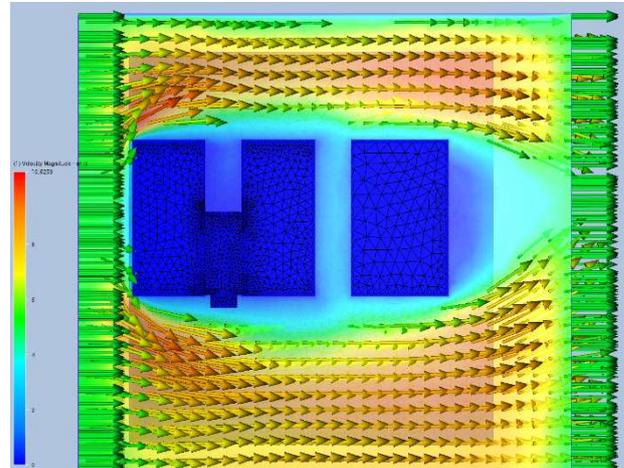


Figura 10. Vista superior de un edificio al ser sometido a una velocidad de viento de 5 m/s.

En la siguiente Figura 11 se observa en un plano lateral, como el viento toma diferentes direcciones al encontrar obstáculos en su trayecto de donde se derivan diferentes magnitudes en cuanto a velocidad de viento, estas aceleraciones que sufre el potencial eólico se pueden aprovechar para la obtención de magnitudes superiores de energía cinética, y a su vez utilizar esta energía para dar movimiento a la microturbina de un aerogenerador y obtener energía eléctrica limpia manteniendo el principio de conservación del medio ambiente.

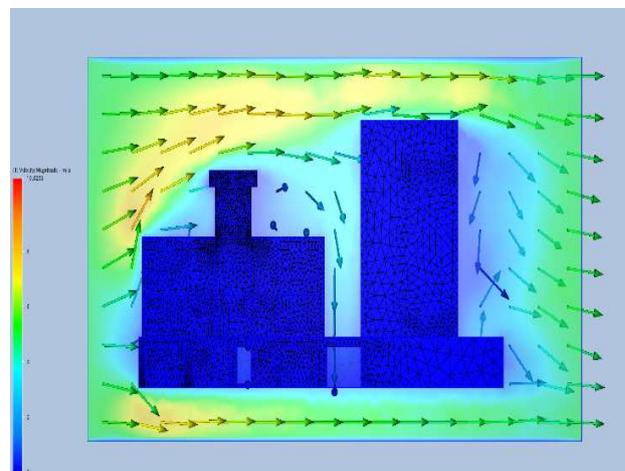
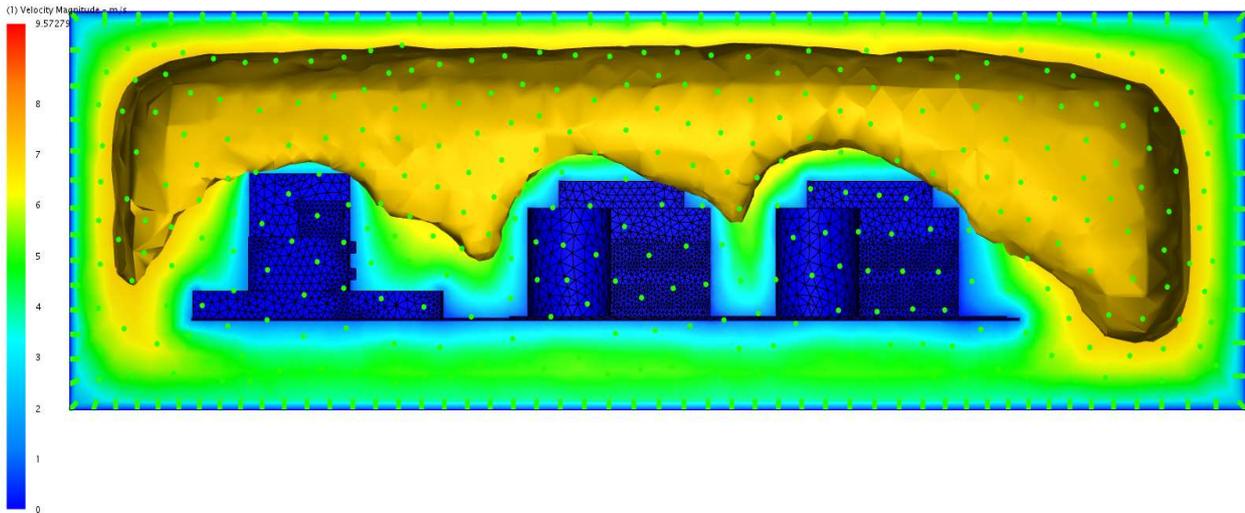


Figura 11. Plano lateral del edificio visualización de direcciones de viento.



