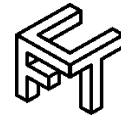




Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas



ESTUDIO DEL POTENCIAL EÓLICO EN EDIFICIOS ALTOS DE LA CIUDAD DE MATANZAS.

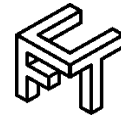
Tesis Presentada como Requisito Parcial
para la Obtención del Título de
Máster en Tecnología Energética

Autor: Ing. Sergio Alfonso García

Matanzas, 2018



Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas



ESTUDIO DEL POTENCIAL EÓLICO EN EDIFICIOS ALTOS DE LA CIUDAD DE MATANZAS.

Tesis Presentada como Requisito Parcial
para la Obtención del Título de
Máster en Tecnología Energética

Autor: Ing. Sergio Alfonso García

Tutor: Dr. C. Eduardo T. Lincheta Mesa.

Matanzas, 2018

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD Y NOTA LEGAL

Yo, Sergio Alfonso García, declaro que soy el único autor de la siguiente tesis, titulada *Estudio del potencial eólico en edificios altos de la ciudad de Matanzas* y, en virtud de tal, cedo el derecho de copia de la misma a la Universidad de Matanzas, con lo cual se permite su copia y distribución por cualquier medio siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores, no haga uso comercial de la obra y no realice ninguna modificación de ella.

Matanzas, 26 de marzo de 2018.

Sergio Alfonso García

“El verdadero hombre no mira del lado que se vive mejor sino donde está el deber”

José Martí

RESUMEN

Uno de los retos tecnológicos en la actualidad es la obtención de energía eléctrica utilizando sistemas y métodos no contaminantes, entre los que se destacan los eólicos; que precisan para su rentabilidad y vida útil un montaje en zonas estratégicas, de viento relativamente estable; sin embargo, las condiciones para aprovechar la energía del viento en entornos urbanos son más complejas que en zonas abiertas, específicamente atribuido a que la velocidad del viento es más baja y su flujo más turbulento. Sobre esta base, se determina el objetivo del presente trabajo, en el cual se desarrolla estudio del potencial eólico disponible en los edificios de más de 10 plantas, situados en la zona costera de la ciudad de Matanzas. En el mismo se determinan los valores de velocidad y dirección del viento, en 19 puntos de medición ubicados en la azotea y laterales de los edificios. Para ello se emplearon técnicas de medición que permiten el desarrollo del histograma de frecuencias y el gráfico de Rosa de los Vientos. Se aplica simulación CFD para determinar la posición más adecuada para la instalación de aerogeneradores, en función de las líneas de flujo del viento. Se presentan los puntos del edificio que alcanzan valores de velocidad de viento superiores a 5m/s y promedio de 7m/s y 8m/s definiéndose que la dirección del viento predominante es del noreste. De los estudios experimentales en escala realizados con el aerogenerador de álabes toroidales y por simulación, con la velocidad de 7m/s (25,2km/h) se confirma que este modelo con la instalación conveniente aportará de 15 a 20 kWh al sistema eléctrico del edificio.

Palabras claves: energía eólica; potencial eólico; aerogeneradores; simulación CFD, rosa de los vientos

ABSTRACT

One of technological defiances as of the present moment is the obtaining of electric One of the technological challenges at presents is the obtaining of electric power using no contaminating systems and methods among which the aeolians have been remarkable. These ones require a mounting at strategic zones and relatively stable wind for their profitability and useful life. However, the conditions to have benefit from the wind energy at urban zones are more complex than open zones due to the wind velocity is lower and its flow more turbulent. Taking into account all that, the objective of the present paper is determined. A study of de available Aeolian potential is developed at tall buildings located at the coastland of Matanzas city. The speed values and the direction of the wind are determined in 19 areas of measurement placed on the flat roof and the side of buildings. To do that, measurement techniques which allow the development of the histogram of frequencies and the Wind Rose Graphic were used. The CFD simulation was applied in order to determine the most adequate position for the installation of aerogenerators according to the wind flow. The buildings areas where the values of wind velocity exceed 5m/s and average of 7 m/s and 8 m/s are shown, concluding that prevailing wind direction is from north east. From the experimental researches in scales carried out with the aerogenerator of thoroidal blades and simulation, with the velocity of 7 m/s (25.2 km/h) it is confirmed that this model will contribute from 15 to 20 Kilowatt-hour with the suitable installation.

Keywords: [Aeolian energy; Aeolian potential; Aerogenerators; Simulation CFD, rose of winds]

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	1
Capítulo 1. Estado del Arte	5
1.1. Introducción a la energía eólica.	5
1.2 Actualidad en el aprovechamiento de la energía eólica.....	6
1.3 Variaciones en la velocidad del viento.	9
1.4 Características del viento en zonas urbanas.....	11
1.5 Algoritmo para diseñar el muestreo eólico	11
1.7 Método de estimación de la velocidad del viento.....	17
1.8 Variación de la velocidad del viento con la altura.....	18
1.9. Variación de los parámetros de Weibull con la altura	21
1.10 Dinámica de los fluidos computacional en el estudio de perfiles eólicos.....	22
1.11 Conclusiones parciales del capítulo	24
Capítulo 2 Materiales y Métodos.....	25
2.1 Caracterización de la zona de estudio.....	25
2.2 Mediciones de velocidad y dirección del viento en edificio 14 plantas.	26
2.3. Mediciones de vientos a diferentes distancias de la azotea.	27
2.4 Equipamiento empleado para las mediciones de velocidad y dirección del viento.	29
2.5 Metodología para la simulación del flujo de vientos empleando el Método de Elementos Finitos.....	30
2.6 Conclusiones parciales del capítulo	35
Capítulo 3 Análisis de los Resultados.....	36

3.1 Distribución de frecuencias.....	36
3.2 Variación mensual de los valores de velocidad del viento en los puntos de medición.....	38
3.3 Estudio de la dirección predominante del viento.....	41
3.4 Variación de la velocidad del viento a diferentes distancias de la azotea.	42
3.5 Aplicación y potencia generada por el rotor.....	46
3.6 Conclusiones parciales del capítulo.....	48
Conclusiones.....	50
Recomendaciones.....	51
Referencias Bibliográficas.....	52
Anexos.....	55

INTRODUCCIÓN

Producto del agotamiento de los combustibles fósiles y del daño provocado por la quema de los mismos al medio ambiente, el hombre empezó a buscar alternativas para la generación de electricidad, con los objetivos principales de ahorrar combustible fósil y de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera (Fiallo, Santos, & Castro, 2013).

La utilización de los recursos renovables de planeta fue la alternativa más utilizada en las últimas décadas, siendo la energía eólica la más usada, teniendo en los últimos años un gran desarrollo tecnológico, incrementando la potencia nominal de una turbina eólica desde los pocos kilowatt hasta varios megawatt.

El poder del viento ha sido identificado como una fuente renovable limpia de energía que no contribuye a calentamiento global y no provoca emisiones de gases contaminantes o residuos dañinos (Knopper & Ollson, 2011).

La mayor parte de la energía consumida en nuestro país es generada a partir de combustibles fósiles, los cuales son una fuente de energía agotable y que afecta considerablemente el medio ambiente. Sin embargo, se prevé un incremento de la generación de electricidad a partir de fuentes renovables, fundamentalmente de la solar y la eólica.

Según el programa de desarrollo, Cuba pretende generar hacia el 2030 al menos el 10 por ciento de energía eléctrica a partir de fuentes renovables, para lo cual lleva a cabo proyectos inversionistas (ACN, 2013).

La utilización eficaz del potencial energético del viento en una región requiere de adecuadas mediciones de su velocidad obtenidas mediante la instalación de cierto número de torres con anemómetros; estos datos se procesan y los resultados caracterizan dicho potencial (Terrero, Alejandro, & Carcassés, 2015).

En nuestro país se han realizado estudios sobre el potencial eólico existente en toda la isla, construyéndose los mapas eólicos y determinándose las zonas con mayores condiciones para realizar el emplazamiento de parques eólicos. Todo ello con el objetivo de elevar los niveles de generación de electricidad a partir de esta fuente renovable.

Sin embargo, en los últimos años en el mundo se ha incrementado el interés por el desarrollo de la minieólica, o sea de la generación de electricidad a partir de turbinas eólicas de baja potencia.

Esta tecnología ha sido desarrollada fundamentalmente para generar electricidad en zonas urbanas, donde las velocidades de los vientos es más baja y presenta carácter turbulento, que no permite la instalación de aerogeneradores de alta potencia. Aunque el volumen de generación de esta tecnología es inferior la misma permite lograr la independencia energética de hogares, instituciones, parques y determinados sectores de bajo consumo, es fácil de implementar y permite disminuir los costos por concepto de instalación y mantenimiento. A pesar de ello en nuestro país no se han realizado estudios para la posible aplicación de esta tecnología en zonas urbanas.

Problema científico: ¿Existirán condiciones para generar electricidad a partir de la energía del viento en la ciudad de Matanzas?

Como posible respuesta a esta pregunta se redacta la siguiente **Hipótesis**: En los edificios elevados de la ciudad de Matanzas existen varios puntos con potencialidades para generar electricidad a partir de la energía del viento.

Este trabajo tiene como **objetivo** realizar un estudio del potencial eólico existente en los edificios elevados de la ciudad de Matanzas con vistas a determinar los puntos con mejores condiciones y la posición más idónea para la instalación de aerogeneradores de álabes semitoroidales desarrollados por (Lincheta Mesa, 2015) con registro de patente OCPI 2015 – 151.

Para desarrollar esta investigación se declaran los siguientes **objetivos específicos**:

- Realizar un estudio del estado actual de la temática relacionado con la determinación del potencial eólico en zonas urbanas.
- Determinar la metodología para la realización del muestreo eólico en la zona de medición.
- Determinar la red de puntos donde se efectuará el muestreo eólico.
- Realizar las mediciones de velocidad y dirección del viento en los puntos seleccionados previamente y analizar los resultados obtenidos.
- Simular a partir de dinámica de los fluidos computacional el comportamiento del viento a través de la región de estudio.
- Determinar el límite de potencia eólica en cada punto seleccionando los de mayores potencialidades para la colocación de aerogeneradores.

- Determinar la forma de colocación de los aerogeneradores que permita obtener una mayor eficiencia durante el aprovechamiento eólico.

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE

Este capítulo tiene como objetivo presentar una revisión crítica de las fuentes bibliográficas relacionadas con los estudios de disponibilidad eólica, con vistas a determinar los vientos que se generan en zonas urbanas, así como los modelos matemáticos que describen este fenómeno y las metodologías empleadas por diferentes autores para realizar el muestreo eólico.

1.1. Introducción a la energía eólica.

Energía eólica es la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es transformada en otras formas de energía aprovechables por el hombre.

El recurso para la generación de energía eólica es el viento, el cual es generado por corrientes de aire debido al desigual calentamiento de la superficie de la tierra. Así, la no uniformidad del flujo de radiación solar incidente hace que unas zonas se calienten más que otras, provocando movimientos convectivos de la masa atmosférica. El aire caliente asciende, arrastrando aire más frío proveniente de una región vecina. Al subir se enfría, por lo que aumenta su densidad, descendiendo para volver a repetir el ciclo. Así, el viento es una masa de aire en movimiento, y como tal, contiene una cierta energía cinética.

El fenómeno real es más complejo, ya que la Tierra se mueve sobre su eje. Además, hay una distribución aleatoria de las nubes sobre la superficie y la inercia térmica de los océanos es distinta a la de los continentes, lo que crea gradientes variables con el día y la noche (Arbeloa & Zurita, 2012).

La energía eólica fue de las primeras en ser aprovechadas, al impulsar los barcos a vela. Con el tiempo el hombre se dio cuenta de que la fuerza del viento podía ser utilizada también para mover las aspas de los molinos.

Su aplicación más común está basada en la generación de energía eléctrica a partir del empleo de aerogeneradores.

Los aerogeneradores generan energía limpia y poco contaminante en comparación con otros procedimientos de obtención de energías. Por ello, el impacto medio ambiental es mínimo.

Además al ser un equipo que no necesita un operador para generar energía se considera un equipo seguro, no produce residuos de ninguna especie que pueda ser contaminante, no emplea combustibles fósiles, estos últimos siendo una fuente de energía agotable.

Tiene múltiples aplicaciones como puede ser alumbrado domiciliario, alumbrado público, radio comunicaciones, salud, educación, etc (Arbeloa & Zurita, 2012).

1.2 Actualidad en el aprovechamiento de la energía eólica

Esta es la tecnología energética renovable que más se ha expandido en los últimos años, compitiendo con tecnologías convencionales no renovables como las que usan combustibles fósiles y la nuclear.

La tasa de crecimiento anual de la energía eólica de los últimos años ha hecho que en el año 2008 se tuvieran más de 27 GW de nuevas instalaciones, haciendo que el total de potencia instalada fuera 120 GW. Si se continuara con esta potencia total instalada de 120

GW en el periodo hasta el año 2020, se podrían producir 260TWh, ahorrando 158 millones de toneladas de CO2 al año y pudiendo así evitar un cambio climático peligroso que hoy en día ya resulta inminente. Sin embargo, ya en 2010 la potencia instalada llegó a los 158,5 GW con un crecimiento mayor en los últimos años (crecimiento del 160%), estimando una cifra acumulada total de 409 GW en el año 2014 (Arbeloa & Zurita, 2012). Actualmente las tres regiones mayores impulsoras del desarrollo eólico en el mundo son América del Norte, Europa y Asia, destacándose los países más desarrollados como Estados Unidos, Alemania, España y China.

