



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

“ESTUDIO Y EXPERIMENTACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN MODELO DE ROTOR EÓLICO POR MEDIO DE ANÁLISIS DIMENSIONAL Y SIMILITUD PARA EVALUAR EL POTENCIAL ELÉCTRICO DISPONIBLE EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA”

HUILCA HERRERA, PAUL ANDRES

TRABAJO DE TITULACIÓN

TIPO: TRABAJOS EXPERIMENTALES

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

RIOBAMBA – ECUADOR

2018

ESPOCH

Facultad de Mecánica

APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

2018-07-12

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

HUILCA HERRERA PAUL ANDRES

Titulado:

**“ESTUDIO Y EXPERIMENTACION DEL FUNCIONAMIENTO DE UN MODELO
DE ROTOR EOLICO POR MEDIO DE ANALISIS DIMENSIONAL Y SIMILITUD
PARA EVALUAR EL POTENCIAL ELECTRICO DISPONIBLE EN LA CIUDAD DE
RIOBAMBA”**

Sea aceptado como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Ing. Carlos Santillán Mariño
DECANO FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Jorge Lema Morales
DIRECTOR

Ing. Edwin Viteri Núñez
MIEMBRO

ESPOCH

Facultad de Mecánica

EXAMINACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: HUILCA HERRERA PAUL ANDRES

TRABAJO DE TITULACIÓN: “ESTUDIO Y EXPERIMENTACION DEL FUNCIONAMIENTO DE UN MODELO DE ROTOR EOLICO POR MEDIO DE ANALISIS DIMENSIONAL Y SIMILITUD PARA EVALUAR EL POTENCIAL ELECTRICO DISPONIBLE EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA”

Fecha de Examinación: 2017-03-16

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Ángel Guamán PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Jorge Lema Morales DIRECTOR			
Ing. Edwin Viteri Núñez MIEMBRO			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Ángel Guamán
PRESIDENTE TRIB. DEFENSA

DERECHOS DE AUTORÍA

El Trabajo de Titulación que presento, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad del autor. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Huilca Herrera Paúl Andrés

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Huilca Herrera Paúl Andrés, declaro que el presente Trabajo de Titulación es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación.

Huilca Herrera Paúl Andrés
Cedula de Identidad: 094040888-3

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mis padres Marquito y Custita quienes con su amor, sabiduría y paciencia hicieron de mí una persona de bien inculcándome cada día valores que hoy me llevan a culminar esta etapa de mi vida. A mi hermano Santhyto y mi hermana Shashita, quienes siempre estuvieron a mi lado brindándome un amor y apoyo incondicional. A mi sobrina Joycita quien con su sonrisa tan tierna es mi inspiración y fuente de felicidad.

De igual manera a mis amigos y demás familiares que de una u otra manera influyeron en mi con sus consejos y apoyo incondicional durante mi formación académica.

Huilca Herrera Paúl Andrés

AGRADECIMIENTO

El más profundo agradecimiento a Dios por prestarme la vida y permitirme ser mejor persona cada día, a la Escuela de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Automotriz por las experiencias y conocimientos impartidos durante algunos años de mi vida, de igual manera a las personas que estuvieron a mi lado durante este trayecto lleno de desafíos.

Huilca Herrera Paúl Andrés

CONTENIDO

Pág.

RESUMEN SUMMARY

CAPÍTULO I

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Identificación del Problema.....	1
1.2	Justificación de la investigación.....	1
1.3	Alcance.....	1
1.4	Objetivos.....	2
1.4.1	<i>Objetivo general.....</i>	2
1.4.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	2

CAPÍTULO II

2.	MARCO REFERENCIAL.....	3
2.1	Antecedentes del estudio.....	3
2.2	Marco conceptual y teórico.....	5
2.2.1	<i>La energía eólica.....</i>	6
2.2.2	<i>La energía eólica en el mundo.....</i>	6
2.2.3	<i>Energía eólica en el Ecuador.....</i>	10
2.2.4	<i>Potencial eólico disponible en la provincia de Chimborazo.....</i>	12
2.2.5	<i>Aerogeneradores.....</i>	13
2.2.5.1	<i>Aerogenerador de eje horizontal vs aerogenerador de eje vertical.....</i>	13
2.2.6	<i>Aerogeneradores de eje horizontal.....</i>	14
2.2.6.1	<i>Partes de un aerogenerador de eje horizontal.....</i>	17
2.2.6.2	<i>Aerodinámica de los aerogeneradores de eje horizontal.....</i>	18
2.2.6.3	<i>Potencia disponible en aerogeneradores de eje horizontal.....</i>	18
2.2.7	<i>Perfiles aerodinámicos.....</i>	21
2.2.7.1	<i>Terminología y variables geométricas en los perfiles aerodinámicos.....</i>	22
2.2.8	<i>Fuerzas sobre un álabe.....</i>	24
2.2.8.1	<i>Fuerza de sustentación.....</i>	24
2.2.8.2	<i>Fuerza de arrastre.....</i>	25