**Figura 12.** Zonas en donde el viento aumenta en mayor magnitud su velocidad vista frontal a la dirección del viento

Este mismo fenómeno se repite al aumentar más edificaciones aledañas al edificio, en donde el viento de la misma manera cambia su magnitud de velocidad y dirección, a simple inspección visual se diría que los mejores sitios en donde se puede aprovechar las magnitudes de viento son las azoteas de los edificios; esto se lo puede notar gráficamente en la Figura 12. Esta es una imagen en un plano frontal al ingreso de viento, se observa que el área con mayor volumen representa los sitios por donde el viento aumenta en mayor magnitud, su velocidad, lo cual se encuentra en las áreas más elevadas de los edificios, es decir los edificios más altos aprovecharían de mayor manera esta aceleración que sufre el viento al chocar con las paredes de estos.

De igual manera en este otro caso se ha colocado más edificios aledaños, y la velocidad que ha adquirido el viento producto del choque con las paredes de las edificaciones es superior al doble del valor ingresado en un inicio, es decir paso de 5 m/s a 10 m/s lo mismo que se observa en la Figura 12. Una vez más se considera que el mejor lugar para la colocación de aerogeneradores sería en las azoteas de los edificios, el análisis que corresponde a lo mencionado anteriormente se desarrolla a continuación en este documento. En la Tabla 6 se detallan los valores con respecto a la velocidad de viento que se aprecian en la Figura 12.

**Tabla 6:** Velocidades de viento en la simulación

Color	Velocidad de viento m/s
	0-2
	2-4
	4-6
	6-10

Las áreas donde el viento toma valores relativamente menores a el dato inicial ingresado de 5/s, serían las zonas bajas de la edificación cuyos valores estarían entre 2 a 4 m/s de magnitud de velocidad de viento y en el área con mayor volumen que se visualiza en la Figura 12, estaría entre valores de velocidad por encima del valor inicial de la simulación, es decir estos valores estarían entre los 6 a 10 m/s.

Para determinar el comportamiento del viento con respecto a la altura de los edificios, se realiza un trazo perpendicular al ingreso del viento en la mitad de cada una de las edificaciones como se muestra en la Figura 14, se observa que el viento al pasar por las edificaciones sufre un incremento en su magnitud, en la imagen se apreciar como en cada edificio el viento alcanza un valor superior con respecto al valor ingresado en un inicio que era de 5 m/s, si tomamos en consideración que la altura de cada edificio es de aproximadamente 16 m de altura, en la imagen se observa que por encima de este valor el viento siempre tiene un valor superior al ingresado en un inicio, por lo cual se puede aprovechar este incremento en su magnitud de velocidad para

nuestro propósito de estudio que es el aprovechamiento del potencial eólico para generación de energía eléctrica. Las curvas que se observan en la Figura 14, representan las velocidades de vientos alcanzadas en cada una de las edificaciones, como se observa cada zona es diferente en cuanto a la magnitud de velocidad de viento que recibe, sin embargo la altura promedio en la cual se da la mayor velocidad de viento es a los 20 m/s, de donde se deduce que el viento toma diferentes dirección lo cual provoca que la velocidad del mismo no sea constante, es decir nos encontramos en un escenario en donde el viento toma valores turbulentos.

Con respecto a estos valores de turbulencia que el viento toma se puede decir que a mayor altura

de las edificaciones las turbulencias de viento son menores, esto se puede observar en la Figura 13.