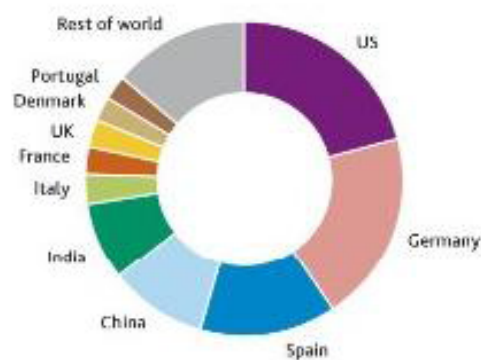


Figura 1.1 Distribución de la energía eólica.

Fuente: Arbeloa y Zurita (2012).

En 2015, la energía eólica fue la principal fuente de nueva capacidad generadora de electricidad en Europa y Estados Unidos, y la segunda más importante en China. A nivel mundial, se añadió un récord de 63 GW, sumando un total aproximado de 433 GW. Los países fuera de la OCDE, fueron responsables de la mayoría de las instalaciones (liderados por China), gracias a lo cual surgieron nuevos mercados a lo largo de África, Asia y América Latina. Diversas compañías y otras entidades privadas continuaron

inclinándose hacia la energía eólica como una fuente de energía confiable y de bajo costo, mientras que varios grandes inversionistas se sintieron atraídos por la estabilidad de sus rendimientos.

El sector costa afuera tuvo un gran año, con un estimado de 3.4 GW conectado a las redes, sobre todo en Europa, superando un total mundial de 12 GW.

La energía eólica está desempeñando un papel importante al satisfacer la demanda de electricidad en un número creciente de países, incluyendo Alemania (más del 60% en cuatro estados), Dinamarca (42% de la demanda en 2015), y Uruguay (15,5%).

En la región latinoamericana Brasil, Chile y Argentina son los tres países con mayor potencia eólica instalada, desatacándose el primero de estos con una potencia de 920MW.

De acuerdo con la Asociación Mundial de Energía Eólica, Cuba ocupaba al finalizar 2007, el lugar 61 en potencia eólica instalada. En nuestro país existen actualmente varios parques eólicos ubicados en Isla Turiguanó, provincia de Ciego de Ávila, con dos máquinas de 225 kW, en Gibara con capacidad de 5,1 MW y en los Canarreos, en Isla de la Juventud con seis Aerogeneradores (o turbinas eólicas) de 275 KW de potencia nominal unitaria.

Para 2020 el empleo de la energía eólica para generar Electricidad evitará la emisión de unos 10 000 millones de toneladas de CO2 al año. A nivel mundial, China e India abarcan el 90 por ciento de los proyectos de aplicación del Mecanismo de Desarrollo Limpio, uno de los métodos concebidos dentro del Protocolo de Kyoto para la reducción

de emisiones de GEI. Ambos países prevén instalar por esa vía una potencia eólica de unos 17 GW.

A pesar de que la energía eólica a gran escala ha sido la de mayor desarrollo, en los últimos años se ha avanzado mucho en la generación a escala pequeña (Microeólica o minieólica). En países como Estados Unidos, Alemania y Dinamarca se ha abogado por esta forma de generación que tiene entre sus ventajas el logro de la autonomía en cuanto a generación eléctrica se refiere y ha sido aplicada fundamentalmente en zonas urbanas y rurales para lograr el autoabastecimiento de hogares.

1.3 Variaciones en la velocidad del viento.

La velocidad del viento es una magnitud vectorial y ésta varía de forma aleatoria tanto en módulo como en dirección y sentido. Los valores medios suelen encontrarse entre 3 y 7 m/s. Sin embargo, dependiendo de la altitud y la topografía éstos pueden ser mayores o menores (valores mayores en altas montañas, valles estrechos y costas).

Para visualizar de forma más clara de donde proviene el viento se utiliza la rosa de los vientos. Para elaborarla se divide el horizonte circular de 360° en 8, 10, 12 o 16 divisiones, teniendo en cuenta los cuatro puntos cardinales (Este=90°, Sur=180°, Oeste=270° y Norte=360°) y se dibuja la dirección de donde proviene el viento. De esta forma se consigue determinar la dirección dominante de los vientos, que por lo general no coincide con la intensidad del viento, ya que en muchos casos los vientos más intensos no son los que soplan más horas al año procedentes de una determinada dirección (Arbeloa & Zurita, 2012).

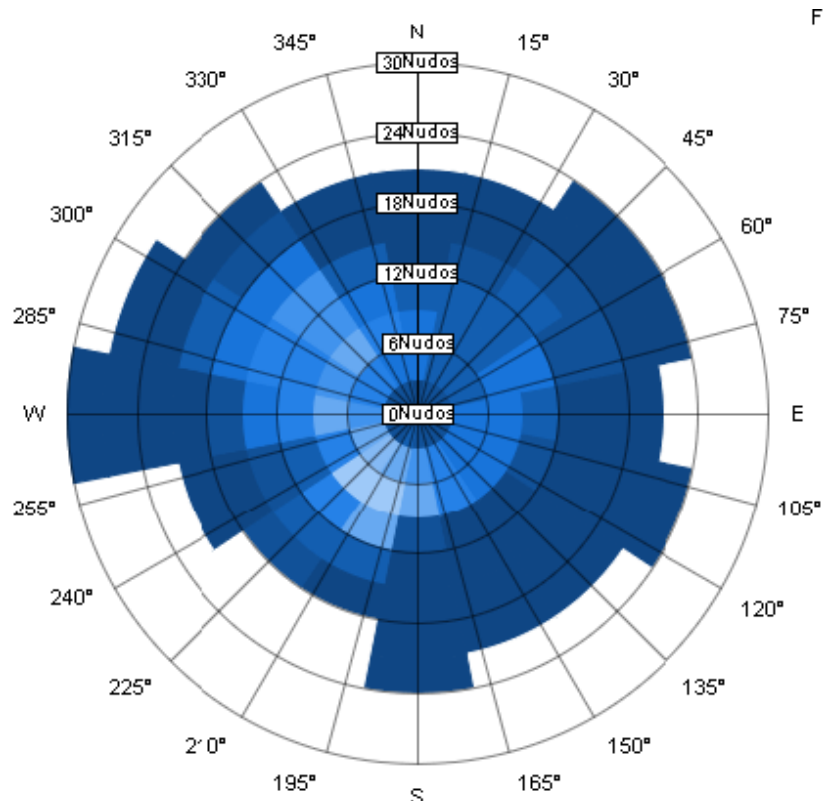


Figura 1.2 Rosa de los vientos.

Fuente: Arbeloa y Zurita (2012).

La velocidad del viento puede variar de muy diversas maneras.

- **Variaciones estacionales:** los vientos globales sufren estas variaciones debido a la posición de anticiclones (zona atmosférica de alta presión) y borrascas (zona atmosférica de baja presión). Así, hay variaciones cíclicas del viento en función, por ejemplo, de las estaciones.

- **Variaciones diarias:** éstas son debidas a los efectos del calentamiento o enfriamiento diurno o nocturno, a la proximidad del mar.

- **Variaciones en periodos muy cortos (ráfagas):** se pueden encontrar ráfagas medias, fuertes y violentas dependiendo del valor de viento medio (entre 5 y 20m/s). También se diferencian las ráfagas por la duración de ésta (pueden llegar a durar incluso 10 minutos).

1.4 Características del viento en zonas urbanas.

Las condiciones para aprovechar la energía del viento en entornos urbanos son más complejas que en zonas abiertas, específicamente atribuido a que la velocidad del viento es más baja y su flujo más turbulento (Lincheta et. al. (2016).

En las zonas urbanas es frecuente el flujo de vientos con turbulencia ocasionada por la presencia de múltiples obstáculos, como casas edificios, centros comerciales, etc. Ello hace más difícil lograr el aprovechamiento de la energía del viento, debido a una disminución de la eficiencia de los aerogeneradores de eje horizontal y por lo cual para estos casos se han desarrollado diferentes variantes de aerogeneradores de eje vertical.

1.5 Algoritmo para diseñar el muestreo eólico

Para el estudio de fenómenos relacionados con el viento, resulta imprescindible conocer los valores de velocidad e intensidad de las trayectorias de las masas de aire, con el fin de considerar dichos valores, además de ciertos factores que alteran los movimientos (Terrero, Legrá, & Lamorú, 2014).

El potencial de energía eólica de una región se determina siguiendo los siguientes pasos (Terrero, Alejandro, et al., 2015) .

- a) Obtención de datos sobre la velocidad y dirección del viento mediante mediciones realizadas en varios puntos de prospección y a diferentes alturas
- b) Modelación matemática del comportamiento de la velocidad del viento mediante una Distribución de Weibull.
- c) Cálculo de los valores que caracterizan el potencial energético del viento en la región.

El diseño del muestreo eólico consiste fundamentalmente en seleccionar los puntos de ubicación de las torres de muestreo de manera que los datos que se obtengan sean de la mayor utilidad posible durante la tarea de caracterización de la velocidad y el potencial de energía eólica en la región que se estudia (Terrero, Alejandro, et al., 2015) .

En ocasiones, por razones técnicas y fenomenológicas, durante la ejecución de la primera etapa no se obtienen mediciones para algunos intervalos de tiempo en algunos de los puntos de prospección lo cual tiene una influencia negativa en la aplicación de la modelación matemática y cálculo de las siguientes etapas lo cual, finalmente, provoca que los resultados probablemente sean incorrectos. Por otra parte, las mediciones usualmente se realizan a ciertas alturas prefijadas y no se dispone de datos para otras alturas (inferiores, intermedias o superiores). Es obvio que sería conveniente disponer de información adecuada si se quiere evaluar el potencial energético al nivel de las alturas donde no se realizaron mediciones. Estas son las causas que hacen necesario completar y ampliar la base de datos medida, estimando los valores de velocidad y dirección del viento en aquellos puntos y momentos donde no pudieron ser medidos (GNANA SHEEL & DEEPA, 2012; Terrero et al., 2014; WANG, 2011).

Para los fines descritos, la calidad de estos datos se puede considerar bajo dos enfoques:

Precisión y exactitud. La precisión tiene que ver con la similitud de varias mediciones del valor del viento en una coordenada espacio-temporal; la exactitud se refiere a cuán cerca esté del valor verdadero cada velocidad medida.

Este enfoque tiene que ver con la instrumentación y las técnicas de muestreo.

1. La representatividad. Pueden ser considerados dos puntos de vista:
2. Que los datos sean capaces de describir el comportamiento de la velocidad del viento en la región o en alguna de sus partes.
3. Que los datos tengan la capacidad de generar un modelo que explique y pronostique el comportamiento espacio-temporal.

Este segundo enfoque está muy relacionado con la decisión de donde y cuando se debe medir la velocidad del viento.

El estudio de la velocidad del viento puede considerarse un largo proceso que se realiza por etapas. La primera etapa parte del conocimiento más general sobre la circulación de los vientos en el planeta y del muestreo de la velocidad y dirección del viento en estaciones meteorológicas. Los resultados son generales y la mayoría de las veces solo constituyen aproximaciones al conocimiento del comportamiento local del viento. Luego se suceden otras etapas donde, a partir de nuevos datos y modelos más potentes, se obtiene mayor conocimiento sobre la velocidad del viento en las regiones promisorias, el cual, a la larga, proporciona los elementos para tomar las decisiones correctas que

permitan la explotación eficaz y eficiente del potencial eólico. Puede decirse entonces que el estudio de las características de viento se realiza por etapas donde en cada una de ellas se obtiene un modelo de la velocidad y de la dirección del viento que constituye el Modelo Preliminar del Viento para la próxima etapa (Terrero, Legrá, & Carcassés, 2015).

Durante el muestreo de la velocidad del viento en regiones promisorias, este se mide con anemómetros con un tiempo de muestreo de 10 minutos al menos durante un año con torres de hasta 100 m de altura sobre el suelo, por tanto el interés de la presente investigación se centra en establecer un diseño de muestreo que particularmente consiste en determinar donde deberán situarse las torres. Puesto que el comportamiento del viento es variable respecto a las dimensiones espaciales y temporal entonces es importante definir la posición de las torres sobre la superficie de la región asumiendo que los datos recolectados deberán reflejar adecuadamente el desarrollo local del fenómeno y, además, tener la capacidad de generar un modelo que estime adecuadamente el comportamiento espacio-temporal de la velocidad del viento. Entonces, el objetivo del presente trabajo es establecer el algoritmo general de un procedimiento para el diseño de un muestreo de la velocidad del viento cuyos resultados tengan la capacidad de minimizar el error probable medio durante una estimación del comportamiento espacio-temporal de la velocidad del viento (Terrero, Legrá, et al., 2015) .