2.2.8.3	<i>Teoría del elemento pala – fuerzas en turbinas de eje horizontal</i>	27
2.2.8.4	<i>Curvas características de un aerogenerador</i>	28
2.2.9	<i>Análisis dimensional entre modelos y prototipos</i>	30
2.2.10	<i>Leyes de similitud entre modelos y prototipos</i>	31
2.2.10.1	<i>Similitud geométrica</i>	31
2.2.10.2	<i>Similitud cinemática</i>	32
2.2.10.3	<i>Similitud dinámica</i>	33
2.2.11	<i>Parámetros adimensionales</i>	34
2.2.11.1	<i>Fuerzas de origen gravitacional</i>	34
2.2.11.2	<i>Fuerzas de origen viscoso</i>	35
2.2.11.3	<i>Fuerzas debido a la tensión superficial</i>	35
2.2.11.4	<i>Fuerzas debido a la presión</i>	36
2.2.11.5	<i>Fuerzas de compresión elástica</i>	36
2.2.12	<i>Sistema de adquisición de datos DAQ</i>	37
2.2.12.1	<i>Sensores de medida</i>	37
2.2.12.2	<i>Tarjetas de adquisición de datos</i>	37
2.2.12.3	<i>Software LabView</i>	38
2.3	Hipótesis.	38
2.3.1	<i>Hipótesis Nula</i>	38
2.3.2	<i>Hipótesis Alternativa</i>	38
2.4	Variables	39
2.4.1	<i>Variable Independiente</i>	39
2.4.2	<i>Variable dependiente</i>	39
CAPÍTULO 3		
3.	MARCO METODOLÓGICO	40
3.1	Tipo y nivel de investigación.	40
3.2	Descripción del ámbito de investigación.	40
3.3	Población y muestra.	41
3.3.1	<i>Población</i>	41
3.3.2	<i>Muestra</i>	41
3.4	Técnicas e instrumentos.	41
3.4.1	<i>Técnicas de escalamiento</i>	41
3.4.1.1	<i>Teorema π de Vaschy-Buckingham</i>	41

3.4.1.2	<i>Similitud geométrica</i>	44
3.4.1.3	<i>Similitud cinemática</i>	45
3.4.1.4	<i>Similitud dinámica</i>	46
3.4.2	<i>Técnica de modelado y simulación en 3D</i>	47
3.4.2.1	<i>Generación de la geometría y el sólido del modelo</i>	47
3.4.2.2	<i>Simulación en Ansys</i>	55
3.4.3	<i>Técnica de construcción del modelo</i>	67
3.4.3.1	<i>Recopilación de datos</i>	69
3.4.4	<i>Instrumentos</i>	70
3.4.4.1	<i>Instrumentos de medición, control y adquisición de datos</i>	70
3.4.4.2	<i>Softwares requeridos</i>	71
3.4.4.3	<i>Procesamiento de datos</i>	71
CAPÍTULO IV		
4.	RESULTADOS	72
4.1	Resultados obtenidos.	72
4.1.1	<i>Evaluación de la capacidad de generación de energía eléctrica en Atillo</i>	72
4.1.2	<i>Evaluación de la capacidad de generación de energía eléctrica en Urbina</i>	75
4.1.3	<i>Comparación de resultados entre Atillo y Urbina</i>	78
CAPÍTULO V		
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	79
5.1	Conclusiones	79
5.2	Recomendaciones	80

BIBLIOGRAFÍA
ANEXOS

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1-2: Especificaciones técnicas – AE-59.....	11
Tabla 2-2: Especificaciones técnicas – GW70/1500.....	11
Tabla 3-2: Familia de perfiles NACA.....	23
Tabla 1-3: Parámetros influyentes en la experimentación	42
Tabla 2-3: Dimensiones de las variables más relevantes	42
Tabla 3-3: Datos del prototipo de aerogenerador MM82.....	44
Tabla 4-3: Perfiles NACA del prototipo de aerogenerador MM82	48
Tabla 5-3: Coordenadas de los perfiles aerodinámicos.....	49
Tabla 6-3: Componentes del modelo de aerogenerador.....	54
Tabla 7-3: Proceso de mallado del modelo de aerogenerador	57
Tabla 8-3: Niveles de calidad de la malla	58
Tabla 9-3: Condiciones de contorno	58
Tabla 10-3: Parámetros de impresión 3D	67
Tabla 11-3: Proceso constructivo del modelo de aerogenerador.	68
Tabla 12-3: Instrumentos electrónicos empleados.....	70
Tabla 13-3: Software empleados.....	71
Tabla 1-4: Potencia eléctrica y velocidad del viento - Estación Atillo	72
Tabla 2-4: Potencia eléctrica y velocidad del viento - Estación Urbina	75