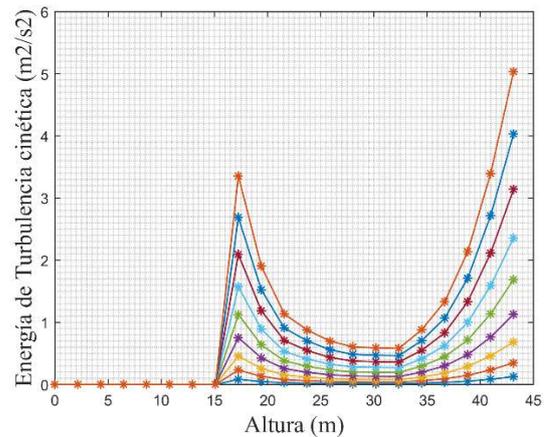


Figura 13: Análisis turbulencia de viento vs altura de edificio

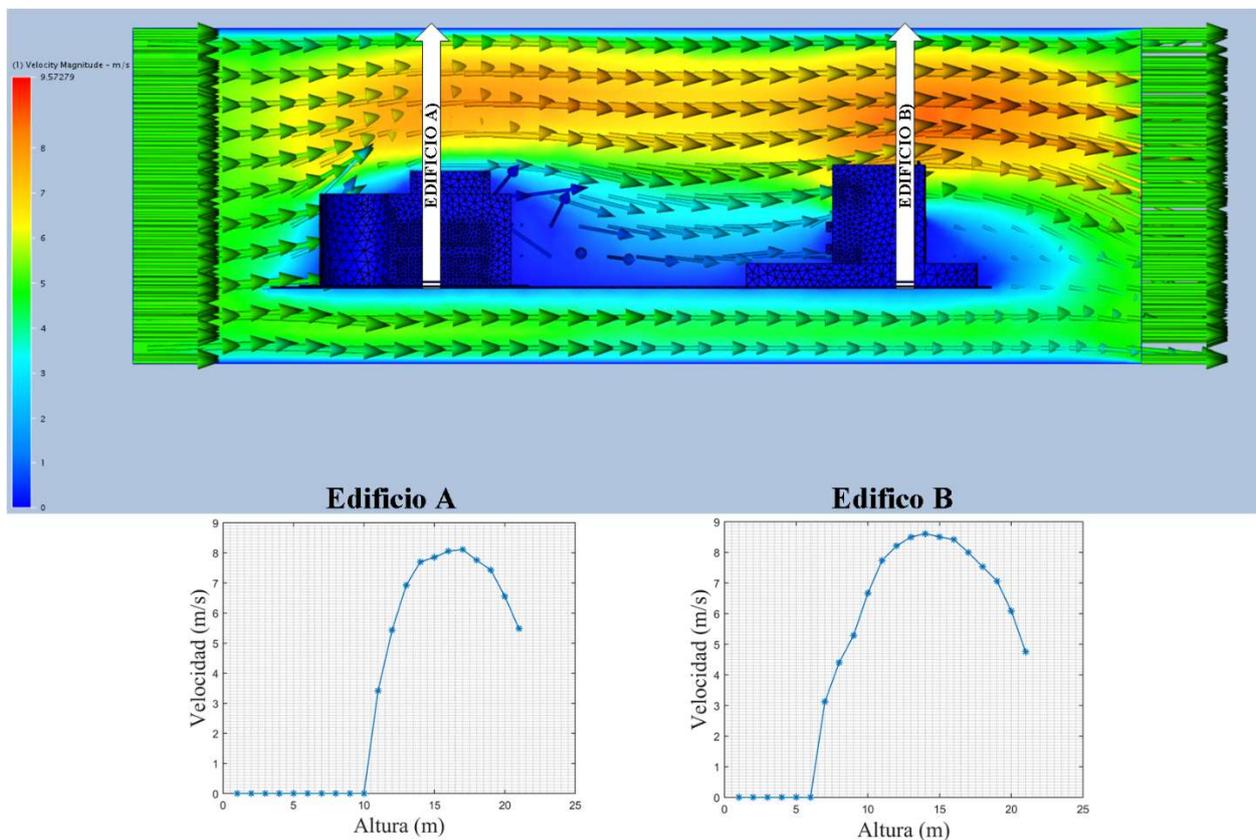


Figura 14. Análisis del viento con respecto a la altura de las edificaciones.

Al realizar un análisis sobre un grupo de edificaciones, pero a su vez realizar sucesivos casos en donde se vaya cambiando el ingreso del valor de magnitud del viento de entrada, considerando los datos de la Tabla 3, como valores de entrada para las respectivas

simulaciones se ha encontrado las curvas correspondientes a la variación del viento con respecto a la altura de las edificaciones cuyos resultados se visualizan en la Figura 15, en donde se puede apreciar cómo cambia el viento su magnitud con respecto al ingreso de viento

inicial. En esta Figura 15, se observa que los valores de velocidad de viento comienzan a tomar mayor magnitud a partir de los 17 metros de altura es decir sobre el 1 metro adicional a las azoteas de los edificios, y alcanzan valores máximos a los 32 metros de los mismos; por lo cual es un dato importante de considerar ya que si nosotros consideramos para nuestros futuros diseños de cálculos de micro centrales de generación eólica instaladas sobre los edificios, el aprovechamiento máximo del potencial eólico estaría sobre los 32 metros de altura.

Continuando con el análisis la curva de velocidad de viento comienza a disminuir conforme el viento va pasando del obstáculo que en este caso es el edificio, volviendo a su valor original del cual empezó, es decir nuestros valores mínimos de viento al cual estarían expuestos los aerogeneradores serían los mismos valores de viento inicial de nuestras simulaciones, y los valores máximos estarían en base a la altura a la cual se ubicarían los aerogeneradores, manteniendo una media de velocidad de viento de trabajo en relación a la altura a la cual esté expuesto el aerogenerador.

Con este análisis se realiza la Tabla 7, partiendo de que en un inicio se tiene como dato primario las mediciones de velocidad de viento registradas en la estación Carapungo, que sometidas a las simulaciones por medio de la herramienta computacional CFD, se obtienen otros valores de velocidad de viento los cuales se registran en la tabla mencionada anteriormente.

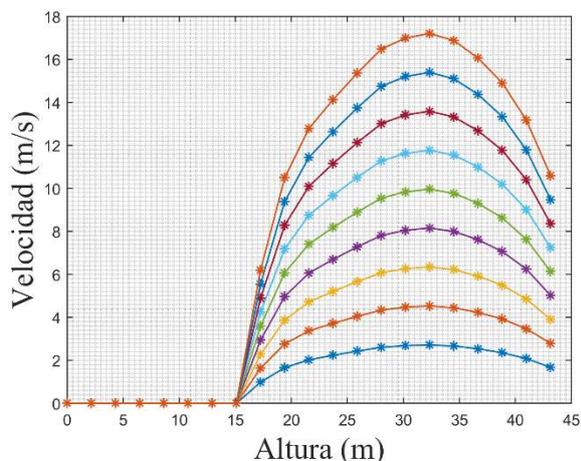


Figura 15. Análisis de Velocidad vs altura del edificio.