1.6 MEDICIÓN DEL VIENTO

Para realizar una correcta medición del viento, se debe medir tanto su velocidad como su dirección. Por ello, serán necesarios un anemómetro y una veleta respectivamente. Además, hay que tener en cuenta que datos obtenidos durante una campaña de medición

de un año son poco representativos, dada la variabilidad del viento. Para que los datos sean representativos, la información eólica debe ser de periodos entre 25 y 30 años, aunque si esto no es posible los datos recogidos entre 5 y 10 años ya comienzan a ser bastante representativos.

Los anemómetros son los instrumentos empleados para medir la velocidad del viento. Éstos miden la velocidad instantánea del viento, sin embargo, las ráfagas de viento desvirtúan la medida que recogen si lo que se quiere es tener una idea de velocidades medias. Por ello, para conocer velocidades medias lo mejor es realizar diferentes mediciones en intervalos de unos 10 minutos y tomar como medida válida el valor medio de todas las mediciones llevadas a cabo (Arbeloa & Zurita, 2012) .

Para la medición de la dirección del viento se utiliza la veleta, la cual suele colocarse próxima al anemómetro, todo en la misma torre. Como ocurría con la velocidad, la dirección sufre muchas fluctuaciones, por lo que el sistema tiene que ser capaz de determinar una dirección media. Para ello, suelen hacerse lo mismo que en el caso de la velocidad, se promedian valores instantáneos de dirección de la velocidad que se toman aproximadamente cada 10 minutos (Arbeloa & Zurita, 2012).

El conjunto de anemómetro y veleta se coloca en un mástil a una altura estándar que suele ser 10 metros (2 o 3 metros en el caso de estaciones móviles), para evitar perturbaciones del propio suelo. La torre del mástil suele ser un poste cilíndrico delgado y tensado por cables o vientos para evitar el apantallamiento de la torre.

Además, el lugar debe estar despejado para que los objetos no perturben las mediciones realizadas, ya que normalmente un objeto de altura h perturba el flujo de aire una

distancia 2h si está a barlovento y entre 10h y 20h si está a sotavento. Además, en vertical la perturbación puede llegar a alcanzar una altura de 2h. Así, lo ideal es colocar los sensores en lugares cuyo horizonte no presente obstáculos en un radio de unos 300 metros, ya que edificios, bosques o irregularidades en el terreno pueden llegar a provocar distorsiones importantes en la toma de medidas (Arbeloa & Zurita, 2012) .

La potencia eólica aprovechable se refiere a la potencia mecánica en el eje del rotor y no a la potencia generada al final. Para una aerogenerador de área A, sometido a un flujo de aire de velocidad V y densidad ρ , la potencia eólica puede determinar de la siguiente manera (Gaona, 2010) .

$$P_{eje}(v) = \frac{1}{2} C_p(v) \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (1.1)$$

En esta ecuación C_p es el coeficiente de potencia, que representa la fracción de potencia extraída por el rotor, la cual según el límite de Betz no debe ser superior al 59%.

Las estimaciones de velocidad del viento son críticas al momento de evaluar el potencial de energía eólica en cualquier localización.

Los recursos eólicos son caracterizados por una escala de viento según su velocidad, tal y como puede observarse en la tabla:

Tabla 1.1 Escala de vientos según su velocidad

Fuente: Arbeloa y Zurita, 2012

Clase	A 30 m de altura		A 50 m de altura	
	Velocidad del Viento m/s	Potencia del Viento W/m ²	Velocidad del Viento m/s	Potencia del Viento W/m ²
1	0-5.1	0-160	0-5.1	0-200
2	5.1-5.9	160-240	5.1-5.9	200-300
3	5.9-6.5	240-320	5.9-6.5	300-400
4	6.5-7.0	320-400	6.5-7.0	400-500
5	7.0-7.4	400-480	7.0-7.4	500-600
6	7.4-8.2	480-640	7.4-8.2	600-800
7	8.2-11.0	640-1600	8.2-11.0	800-2000

Los desniveles de la superficie a través de la cual sopla el viento antes de llegar a una turbina determina la cantidad de turbulencia que esta experimentará. Los vientos turbulentos ejercen mayores tensiones sobre el rotor y se elevan, reduciendo consecuentemente la expectativa de vida de la turbina. Así, la mayoría de granjas del viento están ubicadas en zonas rurales, lejos de edificios árboles y otros obstáculos. Sin embargo en las zonas urbanas donde predominan los vientos turbulentos existe un potencial de energía eólica que es posible utilizar dando uso a la tecnología adecuada.

1.7 Método de estimación de la velocidad del viento.

De acuerdo con (Chang, 2011; Quijano, 2013; Werapun , Tirawanichakul , & Waewsak, 2015) existen varios modelos para ajustar las mediciones de velocidad de vientos siendo

la distribución de Weibull una de las más empleadas. La densidad de probabilidad Weibull para ajustar las velocidades del viento es mostrada en la ecuación 1.

$$f(v) = \left(\frac{k}{C}\right) \left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} \exp\left(-\frac{V}{C}\right)^k \quad (1.2)$$

Siendo C un parámetro de escala y k un factor de forma. La distribución acumulativa se determina como:

$$F(V) = 1 - \exp\left(-\frac{V}{C}\right)^k \quad (1.3)$$

Los métodos empleados para la asistencia comparativa son el método empírico, el método de factor del patrón de energía, el método máximo de probabilidad, el método de máxima probabilidad modificado, y el método gráfico (Werapun et al., 2015).

1.8 Variación de la velocidad del viento con la altura

Sin embargo, a la hora de caracterizar energéticamente el viento, no solo hay que tener en cuenta la aproximación de los datos eólicos mediante una distribución Weibull, sino que hay una serie de aspectos que alteran las características del viento, como son la altura, el relieve que tenga el terreno o la influencia de los obstáculos que pueden encontrarse cerca (Arbeloa & Zurita, 2012; López et al., 2008).

La velocidad del viento varía con la altura debido principalmente a las turbulencias tanto de origen mecánico (causadas por las irregularidades de la superficie del terreno) como de origen térmico (causadas por el gradiente de temperatura del aire que provoca corrientes convectivas en sentido vertical).

Como en general la influencia del gradiente de temperatura del aire en una diferencia de altura de 100 metros (diferencia de altura razonable en el caso de los aerogeneradores de gran potencia) es pequeña no se tendrán en cuenta los efectos de las turbulencias térmicas, y solamente se tendrán en cuenta los efectos de las irregularidades de la superficie del terreno.

Conforme nos separamos del terreno, los efectos de rozamiento disminuyen y por lo tanto, la velocidad del viento aumenta. Así, se tiene un gradiente o variación de la velocidad con la altura, y se habla del perfil vertical de la velocidad del viento. La variación de la velocidad del viento con la altura depende de la rugosidad que tenga el terreno. Así, si se tienen superficies lisas (con agua, terrenos llanos, llanuras nevadas,...), el gradiente de velocidad es suave. Sin embargo, si se tienen superficies con gran rugosidad (terrenos con edificaciones urbanas, superficies boscosas,...) el gradiente de velocidad será mayor (Arbeloa & Zurita, 2012; López et al., 2008) .De esta forma, se define el parámetro Z_0 , denominado longitud de rugosidad para caracterizar las condiciones del terreno. Así, las superficies lisas con poca rugosidad tienen valores pequeños de Z_0 y las superficies más rugosas cuentan con valores mayores de Z_0 (López et al., 2008; Quijano, 2013; Villarrubia, 2004) .

Tabla 1.2 Clases y longitudes de rugosidad.

Fuente: (Arbeloa y Zurita, 2012).

Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad Z_0 (m)	Índice de energía	Tipo de terreno
0	0.002	100	Superficie de agua. Terreno abierto, superficie lisa
0.5	0.0024	73	Pistas de hormigón (aeropuertos), césped
1	0.030	52	Campos abiertos sin cercados de setos. Edificios muy dispersos. Colinas suavemente reforzadas
1.5	0.055	45	Campo con algunas casas y arbolado de hasta 8m situado como mínimo a 1250 m
2	0.1	39	Campo con algunas casas y arbolado de hasta 8m situado como mínimo a 500 m
2.5	0.2	31	Campo con muchas casas y arbolado de hasta 8 m situado como mínimo a 250 m
3	0.4	24	Pueblos, bosques y terreno accidentado y desigual
3.5	0.8	18	Ciudades con edificios altos
4	1.6	13	Grandes ciudades con edificios muy elevados

Gracias a este parámetro se puede calcular la velocidad de viento medio o estacionario en una altura determinada mediante la siguiente fórmula:

$$V' = V \frac{\ln\left(\frac{Z'}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)} \quad (1.4)$$

Donde

V: velocidad conocida a una altura determinada Z

V' : velocidad que se quiere conocer a la altura Z'

Z_0 : rugosidad del terreno

1.9. Variación de los parámetros de Weibull con la altura

A partir de una distribución Weibull con parámetros de forma y escala conocidos para una altura determinada, se ha desarrollado la siguiente expresión empírica que permite hallar estos parámetros de forma y escala para una nueva altura (Fernández, 2010; López et al., 2008).

Así, se tiene:

Factor de forma:

$$k' = k \left(\frac{1 - 0,088 \text{Ln}(\frac{Z}{10})}{1 - 0,088 \text{Ln}(\frac{Z'}{10})} \right) \quad (1.5)$$

Factor de escala

$$c' = c \left(\frac{Z'}{Z} \right)^\beta \quad (1.6)$$

Donde

Z: altura a la que se conoce la distribución Weibull.

k: factor de forma conocido a la altura z.

c: factor de escala conocido a la altura z.

z': altura a la que se quiere conocer los parámetros de la distribución Weibull

β : coeficiente que viene dado por la expresión:

$$\beta = \frac{0,37 - 0,088 \ln c}{1 - 0,088 \ln \left(\frac{z'}{10}\right)} \quad (1.7)$$

1.10 Dinámica de los fluidos computacional en el estudio de perfiles eólicos.

La aplicación rápida y creciente de la dinámica de los fluidos computacional (CFD) en los últimos veinte años ha sido de vital importancia en la simulación numérica de flujos durante el diseño de maquinarias hidráulicas. En la actualidad, las simulaciones CFD pueden manipular geometrías complejas y máquinas enteras con alta fidelidad (Wahyudi, Soeparman, & Hoeijmakers H W, 2015)

La posibilidad de realizar un gran número de experimentos con gastos mínimos de recursos y tiempo ha convertido a la dinámica de los fluidos computacional en un método utilizado por varios autores para predecir el funcionamiento de los aerogeneradores (Lanzafame, Mauro, & Messina, 2014)

Para la solución de las ecuaciones gobernantes del fenómeno de flujo de fluidos se recomienda el empleo de los modelos RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes). De acuerdo con Hirsch (2007) este es un modelo de flujo viscoso en el cual se promedian las variables en el tiempo y se resuelve el problema para el flujo medio mediante el método de los volúmenes finitos.

Aunque se mencionan múltiples modelos de turbulencia en la literatura especializada, no existe un modelo de turbulencia que satisfaga los resultados para todas las clases de flujo y la selección del modelo de turbulencia depende de muchos factores, como por ejemplo la física del fluido, la exactitud requerida en la solución y los recursos computacionales disponibles (Rogowski & Maroński, 2015).

Para realizar la simulación del comportamiento del fluido con carácter turbulento los métodos más citados en la literatura científica son: los modelos de turbulencia estándar $k-\epsilon$ y $k-\omega$, y el SST $k-\omega$, los cuales han brindado resultados satisfactorios en múltiples investigaciones realizadas (Dobrev & Massouh, 2011; Hossein & Jafarian, 2016 ; Lanzafame et al., 2014; Wong et al., 2014) .Los dos primeros modelos emplean dos ecuaciones de transporte, para determinar la energía cinética de turbulencia k y la tasa de disipación ϵ , en el caso del modelo $K-\epsilon$, o la tasa de disipación específica ω en el caso del modelo $K-\omega$ (Hossein & Jafarian, 2016)

El modelo de transición de turbulencia SST fue desarrollado para mezclar eficazmente la formulación robusta y precisa del modelo $K-\omega$ en la región de cerca de pared, con la formulación del modelo $K-\epsilon$ en el fluido presente en áreas lejanas a la pared (Menter, 2011; Mohamed, A.M. Ali, & Afiz, 2015; Torabi & al, 2016) .Este modelo incluye un

límite de producción que evita la generación de turbulencia en regiones de estancamiento y considera los efectos del sistema de rotación y de la curvatura aerodinámica (Torabi & al, 2016)

1.11 Conclusiones parciales del capítulo

Una vez finalizado el presente capítulo, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones parciales:

1. Existe un potencial eólico apreciable en zonas urbanas, el cual debe ser aprovechado con la tecnología adecuada debido a que la velocidad del viento es más baja y su flujo más turbulento.
2. El estudio de la velocidad del viento puede considerarse un largo proceso que se realiza por etapas y en el cual se miden parámetros como la velocidad y dirección del viento en un período mínimo de 1 año.
3. Existen varios modelos que pueden predecir el comportamiento estadístico de los vientos siendo la distribución probabilística de Weibull la de mayor aceptación en la literatura científica.
4. La dinámica de los fluidos computacional en un método utilizado por varios autores para predecir el comportamiento del viento en diversas regiones.

CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se describe detalladamente todo el procedimiento utilizado en la investigación. En el mismo se exponen a continuación la caracterización de la zona de estudio (edificio 14 plantas), la metodología empleada para realizar las mediciones de velocidad y dirección del viento y la metodología empleada para simulación del flujo de vientos a través del edificio empleando Dinámica de los fluidos Computacional.

2.1 Caracterización de la zona de estudio.

Para realizar el estudio fue seleccionado el Edificio de 14 plantas ubicado en el reparto Peñas Altas de la ciudad de Matanzas. Esta construcción se encuentra ubicada en la costa norte de la provincia por lo cual actúan sobre ella los vientos alisios provenientes fundamentalmente de región noreste, así como las brisas marinas por estar muy próximo al mar.

La ubicación de esta edificación fue construida de tal manera que la superficie mayor (frontal) se encuentra en dirección a la zona norte y la superficie lateral se encuentra en dirección a la zona este, por lo cual siempre va a existir una componente del viento que va a actuar directamente sobre dichas superficies, y que puede ser aprovechada de manera efectiva para generar energía eléctrica.

Esta ubicación, unido a la forma constructiva del edificio, hace que el viento que circula por las zonas bajas, proveniente de la zona norte al chocar contra la superficie frontal del mismo genere una masa de aire que tiende a subir de manera tangencial y que puede ser también aprovechado.

En la azotea de este edificio existe un área considerable en la cual existen condiciones para el montaje de aerogeneradores, de manera que se pueda aprovechar la circulación natural de los vientos, sin que ello pueda interferir en las actividades que se realizan cotidianamente en esta zona.

2.2 Mediciones de velocidad y dirección del viento en edificio 14 plantas.

Las mediciones fueron realizadas en la azotea del edificio 14 plantas, donde fueron establecidos inicialmente 19 puntos de medición, ubicados fundamentalmente en los laterales que se encuentran orientados hacia el norte y el este respectivamente, tomando en consideración la dirección predominante del viento durante todo el año en esta región.

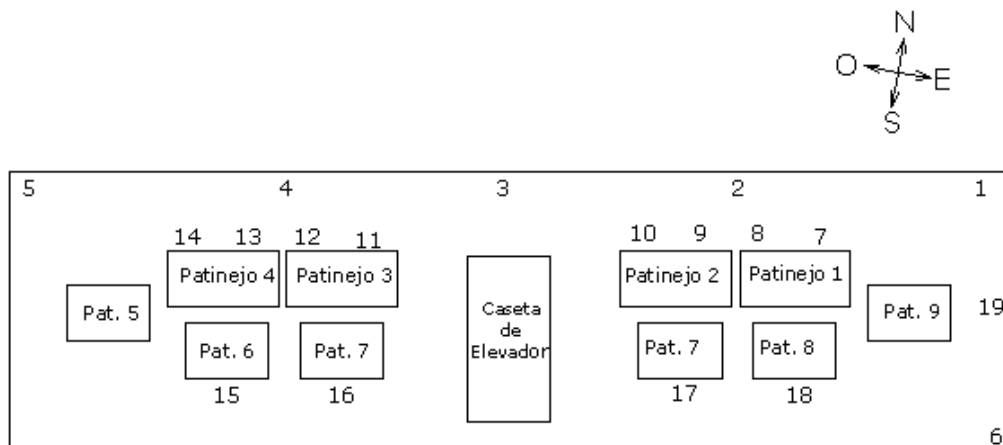


Figura 2.1 Puntos de medición en la azotea del edificio 14 plantas.

En las paredes que se encuentran orientadas hacia la zona sur y oeste no fueron establecidos puntos de medición ya que en esta dirección no hay componentes de velocidad de viento significativos durante casi todo el año.

Los puntos 7 – 18 fueron seleccionados en las ventanas de los patinejos, por donde es expulsado todo el aire que penetra y circula a través del edificio y donde a partir de

mediciones pilotos realizadas se pudo observar que existen componentes de velocidad significativas.

Las mediciones se realizaron diarias, tomando como horario previsto las 15:00 horas de cada día, por ser este dentro del horario de la tarde, donde se obtienen las velocidades medias. Así mismo se realizó un pilotaje, para determinar el comportamiento del viento a diferentes horarios durante el día, realizando mediciones cada dos horas desde las 9:00 horas hasta las 19:00 horas.

Se midieron dos componentes fundamentales: la componente del viento en dirección horizontal, originada por la acción directa del mismo y la componente vertical provocada al chocar el aire contra el edificio y ser desviado y obligado a desplazarse paralelamente a su superficie lateral.

2.3. Mediciones de vientos a diferentes distancias de la azotea.

En los puntos 1 (con orientación hacia el norte) y 19 (con orientación hacia el este) se realizó un estudio para determinar la magnitud de la componente vertical del viento que se desplaza paralelo a la pared del edificio y su variación a distancias de 0m, 0.5m, 1.0m y 1.5m del extremo de la azotea; y de la componente horizontal del viento a alturas de 1.0m, 1.5m, 2.0m, 2.5m y 3.0m del techo del edificio (Figura 2.2).

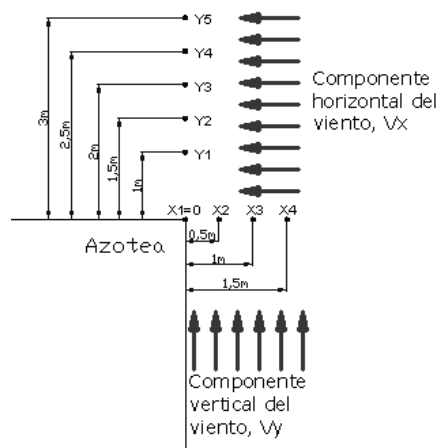


Figura 2.2 Puntos de medición a diferentes distancias de la pared y a diferentes alturas de la azotea del edificio.

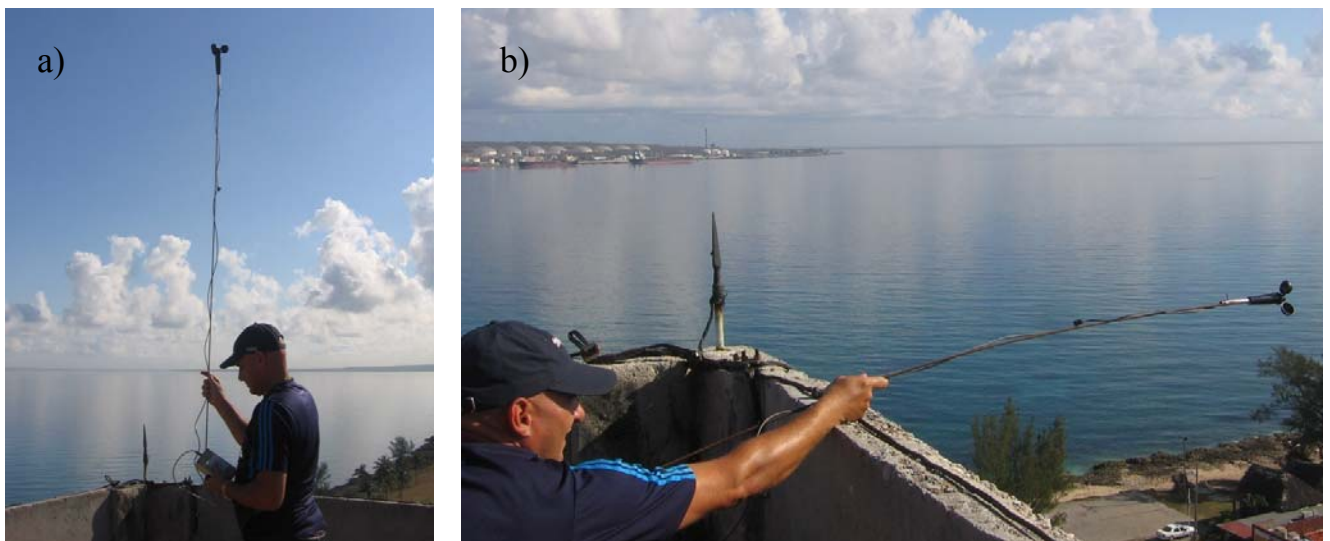


Figura 2.3 Mediciones de la velocidad de viento realizadas a diferentes alturas de la azotea (a) y a diferentes distancias de la pared del edificio (b).

Para realizar el estudio fue preciso medir la velocidad y la dirección predominante del viento, ambos parámetros de vital importancia a la hora de proponer la instalación de aerogeneradores que aseguren un aprovechamiento de la energía del viento con máxima eficiencia.

Diariamente se realizaron 5 mediciones en cada punto, a partir de las cuales se determinó el valor promedio (ecuación 2), eliminándose aquellos valores fuera del intervalo de medición.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N} \quad (2.1)$$

En término $\sum_{j=1}^N X_j$ presente en el numerador de la ecuación 2, representa la sumatoria de las mediciones realizadas y N es la cantidad de valores. Empleando esta expresión también se determinó el valor promedio de velocidad del aire a diferentes intervalos de tiempo: diario, semanal, mensual y anual.

2.4 Equipamiento empleado para las mediciones de velocidad y dirección del viento.

Para las mediciones directas de velocidad se empleó un anemómetro digital AIRFLOW modelo LCA6000 y para las mediciones a diferentes distancias y alturas se utilizó un anemómetro analógico Schiltknecht modelo CH-8625 Gossau.



Figura 2.4 Instrumentos de medición empleados en el estudio.

Para la medición de la dirección del viento se empleó una brújula y una veleta tipo flecha construida por el autor del presente trabajo.

2.5 Metodología para la simulación del flujo de vientos empleando el Método de Elementos Finitos.

A pesar de que el estudio realizado aporta datos valiosos para esta investigación, los mismos fueron determinados en una determinada región, la cual se encuentra limitada por la carencia de tiempo necesario para realizar mediciones en una mayor cantidad de puntos. De igual manera, con los equipamientos que fueron empleados en esta investigación no resulta posible realizar mediciones a alturas superiores a 3 metros sobre el nivel de la azotea.

Para complementar los resultados obtenidos a través de las mediciones se realizó un estudio a partir de una simulación de dinámica de los fluidos computacional (CFD-por sus siglas en inglés), para lo cual se emplea el programa computacional ANSYS CFX16.0.

Esta simulación permitirá extender el estudio a una región mayor y además posibilitará determinar los puntos más adecuados para instalar los aerogeneradores.

La simulación fue realizada a un volumen de control de $(2 \times 2 \times 1) \cdot 10^5 \text{ m}^3$ que representa la masa de fluido que rodea el edificio, el cual fue modelado para la posición con respecto a la dirección predominante del viento, a 35° de región noreste.

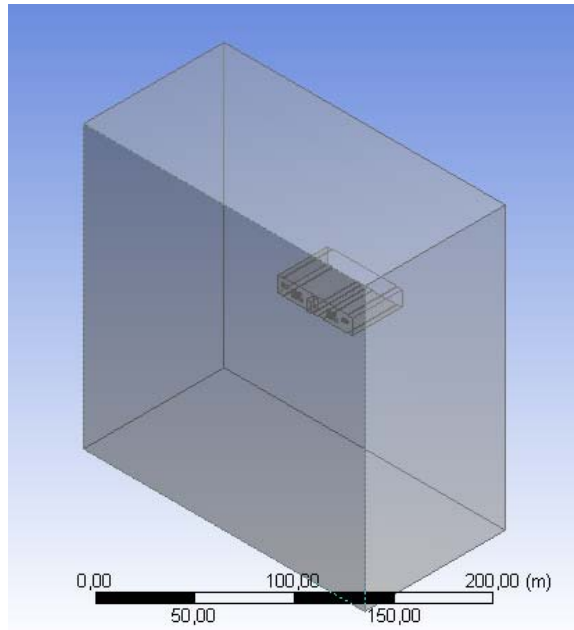


Figura 2.5 Modelo geométrico construido para la simulación.

El modelo geométrico del volumen de control fue construido en 3D empleando para ello el programa AutoCAD2013, e importados posteriormente desde el ANSYS CFX16.0.

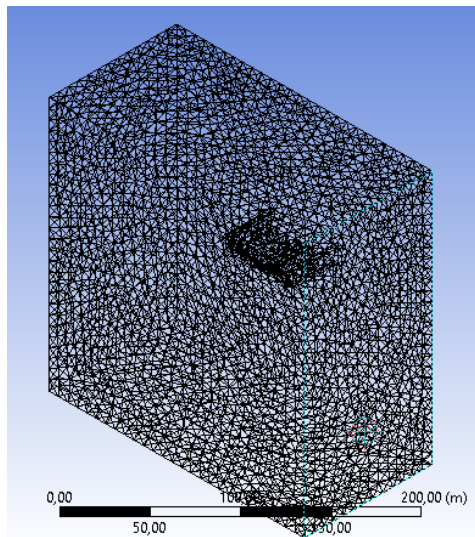


Figura 2.6 Mallado ejecutado en el análisis CFD.