LISTA DE GRÁFICOS

	Pág.
Gráfico 1-2: Fuentes de energía para el consumo mundial	7
Gráfico 2-2: Costo de producción de energía eólica.....	7
Gráfico 3-2: Potencia eólica instalada a nivel mundial.....	8
Gráfico 4-2: Potencia eólica instalada a nivel mundial acumulada	8
Gráfico 5-2: Potencia eólica instalada por regiones.....	8
Gráfico 6-2: Países con mayor potencia eólica instalada en el 2016	9
Gráfico 7-2: Potencia eólica acumulada instalada en diferentes países	9
Gráfico 8-2: Producción ERNC 2014 - 2015.....	11
Gráfico 9-2: Coeficientes de sustentación y arrastre.....	26
Gráfico 10-2: Curva de potencia de un aerogenerador de eje horizontal	28
Gráfico 11-2: Variación del coeficiente de par y de empuje	30
Gráfico 1-3: Calidad de la malla	58
Gráfico 1-4: Capacidad de generación – Estación Atillo.....	73
Gráfico 2-4: Torque generado – Estación Atillo.....	74
Gráfico 3-4: Torque generado en función de la potencia eléctrica – Estación Atillo	74
Gráfico 4-4: Capacidad de generación – Estación Urbina	76
Gráfico 5-4: Torque generado – Estación Urbina	77
Gráfico 6-4: Torque generado en función de la potencia eléctrica – Estación Urbina	77
Gráfico 7-4: Comparación de curvas de potencia eléctrica entre las 2 estaciones.....	78
Gráfico 8-4: Capacidad de generación de las 2 estaciones	78

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1-2: Mapa de la provincia de Chimborazo	12
Figura 2-2: Aerogenerador de eje horizontal	15
Figura 3-2: Aerogenerador a sotavento	15
Figura 4-2: Aerogenerador a barlovento.....	16
Figura 5-2: Evolución de un aerogenerador eólico en el tiempo	16
Figura 6-2: Partes de un aerogenerador	17
Figura 7-2: Flujo de aire a través de un rotor eólico.....	18
Figura 8-2: Flujo de aire idealizado a través de un rotor eólico	19
Figura 9-2: Nomenclatura de un perfil aerodinámico.....	22
Figura 10-2: Perfiles NACA.....	24
Figura 11-2: Fuerza de sustentación y arrastre en un álabe de aerogenerador	25
Figura 12-2: Álabe en pérdida	25
Figura 13-2: Fuerzas presentes en el álabe de un aerogenerador.....	27
Figura 14-2: Similitud geométrica entre prototipo y modelo	31
Figura 15-2: Similitud geométrica en modelo distorsionado.....	32
Figura 16-2: Similitud cinemática entre prototipo y modelo.....	32
Figura 17-2: Similitud dinámica entre prototipo y modelo	33
Figura 18-2: Fuerzas presentes sobre el flujo	34
Figura 19-2: Proceso de adquisición de datos.....	37
Figura 20-2: Esquema del funcionamiento de un sensor	37
Figura 21-2: Procesador de datos - Arduino.....	38
Figura 22-2: Software LabView	38
Figura 1-3: Modelo de aerogenerador REpower MM82	45
Figura 2-3: Secuencia para generación de perfil aerodinámico.....	48
Figura 3-3: Interface de solidworks para la generación de los perfiles	51
Figura 4-3: Interface de solidworks , vista en alzado de los perfiles	52
Figura 5-3: Interface de solidworks , vista en isométrico de los perfiles.....	52
Figura 6-3: Interface de solidworks , recubrimiento de los perfiles	53
Figura 7-3: Interface de solidworks , vista en isométrico del álabe.....	53
Figura 8-3: Componentes del modelo de aerogenerador	55

Figura 9-3: Regiones para simulación	56
Figura 10-3: Secciones de configuración de setup	59
Figura 11-3: Secciones de configuración - general.....	60
Figura 12-3: Secciones de configuración - modelo de solución	61
Figura 13-3: Secciones de configuración - materiales	61
Figura 14-3: Secciones de configuración – condiciones de zona	62
Figura 15-3: Secciones de configuración – condiciones de borde.....	63
Figura 16-3: Secciones de configuración – método de solución	63
Figura 17-3: Líneas de flujo.....	64
Figura 18-3: Líneas de flujo en el rotor eólico	65
Figura 19-3: Caída de presión en las aspas.....	65
Figura 20-3: Caída de presión en la dirección del viento	66
Figura 21-3: Caída de presión en el perfil aerodinámico.....	66