Partiendo de estas curvas de variación de velocidad con respecto a la altura y cuyas graficas se visualizan en la Figura 15, se han

analizados los datos de los diferentes casos, variando la magnitud de ingreso de velocidad inicial y se consigue determinar que el incremento en la magnitud de velocidad cuando la altura sobrepasa los 17 metros es el mismo incremento para todos los casos, cuyos resultados se pueden visualizar en la Tabla 7; cómo se puede notar los valores de incremento en los dos casos son iguales para cada caso de altura, es decir si queremos conocer cuál sería nuestro valor de velocidad de viento para una altura de 21 metros bastaría con multiplicar la magnitud del viento inicial por el incremento correspondiente a nuestro valor de altura, cuyo resultado correspondería a un valor aproximado de magnitud de viento en ese punto.

Tabla 7. Variación de la velocidad del viento con respecto a la altura.

CASO 1				
Vel. Inicial (m/s)	Altura (metros)	Vel. CFD (m/s)	Incremento	Observación
1,5	17,25	0,98	0,654	
1,5	19,41	1,65	1,106	
1,5	21,56	2,02	1,347	
1,5	23,72	2,23	1,488	
1,5	25,88	2,42	1,617	
1,5	28,03	2,60	1,735	
1,5	30,19	2,68	1,789	
1,5	32,35	2,71	1,811	Vel. Máxima
1,5	34,51	2,66	1,776	
1,5	36,66	2,53	1,690	
1,5	38,82	2,35	1,568	
1,5	40,98	2,07	1,386	
1,5	43,13	1,67	1,114	

CASO 2				
Vel. Inicial (m/s)	Altura (metros)	Vel. CFD (m/s)	Incremento	Observación
2,50	17,26	1,63	0,65	
2,50	19,41	2,76	1,11	
2,50	21,57	3,37	1,35	
2,50	23,73	3,72	1,49	
2,50	25,88	4,04	1,62	
2,50	28,04	4,34	1,74	
2,50	30,20	4,47	1,79	
2,50	32,35	4,53	1,81	Vel. Máxima
2,50	34,51	4,44	1,78	
2,50	36,67	4,23	1,69	
2,50	38,82	3,92	1,57	
2,50	40,98	3,47	1,39	
2,50	43,14	2,79	1,11	

Ejemplo: Si queremos conocer cuál sería la velocidad del viento a 21 metros de altura si en

nuestras mediciones iniciales tenemos como dato 4,5 m/s.

$$Vel_{21\text{metros}} = Vel_{\text{inicial}} \times Factor \quad (25)$$

$$Vel_{21\text{metros}} = 4.5 \frac{m}{s} \times 1.346$$

$$Vel_{21\text{metros}} = 6.057 \frac{m}{s}$$

Observando en la Tabla 8 se confirma que nuestro valor calculado es muy aproximado a nuestras simulaciones.

**Tabla 8.** Variación de la velocidad del viento con respecto a la altura velocidad inicial 4.5 m/s.

CASO 4				
Vel. Inicial (m/s)	Altura (metros)	Vel. CFD (m/s)	Incremento	Observación
4,50	17,26	2,94	0,65	
4,50	19,41	4,97	1,10	
4,50	21,57	6,06	1,35	
4,50	23,73	6,69	1,49	
4,50	25,88	7,28	1,62	
4,50	28,04	7,81	1,74	
4,50	30,20	8,05	1,79	
4,50	32,35	8,15	1,81	Vel. Máxima
4,50	34,51	7,99	1,78	
4,50	36,67	7,61	1,69	
4,50	38,82	7,06	1,57	
4,50	40,98	6,24	1,39	
4,50	43,14	5,02	1,11	
4,50	17,26	2,94	0,65	

Para finalizar el trabajo de investigación se toman los valores de datos de medición de viento de la estación Carapungo y se asume que existe un edificio de 16 metros en donde queremos instalar nuestro aerogenerador a 21 metros de altura con lo cual utilizamos la Tabla 7, en donde tenemos los factores de incremento de velocidad para la altura solicitada y desarrollamos los cálculos necesarios para determinar cuánto podría aprovechar del recurso eólico para la generación de energía eléctrica, lo cual detallamos a continuación.