Se realizó un mallado inteligente empleando elementos tetraédricos de dimensión mayor en las áreas lejanas a las paredes del edificio, aumentando la densidad del mismo en zonas próximas a las superficies buscando mayor precisión en estas zonas.

Al volumen de control se le establecieron como condiciones de frontera la entrada de fluido a una velocidad constante de 7m/s y presión atmosférica de 101.3kPa (valores obtenidos con mayor frecuencia en las mediciones realizadas).

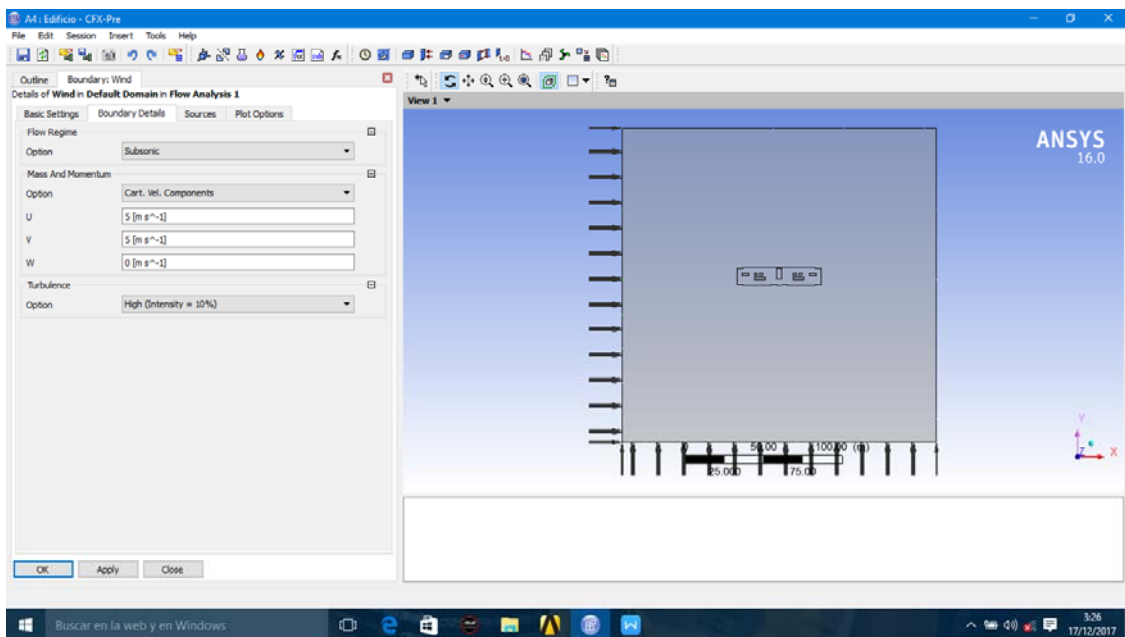


Figura 2.7 Condición de frontera para la entrada del fluido.

Se le establecieron las componentes cartesianas de las velocidades en los contornos que se encuentran orientados hacia el norte y el este respectivamente, que son las zonas donde predomina la mayor frecuencia de la dirección del viento, formando un ángulo de 35° con respecto al norte.

El ambiente que rodea el edificio se le estableció una condición tipo abierto (opening) con una presión relativa de 0 atm lo cual garantiza que la presión del ambiente va a ser

igual a la atmosférica y que el dominio empleado es infinito, independientemente de la porción en estudio.

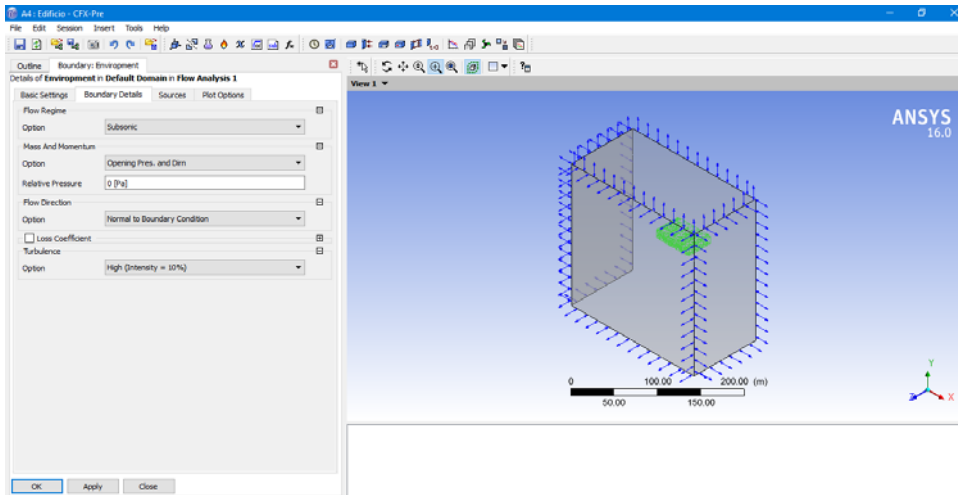


Figura 2.8. Condición de frontera tipo abierta para el fluido que rodea el edificio.

Finalmente, en paredes del edificio se estableció una condición tipo pared con deslizamiento (Free slip wall) lo cual garantiza la restricción en el desplazamiento del fluido permitiendo su deslizamiento a través de la superficie del edificio.

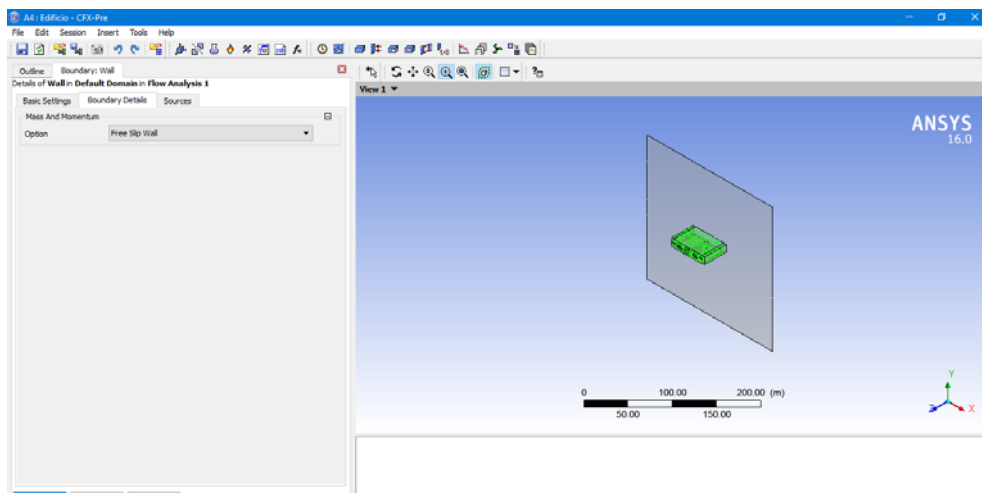


Figura 2.9 Condición de frontera tipo pared con deslizamiento libre (free slip wall) establecida a las superficies del edificio.

Para considerar la turbulencia del fluido en estudio fue empleado el método de turbulencia Shear Stress Transport k- ω (SST k- ω por sus siglas en inglés) el cual conjuga las ventajas de los métodos estándar k- ϵ y k- ω en las diferentes regiones del fluido (Hossein & Jafarian, 2016 ; Menter, 2011; Mohamed et al., 2015; Rogowski & Maroński, 2015) .

A continuación se detalla la formulación del método SST k- ω , para determinar la energía cinética de turbulencia (k) y la tasa de disipación específica (ω).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (2.3)$$

En estas ecuaciones el término \tilde{G}_k representa la generación de energía cinética de turbulencia debido al gradiente de velocidad media, G_ω representa la generación de velocidad ω , calculado de la misma forma que en el modelo k- ω . Los términos Γ_k y Γ_ω representan la difusividad efectiva de k y ω respectivamente, Y_k y Y_ω representan la disipación de k y ω .

En este estudio se utilizó la ecuación de momento ya esta es la que describe con mayor precisión las propiedades del fluido en ambientes turbulentos, como es el caso que se está analizando.

Se establecieron como numero de iteraciones máximos 1000, así como un criterio de convergencia promedio de $1e^{-04}$ para todas las variables en estudio, el cual se considera apropiado para este tipo de análisis.

2.6 Conclusiones parciales del capítulo

Una vez finalizado el presente capítulo, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones parciales:

1. Se determinaron 19 puntos de medición ubicados en la azotea del edificio 14 plantas, próximos a la superficie frontal que se encuentran dispuestas en dirección a la zona norte y la superficie lateral se encuentra en dirección a la zona este, que son las de mayor incidencia de los vientos.
2. En la metodología se establecieron puntos de medición a diferentes alturas y a diferentes distancias hacia el exterior de la azotea.
3. En el estudio CFD se estableció un volumen de control correspondiente al fluido que rodea el edificio, se establecieron las condiciones de fronteras de acuerdo con las condiciones atmosféricas existentes en esta localidad, tomando en consideración la velocidad promedio obtenida en las mediciones y se empleó como método de análisis de la turbulencia el Shear Stress Transport $k-\omega$.

CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Este capítulo tiene como objetivo realizar un análisis de los resultados obtenidos en la investigación. En el mismo se determinan los valores de velocidad promedio y dirección predominante del viento por cada mes del año en los 19 puntos de medición, así como se realiza un estudio de simulación más detallado que permite determinar la posición adecuada para la ubicación del aerogenerador. Finalmente se presenta un estudio de caso donde se determina la potencia eólica disponible en el punto de mayor aprovechamiento eólico.

3.1 Distribución de frecuencias

La distribución de frecuencia de ocurrencia de los valores de velocidades obtenidos en las mediciones es representada en el histograma de frecuencia. Estos valores se encuentran ajustados a la función de densidad de probabilidades de Weibull, la cual de acuerdo con estudios realizados previamente se ajusta adecuadamente al comportamiento del viento.

En la figura 3.1 se observa el histograma de frecuencia para la componente horizontal del viento. La velocidad promedio del viento para las mediciones horizontales es de 8,5 m/s, llegando a alcanzar valores de 13.67 m/s.

La mayor densidad de valores se encuentra a partir de 5.5 m/s hasta 9.5 m/s y el 73.86% de las mediciones se obtienen para velocidades superiores a 5 m/s, a partir de los cuales es posible generar valores apreciables de potencia.

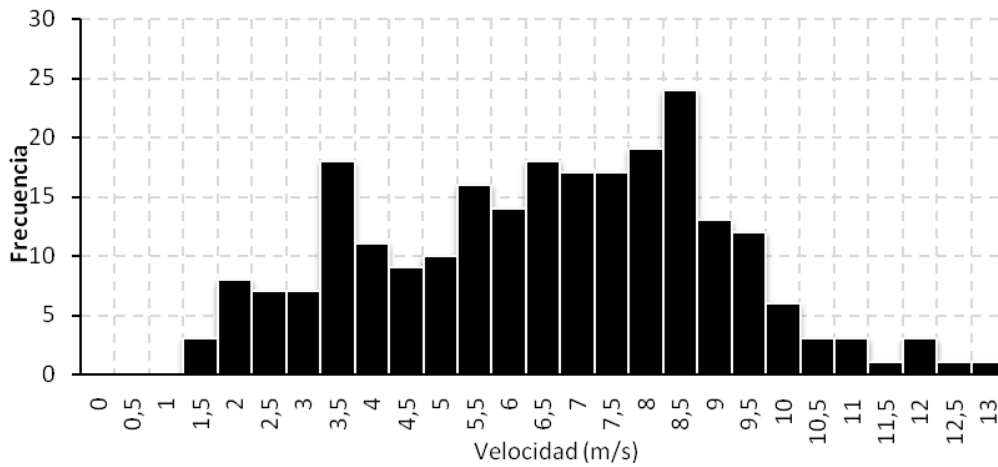


Figura 3.1 Mediciones de la componente horizontal de la velocidad del viento.

El histograma de frecuencia de la figura 3.2 muestra la frecuencia de ocurrencia de los valores de la componente vertical de velocidad, la cual se origina al chocar el viento contra las paredes del edificio y ser desviado paralelo a dicha superficie. En el mismo puede apreciarse una moda de 7 m/s con valor promedio de 6.54 m/s y máximo de 12.75 m/s, obteniendo el 72.31% de las mediciones superiores a 5 m/s.

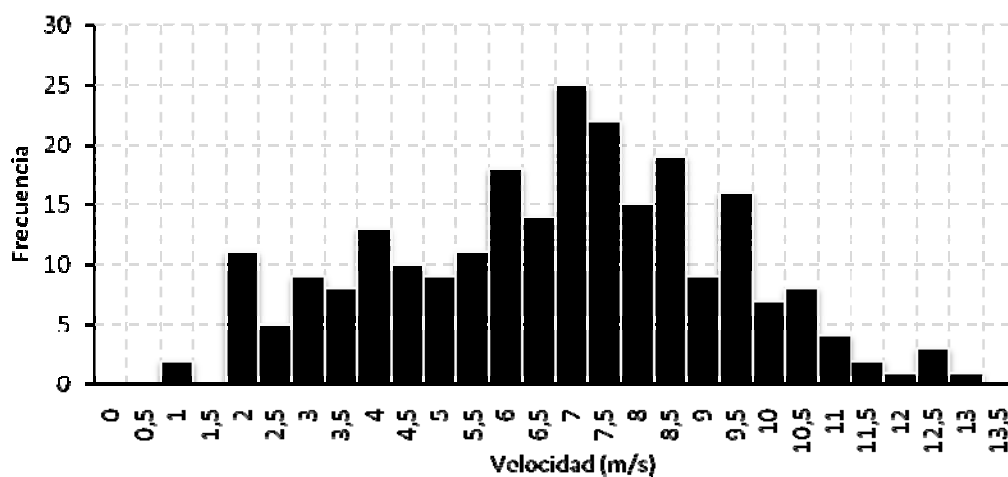


Figura 3.2 Mediciones de la componente vertical de la velocidad del viento.

Esta información es de gran importancia para determinar la forma de colocación de los rotores eólicos. Según los valores obtenidos, la colocación de forma horizontal y paralela a las paredes del edificio, a una altura por encima de la azotea, permitirá aprovechar las componentes horizontal y vertical del viento, incrementando de esta manera la potencia generada.

3.2 Variación mensual de los valores de velocidad del viento en los puntos de medición.

En la figura 3.3 puede observarse la variación mensual de la velocidad en los diferentes puntos de medición. Los puntos 1 y 19 presentan velocidades medias superiores a 5 m/s todos los meses del año, siendo el primero de estos donde se obtienen los valores mayores entre todos los puntos en estudio. Los puntos 2, 3 y 6 presentan valores favorables en más del 50% de los meses en estudios, mientras que el punto 4 es el menos favorable para la generación de energía eólica.

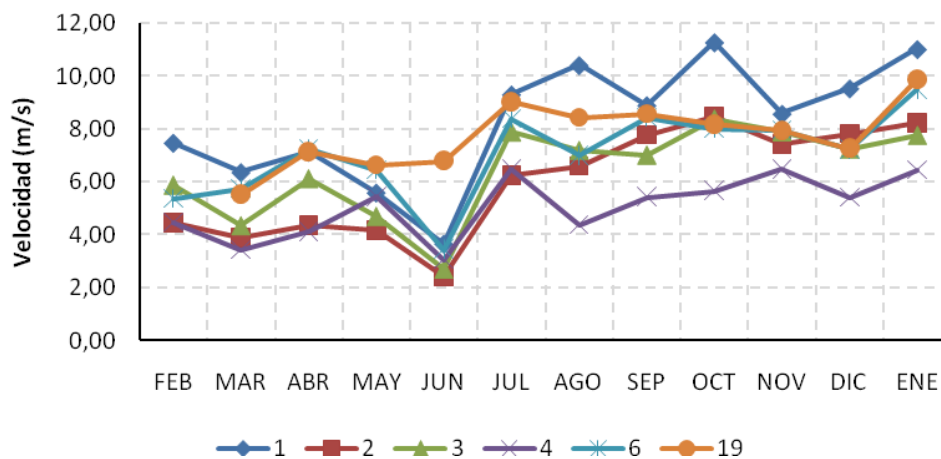


Figura 3.3 Variación mensual de la componente horizontal de la velocidad

Por lo general en los meses desde Julio hasta Enero, existe una mayor disponibilidad de energía eólica, obteniéndose los valores superiores en el mes de Enero. Ello está relacionado fundamentalmente con la llegada de frentes fríos que provocan un incremento considerable en la velocidad de los vientos, aunque existe una mayor dispersión. En los meses de julio y agosto se obtienen valores elevados de velocidad y con una mayor estabilidad, relacionados fundamentalmente con las brisas marinas que se generan por ser esta una zona costera.

En la figura 3.4 se representa la variación mensual de la componente vertical del viento, generada al chocar la masa de aire contra la superficie del edificio y ser desviada paralela a las paredes del mismo. En este caso el comportamiento es similar, en los meses desde Julio hasta enero se obtienen los valores mayores de la velocidad media del viento. Ello se debe a que en estos meses la dirección predominante del viento oscila entre el Noreste y el Norte, y estos viajan con componentes perpendiculares a la superficie frontal del edificio.

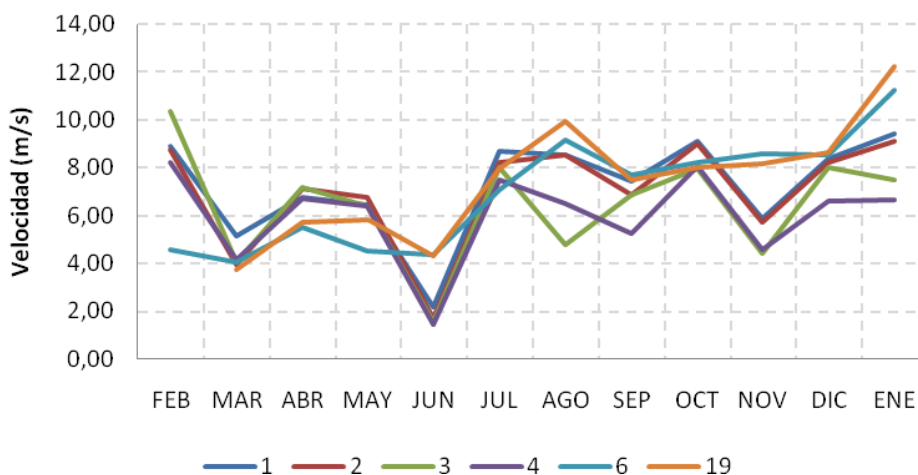


Figura 3.4 Variación mensual de la componente vertical de la velocidad

Los meses de marzo y junio son los menos favorables para la generación de energía eólica a partir de la componente vertical de viento, debido fundamentalmente a que en estos meses la dirección de viento predominante es del Este al Este – Sureste. Los puntos 1 y 19 presentan las condiciones más favorables, aunque por lo general, en la mayor parte de los puntos de estudio, existe un comportamiento similar.

En la figura 3.5 se muestra la variación del viento a la salida de los patinejos. Los meses desde Julio hasta Octubre y en diciembre y enero se obtienen los valores de velocidad mayores, relacionado fundamentalmente con la estabilidad en la dirección del viento en estos meses, la cual predomina de región norte al Norte-Noreste. En los meses de marzo y junio no existen condiciones en la mayor parte del año para generar electricidad a partir del viento.

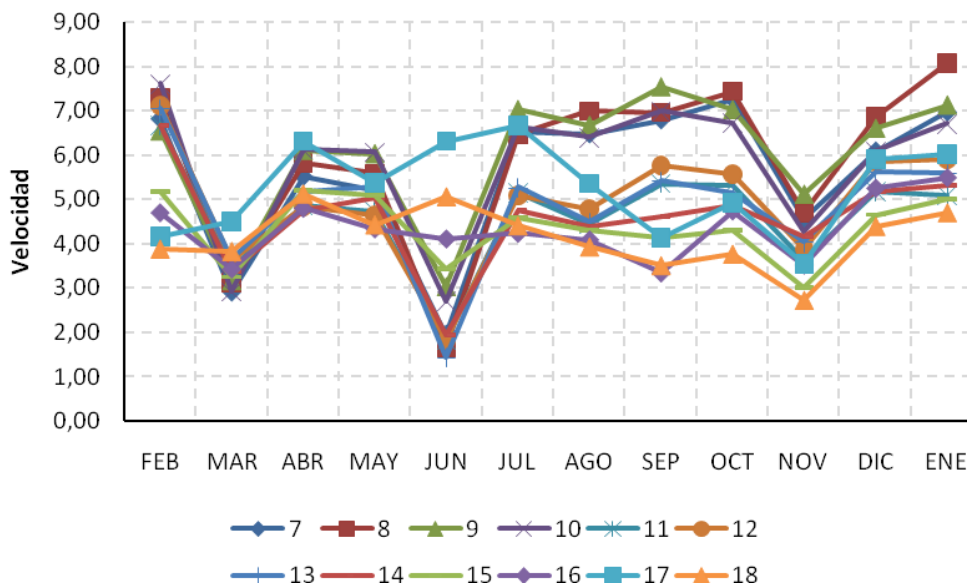


Figura 3.5 Variación mensual de la velocidad de los vientos en la salida de los patinejos.

Los patinejos 7, 8, 9, 10, 13 y 17 presentan velocidades superiores a 5m/s en más del 50% de los meses en estudio.

3.3 Estudio de la dirección predominante del viento.

En la figura 3.6 puede observarse que la dirección predominante del viento en la región de estudio es el Noreste, existiendo una buena parte de las mediciones de región Norte-Noreste, fundamentalmente estas se han concentrado en los meses de Octubre y Febrero. Esta dirección favorece la formación de las componentes verticales con una gran cantidad de energía que puede ser altamente aprovechada.

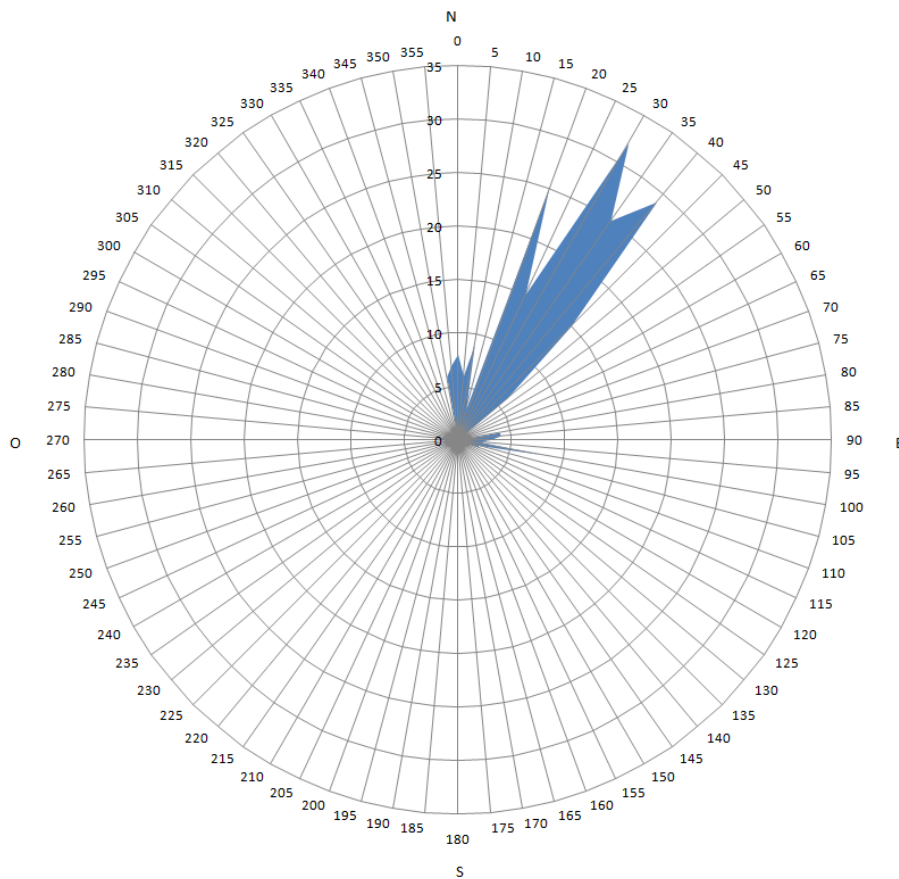


Figura 3.6 Dirección predominante de los vientos

Aunque en menor grado, también se han realizado mediciones con dirección del Este y el Este – Sureste, fundamentalmente en los meses de Marzo y Abril. Estas no generan componentes de vientos verticales, sin embargo, si pueden ser aprovechadas sus componentes horizontales en los puntos 6 y 19, por estar estos orientados hacia la zona este.

3.4 Variación de la velocidad del viento a diferentes distancias de la azotea.

Para determinar la aplicación de máximo aprovechamiento de los aerogeneradores, se realizó un estudio de simulación, con el objetivo de obtener a qué distancia de la azotea se obtienen las velocidades mayores de viento. Como patrón de estudio fueron escogidos los puntos 1 y 19, por ser estos los de resultados más favorables en el estudio realizado previamente.

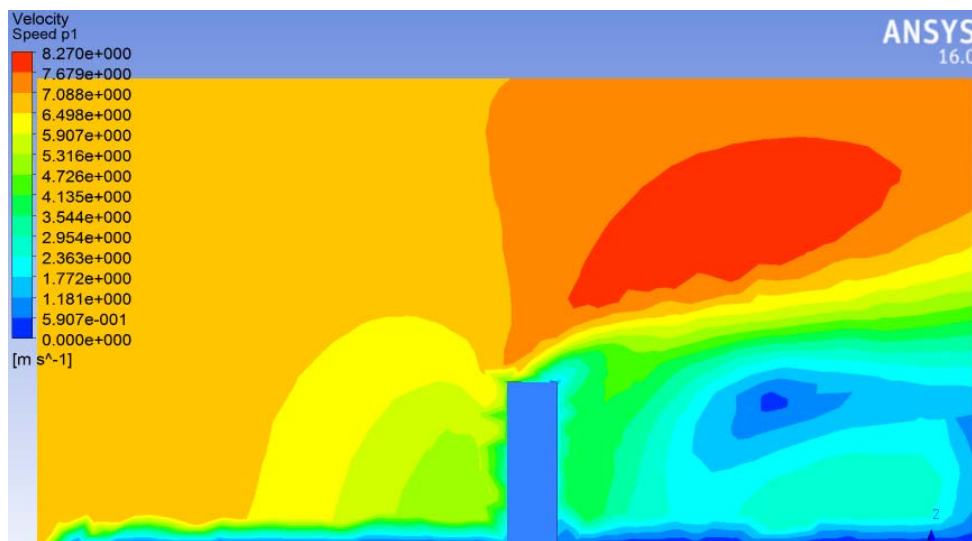


Figura 3.7 Vista lateral de componentes de velocidad total obtenidos en la simulación eólica en edificio 14 plantas.