**Tabla 9.** Nuevos Valores de Velocidad de Viento Obtenidos para la estación Carapungo a 21 metros de Altura.

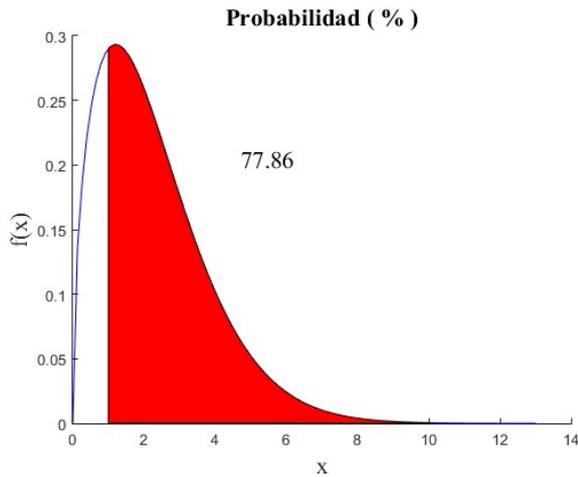
Orden i	Vel. Inicial (m/s)	Factor a 21m de Altura	Velocidad a 21m de Altura	Observaciones w
1	0,5	1,346	0,673	32113
2	1,5	1,346	2,019	30184
3	2,5	1,346	3,365	14784
4	3,5	1,346	4,711	10113
5	4,5	1,346	6,057	5168
6	5,5	1,346	7,403	1572
7	6,5	1,346	8,749	599
8	7,5	1,346	10,095	181
9	8,5	1,346	11,441	39
10	9,5	1,346	12,787	7

En la Tabla 9, se aprecian los valores de velocidad de viento para una altura de 21m, con los cuales se procede a realizar la evaluación energética manteniendo los mismos valores de observación de estos sucesos o acontecimientos y mediante la utilización de Matlab determinamos el recurso eólico aprovechable bajo estas circunstancias y cuyos resultados son analizados a continuación.

### 3.2. Evaluación de Recurso Energético Eólico Turbulento

Los nuevos valores de probabilidad de trabajo del aerogenerador se visualizan en la Figura 16, cuyo resultado de probabilidad de trabajo es de 77,86%; lo que representa un valor superior que a nivel de la estación Carapungo, lo cual significa que nuestro aerogenerador bajo estas circunstancias nos entregará mayor cantidad de potencia eléctrica para ser aprovechada. Estos valores de resultados han aumentado debido a que el viento al chocar con las paredes de los edificios forma áreas parecidas a túneles de viento producto de la aceleración sufrida al golpear los edificios y al cambio de dirección que se presentan en el mismo.

El viento cambia repentinamente tanto en velocidad como en dirección formando flujos de viento turbulentos, las velocidades que se obtienen debido a estos eventos pueden ser altas o superiores, llegando ser el doble de la velocidad que en un inicio se pueda medir a niveles de estaciones meteorológicas.



**Figura 16.** Probabilidad de trabajo del aerogenerador a 21 metros de altura.

El tiempo de trabajo del aerogenerador considerando los nuevos valores de las constantes  $c=2,5356$  y  $k=1,4913$ ; los mismos que resultan del nuevo ajuste realizado a la ecuación de Weibull cuyas horas de trabajo será de 73781 horas de trabajo durante los 10 años de mediciones en la estación Carapungo.

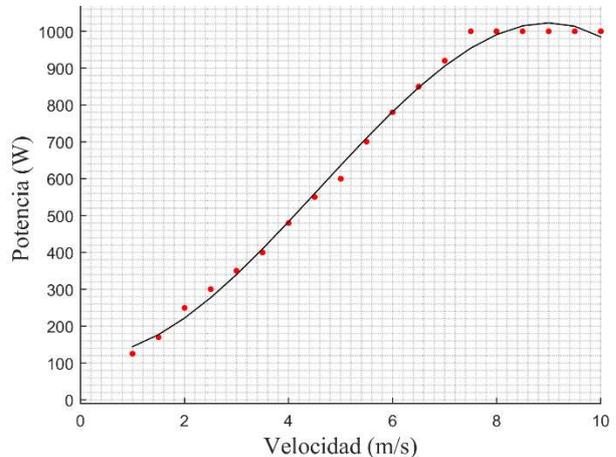
En la Tabla 10, se puede visualizar los resultados de los valores de potencia que toma el aerogenerador al realizar el ajuste de su curva de potencia a la función de distribución de Weibull.

**Tabla 10.** Ajuste de la potencia del aerogenerador a los datos de la curva de función de distribución de Weibull.

Orden i	Vel. Inicial (m/s)	Datos Potencia Generador (w)	Potencia trabajo generador (w)
1	1	125	128,43
2	1,5	170	179,10
3	2	250	233,14
4	2,5	300	290,40
5	3	350	350,72
6	3,5	400	413,92
7	4	480	479,85
8	4,5	550	548,34
9	5	600	619,23
10	5,5	700	692,35
11	6	780	767,54
12	6,5	850	844,63
13	7	920	923,47
14	7,5	1000	1003,89

La potencia por unidad de área será de  $85 \text{ w/m}^2$ , la potencia media de trabajo del aerogenerador bajo estas condiciones será de  $360,92 \text{ W}$ ;

lo cual es un valor superior en un 76,92% a nuestro valor inicial a nivel de estación meteorológica que era de  $204,6 \text{ W}$ . Los datos de ajuste de la curva de potencia del aerogenerador a la función de distribución de Weibull se pueden visualizar en la Figura 17.



**Figura 17.** Ajuste de la curva de potencia del aerogenerador

Para el cálculo de la energía producida por el aerogenerador tomaremos como referencia el valor de potencia media en la cual va a trabajar el equipo que es  $360,92 \text{ W}$  y aplicamos la ecuación (26). La misma que representa a la cantidad de energía producida por el aerogenerador por unidad de tiempo.

$$E = t * \int_{V_1}^{V_2} P_e(x) f(x) dx \quad (26)$$

Donde:

E : Energía Eléctrica producida por el aerogenerador

$P_e(x)$ : Función de la Potencia del Generador.

$f(x)$ : Función de la Velocidad del viento

V1: Velocidad inicial del aerogenerador

V2: Velocidad Nominal del aerogenerador

t: Tiempo de funcionamiento del equipo

El tiempo tomado para la evaluación de la energía eléctrica será un año, lo que corresponde a 8760 horas, con lo cual la energía que puede aportar nuestro equipo aerogenerador será de:  $3161,65 \text{ Kwh/año}$ .

**Tabla 11.** Resumen de resultados cálculo de la potencia y energía total producida.

Frecuencia	Velocidad Media (m/s)	Función de distribución de Weibull	Horas equivalentes anual	Potencia del generador (W)	Potencia de trabajo de aerogenerador (W)	Energía producida (Wh/año)	Energía producida (kWh/año)
386,00	0,39	0,37	3202,66	0,00	0,00	0,00	0,00
1351,00	0,77	0,32	2782,84	0,00	0,00	0,00	0,00
1365,00	1,25	0,26	2264,75	128,43	33,20	290873,24	290,87
956,00	1,73	0,21	1816,28	179,10	37,13	325290,21	325,29
676,00	2,23	0,16	1436,21	233,14	38,22	334838,80	334,84
498,00	2,74	0,13	1128,00	290,40	37,39	327572,26	327,57
404,00	3,25	0,10	883,49	350,72	35,37	309854,88	309,85
343,00	3,76	0,08	690,50	413,92	32,63	285809,72	285,81
307,00	4,25	0,06	541,62	479,85	29,67	259893,21	259,89
281,00	4,73	0,05	427,57	548,34	26,76	234451,16	234,45
231,00	5,25	0,04	332,34	619,23	23,49	205795,05	205,80
161,00	5,73	0,03	262,10	692,35	20,71	181462,73	181,46
113,00	6,22	0,02	205,27	767,54	17,99	157553,00	157,55
50,00	6,74	0,02	158,39	844,63	15,27	133778,84	133,78
44,00	7,24	0,01	123,97	923,47	13,07	114482,72	114,48
$\Sigma$ Total					<b>360,92</b>	<b>3161655,82</b>	<b>3161,66</b>

#### 4. Conclusiones

La potencia eléctrica media de trabajo del aerogenerador que se logra obtener como resultado del análisis realizado es superior en un 76,92 % que, a nivel de las mediciones de viento realizadas en las estaciones meteorológicas, esto representa un mayor trabajo del aerogenerador aprovechando de mejor manera el potencial eólico turbulento existente en cada ciudad.

Los valores de recurso energético obtenido pueden variar con relación al sector geográfico donde se realice el estudio, ya que cada área presenta diferentes condiciones geográficas, sin embargo, el desarrollo descrito en este documento sería el mismo, para el mejor aprovechamiento del potencial eólico se considera los aerogeneradores de eje vertical con hélices helicoidales ya que estas no dependen de la dirección del viento sino de la magnitud con la que el viento atraviesa sus aspas.

La energía eléctrica producida anualmente por la microturbina generadora dependerá de la potencia que tenga la misma para producir energía y la magnitud de velocidad de viento que atraviesen sus hélices, por lo que, se debe de considerar que a mayor potencia la inercia de la hélice de la microturbina será mayor por consiguiente se necesitará de una mayor magnitud de viento.

La aplicación del programa para simulaciones Autodesk CFD, nos ayuda a mejorar nuestro diseño antes de la implementación física de este tipo de micro centrales eléctricas de generación eólicas, y apoyados en la utilización de programas adicionales de cálculos como en nuestro caso Matlab, nos ayuda a que se puedan analizar los datos de manera más fácil, rápida y confiable.

Con el desarrollo de este documento se deja de lado la idea de que los flujos de vientos turbulentos no son aprovechables para la obtención de energía eléctrica, si bien es cierto estos flujos de viento hacen que el mismo cambie bruscamente con respecto a su magnitud y dirección, sin embargo, estos nuevos valores se evalúan resultando condiciones favorables para la obtención de energía eléctrica.

#### 5. Trabajos futuros

Este documento ayudará al desarrollo de futuros trabajos de investigación concerniente al mejor aprovechamiento del potencial eólico como recurso natural para generar energía eléctrica, la directriz recomendada sería:

- El desarrollo de una microturbina de generación eólica basada en resultados de esta investigación para que el aprovechamiento del recurso eólico sea óptimo.