En la figura 3.7 puede observarse la variación de los componentes de velocidad total alrededor del edificio. Como puede apreciarse en la vista lateral a partir de 3 metros de altura se obtienen valores superiores a 7 m/s que pueden ser aprovechados de manera eficaz.

A una altura de 10 m sobre la azotea, se obtienen los valores superiores de velocidad que alcanzan 8.27 m/s. Sin embargo, estos no pueden ser aprovechados por estar ubicado muy lejano de la superficie del edificio.

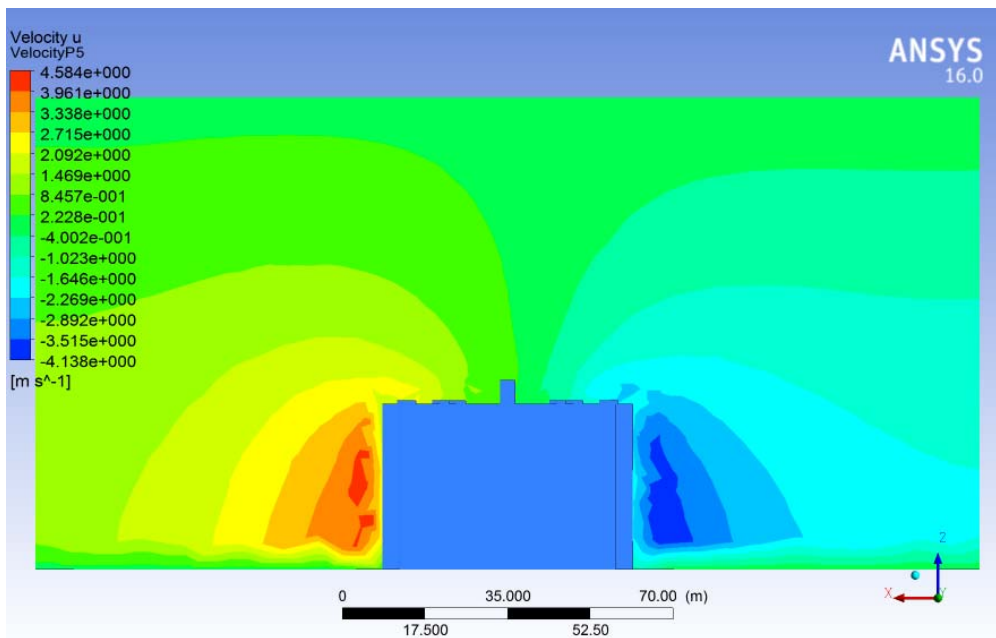


Figura 3.8 Vista frontal de componentes de velocidad en dirección X obtenidos en la simulación eólica en edificio 14 plantas.

En la figura 3.8 puede apreciarse que los componentes máximos de velocidad en dirección de X se obtienen en la superficie que se encuentra dispuesta hacia el este, obteniendo valores de 4.58m/s, mientras que en la pared opuesta se crea un vacío con

velocidades que 4.13 m/s, que no son posible de aprovechar debido a una gran inestabilidad y turbulencia.

En la figura 3.10 se puede apreciar que los valores de la velocidad del viento varían a diferentes alturas y que en la región norte del edificio se genera un flujo de aire apreciable el cual tiende a aumentar con la altura.

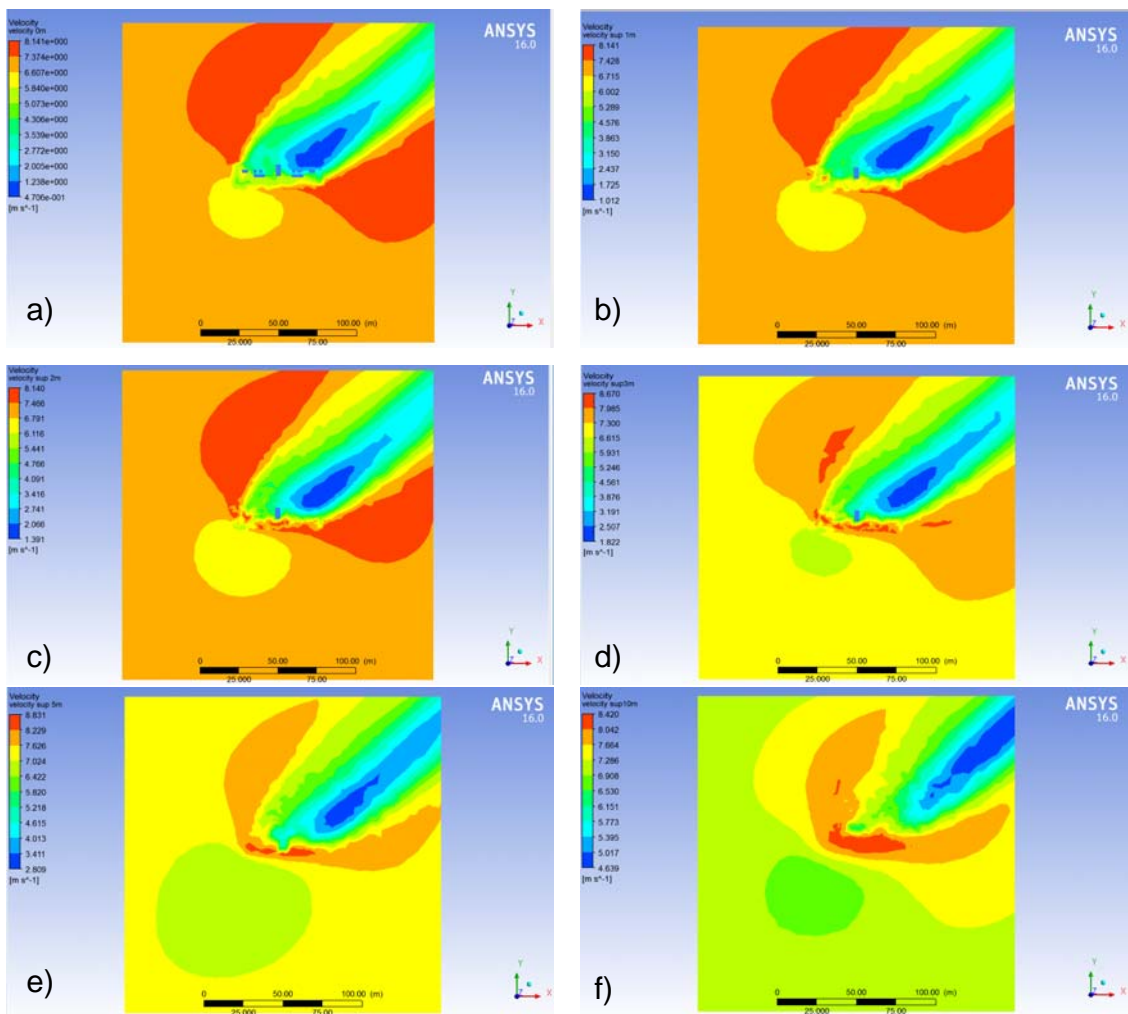


Figura 3.9 Vista superior de componentes de velocidad obtenidos a alturas de a)0m, b)1m, c)2m, d)3m, e)5m y f)6m sobre el nivel de la azotea.

De igual manera puede observarse que en la zona posterior del edificio se unen nuevamente las líneas de flujo formando un área donde se generan valores de velocidad superiores, sin embargo, estos no pueden ser aprovechados empleando aerogeneradores pequeños de eje vertical debido a que se generan a una distancia alejada de la azotea.

En la figura 3.10 puede apreciarse la similitud existente en los modelos de velocidad obtenidos por Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y experimentalmente. Aunque los valores mayores obtenidos por simulación se ubican a una altura de 3.5 m, a partir de 2 m el gradiente de velocidad disminuye considerablemente. Ello se refleja de igual manera en las mediciones experimentales donde el valor máximo de velocidad se obtiene a una altura de 2.5 m, a partir del cual disminuyen los valores de velocidad.

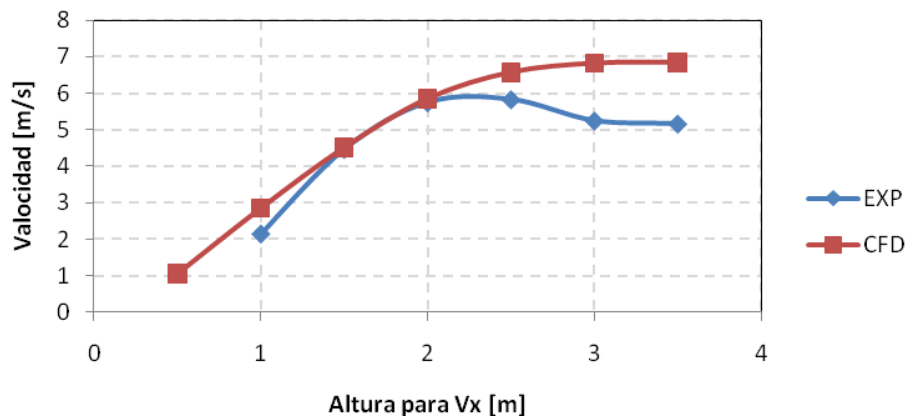


Figura 3.10 Variación de la componente horizontal de la velocidad en función de la altura.

En la figura 3.11 se muestra la variación de la componente vertical del viento a diferentes distancias en el eje horizontal y a una altura de 1 m de la azotea. Puede apreciarse que tanto en los valores obtenidos por simulación, como en los alcanzados por medición

directa, existe una tendencia a disminuir a medida que se aleja de la azotea, obteniéndose el valor máximo de velocidad precisamente encima del muro perimetral.

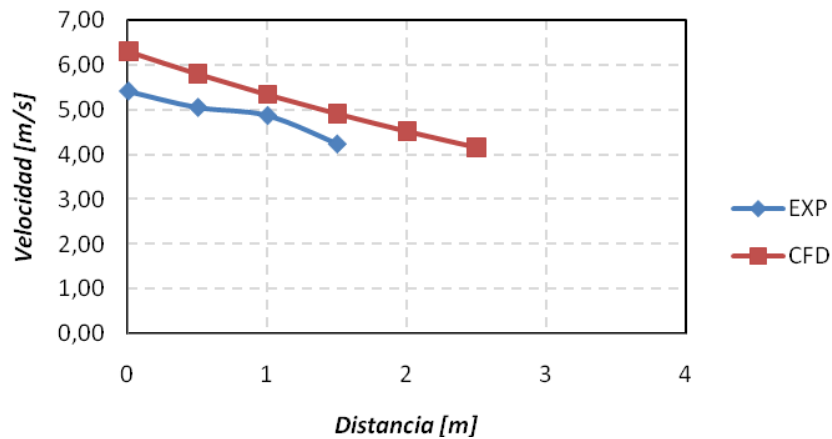


Figura 3.11 Variación de la componente vertical de la velocidad en función de la distancia X.

Los valores obtenidos sirven de referencia para determinar la posición de instalación de la turbina eólica, cuyo eje deberá ser instalado a una altura no superior a 2.5m sobre el extremo de la azotea, con el objetivo de aprovechar al máximo ambas componentes de vientos.

3.5 Aplicación y potencia generada por el rotor.

La sencillez del diseño del rotor, hace posible la instalación de múltiples rotores en un mismo eje, lo cual hace más eficiente el funcionamiento del mismo. A manera de ejemplo para el presente estudio se toma como referencia la ubicación en uno de los puntos con potencialidades presentes en el Edificio 14 Plantas de la ciudad de Matanzas, el cual ha sido objeto de estudio en investigaciones previas.

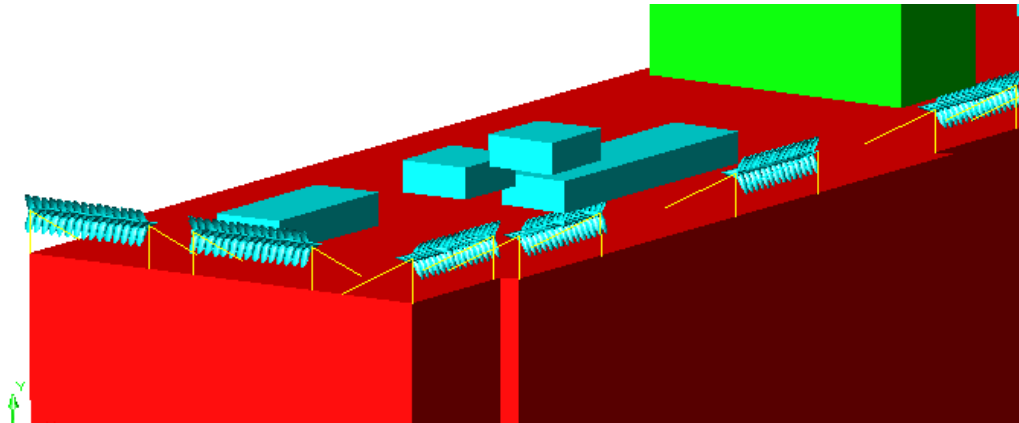


Figura 3.12 Ubicación de turbinas eólicas en azotea del edificio 14 plantas.