## 6. Referencias

- [1] D. Solyali, M. Altunç, S. Tolun, and Z. Aslan, "Wind resource assessment of Northern Cyprus," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 180–187, 2016.
- [2] C. Arnés, "Estudio Del Potencial Eólico Para Generación Eléctrica En El Itsmo De Tehuantepec, Oaxaca, México," pp. 1–33, 2014.
- [3] D. W. Wekesa, C. Wang, Y. Wei, and J. N. Kamau, "Wind resource assessment and numerical simulation for wind turbine airfoils," *15th Int. Work. Res. Educ. Mechatronics*, pp. 1–9, 2014.
- [4] W. F. Álvarez Castañeda and L. A. Martínez Tejada, "Aplicación de la Ecuación de Weibull para determinar el potencial eólico en Tunjá, Colombia," *XX Simp. Peru. Energía Sol.*, pp. 11–15, 2013.
- [5] M. V. M. Morocho, "Universidad nacional de loja," p. 50, 2012.
- [6] M. Enriquez, "Análisis del emplazamiento de un generador eólico en una vivienda urbana usando técnicas cfd," 2014.
- [7] A. S. Fuentesfria, "Cálculo del límite de potencia eólica basado en la desviación de la frecuencia usando Matlab," no. May, 2017.
- [8] E. M. G. Rodrigues *et al.*, "Modelling and sizing of NaS (sodium sulfur) battery energy storage system for extending wind power performance in Crete Island," *Energy*, vol. 90, pp. 1606–1617, 2015.
- [9] Z. De and R. Sanabria, "Trabajo Asignatura de Energía Eólica Aprovechamiento del Recurso Eólico en las Ciudades," pp. 1–14, 2010.
- [10] T. Simões and A. Estanqueiro, "A new methodology for urban wind resource assessment," *Renew. Energy*, vol. 89, pp. 598–605, 2016.
- [11] M. Y. Kazet, R. Mouangue, A. Kuitche, and J. M. Ndjaka, "Wind Energy Resource Assessment in Ngaoundere Locality," *Energy Procedia*, vol. 93, no. March, pp. 74–81, 2016.
- [12] S. M. Weekes and A. S. Tomlin, "Low-cost wind resource assessment for small-scale turbine installations using site pre-screening and short-term wind measurements," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 8, no. 4, pp. 349–358, 2014.
- [13] G. He and D. M. Kammen, "Where, when and how much wind is available? A provincial-scale wind resource assessment for China," *Energy Policy*, vol. 74, no. C, pp. 116–122, 2014.
- [14] T. H. H. Le, C. C. Nguyen, D. K. Le, N. D. Bui, and N. H. Nguyen, "Integrated design process for Subsonic Open Circuit Wind Tunnel from empirical studies to CFD simulation," pp. 99–104, 2015.
- [15] I. M. Alhamad, M. H. Alsaleem, and H. Taleb, "Natural Ventilation Potential Strategies in Warm Winter Climate Zones-A Case Study of Dubai," *2018 Adv. Sci. Eng. Technol. Int. Conf.*, pp. 1–4.
- [16] M. Lobna and D. Leila, "A numerical study of heating and cooling by a Trombe wall in Tunisia," *IREC 2014 - 5th Int. Renew. Energy Congr.*, no. 216, pp. 9–14, 2014.
- [17] R. Rios, E. Ortigoza, C. Romero, and L. Morinigo, "Analysis and optimization of energy resources of the city of Bahía Negra Chaco - PY," *2017 Ieee Urucon, Urucon 2017*, vol. 2017–December, pp. 1–4, 2017.
- [18] A. Muhtadi, "Modeling and Simulation of a Microgrid consisting Solar PV & DFIG based Wind Energy Conversion System for St.Martin's Island," 2017.
- [19] D. Silva Herran, H. Dai, S. Fujimori, and T. Masui, "Global assessment of onshore wind power resources considering the distance to urban areas," *Energy Policy*, vol. 91, pp. 75–86, 2016.
- [20] R. D. Lindsley, J. R. Blodgett, and D. G. Long, "Analysis and Validation of High-Resolution Wind from ASCAT," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 54, no. 10, pp. 5699–5711, 2016.
- [21] Secretaría de Ambiente, "Informe Anual 2015 Calidad del Aire del Distrito Metropolitano de Quito," p. 63, 2016.
- [22] U. Nacional, D. Mar, and H. Informática, "Evaluación Del Recurso Eólico Mediante Evaluación del Recurso Eólico Mediante," no. November, 2015.

- [23] L. Osorio-Laurencio, A. Lamorú-Reyes, and J. R. Pérez-Sandó, “GUI de MATLAB para la evaluación del potencial eólico en sistemas operativos basados en GNU / Linux GUI in MATLAB to evaluation the eolic potential to based system GNU / Linux,” *Rev. Cuba. Ciencias Informáticas*, vol. 9, no. 1, pp. 6–19, 2015.
- [24] X. Zhang, Y. Chen, and R. Calay, “A study of a novel wind turbine structure for urban skyscrapers using CFD simulation,” *Int. Conf. Model. Identif. Model. Identif. Control*, pp. 1101–1105, 2012.
- [25] J. M. Guevara Díaz, “Cuantificación del perfil del viento hasta 100 m de altura desde la superficie y su incidencia en la climatología eólica Quantification of the Profile Wind up 100m from Surface and its Incidence in Air Climatology,” *Rev. Terra Vol. XXIX N°*, vol. 46, 2013.
- [26] C. De Potencia, “SMARTTWISTER ST-1000 AEROGENERADOR SMARTTWISTER ST-1000.”
- [27] S. M. Weekes and A. S. Tomlin, “Comparison between the bivariate Weibull probability approach and linear regression for assessment of the long-term wind energy resource using MCP,” *Renew. Energy*, vol. 68, pp. 529–539, 2014.
- [28] M. Ortiz, “Estudio Exploratorio del Potencial de Generación de Energía Eólica y Fotovoltaica en el Distrito Metropolitano de Quito,” pp. 19–24, 2014.

## 6.1. Estado del arte

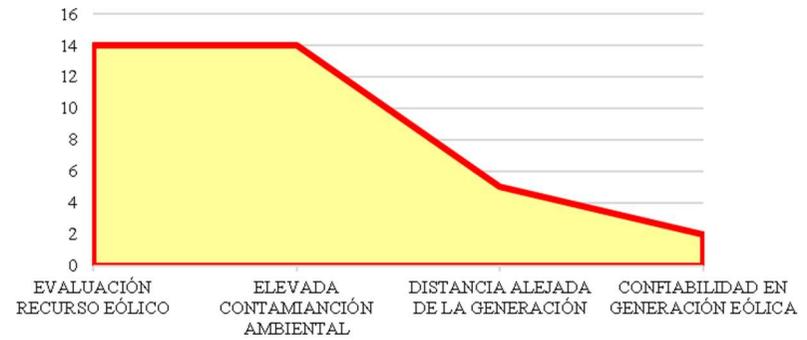
MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL RECURSO EÓLICO PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA BASADO EN FLUJOS TURBULENTOS																								
ITEM	AÑO	DATOS  TÍTULO DEL ARTÍCULO	TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA						
			EVALUACIÓN DE RECURSO EÓLICO	APROVECHAMIENTO RECURSO EÓLICO	CONFIABILIDAD EN GENERACIÓN	ARQUITECTURA BIOClimÁTICA	ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	EVALUACIÓN RECURSO EÓLICO	ELEVADA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL	DISTANCIA ALEJADA DE LA GENERACIÓN	CONFIABILIDAD EN GENERACIÓN EÓLICA	COSTOS DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA	TECNOLOGÍA APLICADA A GENERACIÓN EÓLICA	INSTALACIONES DE GENERACIÓN CONVENCIONALES	EVALUACIÓN DE RECURSO EÓLICO	INSTALACIÓN DE MICROCENTRALES DE GENERACION	ANÁLISIS DE PALETAS DE AEROGENERADORES	MODELO MATEMÁTICO	ALMACENAMIENTO ENERGÍA	MODELAMIENTO GENERACIÓN EÓLICA	EVALUACIÓN EOLICA	SIMULACIONES NUMÉRICAS	MODELO MATEMÁTICO	CONTROL DE CENTRALES
1	2016	Wind resource assessment of Northern Cyprus	☒							☒				☒					☒					
2	2014	Estudio Del Potencial Eólico Para Generación Eléctrica En El Istmo De Tehuantepec, Oaxaca, México		☒						☒				☒	☒					☒				
3	2014	Wind resource assessment and numerical simulation for wind turbine airfoils	☒									☒				☒						☒		
4	2013	Aplicación de la Ecuación de Weibull para determinar el potencial eólico en Tunjá, Colombia		☒									☒	☒					☒	☒				
5	2015	“ MODELO MULTIESCADO PARA ESTUDIOS DE CONFIABILIDAD DEL PARQUE EÓLICO MINAS DE HUASCACHACA ” Autor: Director:			☒					☒							☒						☒	
6	2018	Natural Ventilation Potential Strategies in Warm Winter Climate Zones- A Case Study of Dubai				☒									☒				☒					
7	2017	Research on Control of Energy Storage by Intelligent Micro-grid for Wind / Photovoltaic / Energy Storage					☒	☒	☒			☒					☒							☒
8	2012	Metodología para cálculo de curva de potencia de turbina eólica de eje vertical.	☒									☒				☒							☒	
9	2014	Análisis de emplazamiento de un generador eólico en una vivienda urbana usando técnicas CFD		☒						☒				☒					☒					
10	2017	Cálculo del límite de potencia eólica basado en la desviación de la frecuencia usando Matlab			☒							☒			☒							☒	☒	
11	2017	Applying Wind Simulations for Planning and Operation of Real Time Thermal Ratings	☒									☒							☒					
12	2013	Quantification of the Profile Wind up 100m from Surface and its Incidence in Air Climatology	☒										☒			☒							☒	
13	2014	Where, when and how much wind is available? A provincial scale wind resource assessment for China	☒										☒						☒	☒				
14	2012	Evaluación del potencial eólico para la generación de energía eléctrica en el estado de Veracruz, México	☒										☒	☒								☒		



### TEMÁTICA



### FORMULACIÓN DEL PROBLEMA



### SOLUCIÓN DADA MEDIANTE