Los cálculos son realizados considerando que existe disponibilidad para el montaje de turbinas eólicas compuesta por rotores de diámetro $D = 1,8$ m y ancho $H = 0,4$ m, (escala 5:1).

Tabla 3.1 Potencia generada por el rotor.

Laterales		Patinejos	
Pto	Potencia (W)	Pto	Potencia (W)
1	2605,47	7	1805,40
2	1874,04	8	1915,12
3	2065,40	9	1938,81
4	1557,94	10	1873,70
6	2268,88	11	1503,52
19	2444,68	12	1597,31
		13	1559,81
		14	1484,45
		15	1404,30
		16	1385,48
		17	1641,96
		18	1327,62
Total	12816,41	Total	19437,48

Aplicando turbinas con rotores de diámetro $D = 1,8$ m y ancho $H = 0,4$ m, (escala 5:1) aplicada en los puntos de mayor aprovechamiento eólico, considerando en este estudio el horario de 10:00am a 6:00pm, en el cual se obtienen valores apreciables de velocidad de viento se podría generar diariamente 12 826 Wh en los laterales y 19 437 Wh en los patinejos, para un total de 32 253,88 Wh. Los puntos 1 y 16 en los laterales y 8 y 9 en los patinejos son los de mayor aprovechamiento eólico, coincidiendo con los resultados obtenidos en las mediciones de viento, debido a que la potencia y la velocidad son directamente proporcionales.

Estos valores calculados previamente, podrían ser superiores puesto que existen varios puntos donde el número de rotores pudiera ser superior a 15. Además, se pudiera realizar un escalado superior (1:10) y el perfil del aerogenerador toroidal pudiera ser optimizado con lo cual se incrementaría la eficiencia del mismo.

3.6 Conclusiones parciales del capítulo

Una vez finalizado el presente capítulo, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones parciales:

1. El histograma de frecuencia permitió determinar que la mayor densidad de valores de velocidad de viento se encuentran entre 5,5 m/s y 9,5 m/s, obteniéndose valores promedios de 8 m/s para la componente horizontal y 6,54 m/s para la componente vertical.
2. El análisis estacional permitió determinar que los meses desde julio hasta diciembre, son los de mayor disponibilidad de energía eólica.

3. La Rosa de los vientos permitió determinar la mayor densidad de mediciones de la dirección predominante del viento entre 20° y 45° de región noreste.

4. La simulación del flujo de vientos a través del edificio permitió determinar la posición adecuada para la ubicación de los rotores eólicos, los cuales no deben estar instalados a una altura superior a 2,5 m con el fin de aprovechar al máximo tanto la componente horizontal, como la componente vertical del viento.

CONCLUSIONES

Como resultado final del trabajo desarrollado, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones:

1. El análisis de las fuentes bibliográfica permitió determinar las etapas para realizar el muestreo eólico y los modelos disponibles para la predicción del comportamiento del viento.
2. Se establecieron 19 puntos ubicados en la periferia de la azotea y en la salida de los patinejos del edificio donde se obtienen valores de velocidades que aportan una gran disponibilidad de energía.
3. Se estableció la metodología adecuada para realizar el muestreo eólico y la simulación del flujo de vientos a través del edificio empleando dinámica de fluidos computacional.
4. El análisis estacional permitió determinar existe disponibilidad de energía eólica la mayor parte del año en la región estudiada cuya dirección predominante es el noreste.
5. Se determinó la posición adecuada para la ubicación de las turbinas eólicas, estimándose que su montaje en los puntos de medición de mayor aprovechamiento eólico podría aportar diariamente de 15 a 20 kWh.

RECOMENDACIONES

Basadas en las conclusiones obtenidas y para la extensión futura del presente trabajo, se realizan las siguientes recomendaciones:

1. Se recomienda extender este trabajo y aplicar el mismo en otros puntos donde existan potencialidades como edificios, instalaciones hoteleras, escuelas y otras entidades estatales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACN. (2013). Cuba promueve el uso de la energía eólica. . *Agencia Cubana de Noticias*.
- Arbeloa, L., & Zurita, J. (2012). Diseño de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius para electrificación rural. . *Universidad Pública de Navarra. Bolivia*.
- Chang, T. P. (2011). Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy application. *Appl Energy*(88), 272-282.
- Dobrev, I., & Massouh, F. (2011). . CFD and PIV investigation of unsteady flow through Savonius wind turbine. *EnergyProcedia*(6), 711–720.
- Fernández, M. (2010). ENERGÍAS RENOVABLES Y DERECHO DE ACCESO A LA ENERGÍA.
- Fiallo, J., Santos, A., & Castro, M. (2013). . Análisis preliminar del límite de potencia eólica utilizando flujos continuados en un Micro Sistema Eléctrico. *Energética*, 34(3), . 1-12.
- Gaona, F. (2010). *Diseño y construcción de un generador eléctrico para un aerogenerador de baja potencia*. (Tesis para obtener el título de Ingeniero Electricista), Universidad Mochoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- GNANA SHEEL, K., & DEEPA, S. (2012). An Intelligent Computing Model for Wind Speed Prediction in Renewable Energy Systems. *Procedia Engineering*(30), 380-385.
- Hirsch, C. (2007). *Numerical computation of internal and external flows. The fundamentals of Computational Fluid Dynamics*, (L. J. W. a. Sons Ed.).
- Hossein, M., & Jafarian, A. (2016). Investigating the influence of dimensional scaling on aerodynamic characteristics of wind turbine using CFD simulation. . *Renewable Energ*(97), 162-168.
- Knopper, L., & Ollson, C. A. (2011). Health effects and wind turbines: A review of the literatura. *Environmental Health*, 10(78).
- Lanzafame, R., Mauro, S., & Messina, M. (2014). 2D CFD Modeling of H-Darrieus Wind Turbines using a Transition Turbulence Model. *Energy Procedia*(45), 131–140.
- Lincheta Mesa, E. T. (2015). Cuba Patent No.: OCPI.
- López, J. L., González , C., Zermeño, M. E., Mendoza, E., Pacheco, J., Ortiz, J. A., & Araiza, G. (2008). . Estadística Preliminar de los Vientos para la Zona Urbana de Aguascaliente. *Investigación y Ciencia*(41), 20-27.

- Menter, F. R. (2011). *Turbulence Modeling For Engineering Flows* (I. P.A. Canonsburg Ed.).
- Mohamed, M. H., A.M. Ali, & Afiz, A. A. (2015). , CFD analysis for H-rotor Darrieus turbine as a low speed wind energy converter. . *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18(1), 113.
- Quijano, J. (2013). *ESTUDIO NUMÉRICO Y OBSERVACIONAL DE LA DINÁMICA DE VIENTO PARACAS, ASOCIADO AL TRANSPORTE EÓLICO HACIA EL OCEANO FRENTE A LA COSTA DE ICA-PERÚ* (TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DEL MAR.), Universidad Peruana Cayetano Heredia.
- Rogowski, K., & Maroński, R. (2015). CFD Computation of the Savonius Rotor. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 53(1), 37-45.
- Terrero, E., Alejandro, A., & Carcassés, J. (2015). Procedimiento para diseñar el muestreo eólico en una región promisoría. Parte I Teoría y algoritmo general. *Ingeniería Energética*, 36(2).
- Terrero, E., Legrá, A., & Lamorú, A. (2014). . Método de inverso de la potencia de la distancia para estimar la velocidad del viento. *Energética* 35(3).
- Terrero, E., Legrá, A. A., & Carcassés, J. (2015). . Procedimiento para diseñar el muestreo eólico en una región promisoría. Parte II. Implementación y aplicación. *Energética*, 36(2).
- Torabi, M., & al, e. (2016). Study on start-up characteristics of H-Darrieus vertical axis wind turbines comprising NACA 4-digit series blade airfoils. *Energy*(112), 528-537.
- Villarrubia, M. (2004). *ENERGÍA EÓLICA*.
- Wahyudi, B., Soeparman, S., & Hoeijmakers H W, M. (2015). Optimization design of Savonius diffuser blade with moving deflector for hydrokinetic cross flow turbine rotor. *Energy Procedia*, 68, 244 – 253.
- WANG, X. (2011). Are view of Wind Power Forecasting Models. *Energy Procedia*(12), 770-778.
- Werapun , W., Tirawanichakul , Y., & Waewsak, J. (2015). Comparative Study of Five Methods to Estimate Weibull Parameters for Wind Speed on Phangan Island, Thailand. . *Energy Procedia*(79), 976 – 981.
- Wong, K. H., Chong, W. T., Yap, H. T., Fazlizan, A., Omar, W. Z., Poh, S. C., & Hsiao, S. C. (2014). The design and flow simulation of a power-augmented shroud for urban wind turbine system. *Energy Procedia*, 61, 1275 – 1278.

ANEXOS

Anexo 1 Variación mensual de la velocidad de los vientos.

Mediciones horizontales

	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE
1	7,47	6,36	7,13	5,59	3,65	9,30	10,41	8,89	11,27	8,57	9,53	11,02
2	4,46	3,89	4,35	4,17	2,42	6,25	6,59	7,77	8,46	7,43	7,82	8,22
3	5,89	4,35	6,13	4,70	2,70	7,90	7,20	7,02	8,39	7,91	7,26	7,77
4	4,47	3,43	4,12	5,44	3,06	6,48	4,37	5,43	5,66	6,48	5,40	6,45
6	5,36	5,74	7,25	6,44	3,43	8,39	6,99	8,43	8,01	7,96	7,23	9,50
19		5,51	7,14	6,63	6,79	9,04	8,43	8,57	8,19	7,95	7,27	9,89

Mediciones verticales

1	8,89	5,11	6,74	6,43	2,14	8,72	8,51	7,43	9,11	5,86	8,37	9,43
2	8,74	3,95	7,11	6,77	1,71	8,22	8,55	6,86	9,00	5,72	8,23	9,11
3	10,35	4,01	7,16	6,40	1,52	7,98	4,78	6,83	7,93	4,39	7,97	7,45
4	8,23	4,16	6,71	6,39	1,46	7,50	6,50	5,28	8,06	4,61	6,62	6,67
6	4,54	4,04	5,51	4,50	4,33	7,07	9,16	7,69	8,21	8,58	8,53	11,22
19		3,73	5,70	5,82	4,29	7,93	9,96	7,48	8,03	8,18	8,66	12,23

Patinejos

7	6,81	2,90	5,51	5,20	1,95	6,53	6,47	6,79	7,25	4,55	6,08	6,96
8	7,29	3,13	5,83	5,59	1,66	6,47	7,00	6,97	7,44	4,69	6,87	8,09
9	6,54	3,18	6,10	6,03	3,04	7,02	6,67	7,53	7,02	5,12	6,60	7,12
10	7,61	2,91	6,13	6,08	2,70	6,62	6,40	6,99	6,73	4,27	6,09	6,70
11	6,67	3,45	4,86	4,73	1,83	5,14	4,43	5,36	5,33	3,62	5,17	5,10
12	7,12	3,64	4,83	4,64	1,83	5,10	4,78	5,76	5,58	3,88	5,84	5,91
13	7,05	3,65	5,17	5,28	1,42	5,26	4,48	5,42	5,14	4,03	5,61	5,59
14	6,66	3,37	4,74	5,02	1,93	4,73	4,38	4,60	4,86	4,16	5,17	5,32
15	5,18	3,25	5,20	5,08	3,42	4,59	4,31	4,12	4,30	3,01	4,65	4,99
16	4,70	3,43	4,80	4,34	4,11	4,23	4,09	3,34	4,74	3,52	5,25	5,49
17	4,16	4,51	6,31	5,36	6,30	6,66	5,35	4,14	4,91	3,54	5,90	6,02
18	3,88	3,83	5,13	4,43	5,06	4,41	3,93	3,51	3,77	2,72	4,39	4,70

Anexo 2 Tabla de frecuencia de la dirección de los vientos.

RESUMEN DE FRECUENCIA

	1	2	3	4	5	6	
N-NE	0-44	25	25	26	25	26	25
NE-E	45-89	5	5	8	9	8	8
E-SE	90-134	3	3	2	2	3	4
SE-S	135-179	1	1	1	1	1	1
S-SO	180-224	1	1	1	1	1	1
SO-O	225-269	1	1	1	1	1	1
O-NO	270-314	1	1	0	0	0	1
NO-N	315-399	5	5	3	3	2	1

Anexo 3 Foto de medición de componente horizontal de velocidad del viento en punto 1.



Anexo 4 Foto de medición de velocidad en patinejos.