LISTA DE ABREVIACIONES

GEAA	Grupo de Energías Alternativas y Ambiente
ESPOCH	Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
CEAA	Centro de Investigación en Energías y Ambiente
GWEC	Global Wind Energy Council
HAWTS	Horizontal Axis Wind Turbines
BEM	Blade Element Momentum
DAQ	Data AcQuisition
NACA	National Advisory Comitee for Aeronautics

SIMBOLOGÍA

A_1	Área inicial del cilindro de corriente de aire	m^2
P_1	Presión antes del rotor eólico	Pa
V_1	Velocidad del viento libre	m/s
A	Área de barrido por los álabes	m^2
V	Velocidad del viento al pasar por el rotor	m/s
A_2	Área final del cilindro de corriente de aire	m^2
P_2	Presión después del rotor eólico	Pa
V_2	Velocidad del viento después de atravesar el rotor	m^2
\dot{m}	Flujo másico	Kg/s
F	Fuerza de empuje sobre el rotor	N
ρ	Densidad del aire	Kg/m^3
a	Factor de inducción axial	
C_p	Coefficiente de potencia	
F_L	Fuerza de sustentación	N
γ	Ángulo de ataque	°
F_D	Fuerza de arrastre	N
C_L	Coefficiente de sustentación	
c	Cuerda del perfil	Mm
C_D	Coefficiente de arrastre	
W_t	Velocidad tangencial del alabe	m/s
W_{rel}	Velocidad relativa del viento	m/s
M	Momento par	$N*m$
σ	Solidez del aerogenerador	1/m
C_M	Coefficiente de par	
λ_G	Coefficiente de escala geométrico	
λ_C	Coefficiente de escala cinemático	
λ_D	Coefficiente de escala dinámico	
u	Volumen	m^3
F_r	Fuerza de origen gravitacional	N
Re	Número de Reynolds	
b	Ancho del perfil	mm

LISTA DE ANEXOS

Anexo A	Graficas de los coeficientes de los perfiles naca
Anexo B	Ficha de recolección de datos proporcionados por labview
Anexo C	Código de programación en arduino
Anexo D	Desing data - aerogenerador mm82 senvion
Anexo E	Product description - aerogenerador mm82 senvion
Anexo F	Perfiles aerodinámicos

RESUMEN

El objetivo de este trabajo de titulación es determinar el potencial eléctrico disponible en la ciudad de Riobamba empleando un modelo de rotor eólico tomando en cuenta el potencial eólico existente. En la elaboración de este trabajo experimental, se estudió el estado del arte de este tipo de experimentaciones, se investigó, analizó y determinó los coeficientes de escalamiento cumpliendo con las leyes de similitud geométrica, cinemática y dinámica entre modelos y prototipos, considerando también el teorema de π de Vaschy-Buckingham para determinar los números adimensionales, posteriormente, se efectuó la modelación CAD del modelo de aerogenerador en Solidworks para su posterior análisis por medio de elementos finitos, para conocer el comportamiento de las líneas de flujo, se procedió a la fabricación del modelo de rotor eólico empleando la técnica de impresión 3D, de igual forma se implementó en el túnel de viento equipos y elementos que permitieron adquirir los datos de manera confiable y automática, los datos adquiridos fueron la velocidad del viento, la potencia eléctrica generada por el modelo de rotor eólico y la velocidad de rotación del eje. Se realizaron las pruebas experimentales con los datos del potencial eólico de Urbina y Atillo, obteniendo un potencial eléctrico de 0.52 [W] para Atillo y 1.25 [W] para Urbina con lo que se determinó que es viable la implementación de un parque eólico ya que el prototipo tendrá una capacidad de generación aproximada de 1750 KW. Se recomienda continuar la investigación entre modelos y prototipos no solo en el campo de la generación de energía, sino también en otras áreas, tomando como base la metodología planteada en esta experimentación realizada.

Palabras clave: <TECNOLOGÍAS Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <INGENIERÍA MECÁNICA>, <ROTOR EÓLICO> <ENERGÍA EÓLICA> <LEYES DE SIMILITUD> <GENERACIÓN ELÉCTRICA> <ANÁLISIS DIMENSIONAL> <PERFILES AERODINÁMICOS>

SUMMARY

This research work is aimed to determine the electrical potential available in Riobamba city by using a wind rotor model taking into account the existing wind potential. The state of the art of this type of experiments was studied in this experimental work, in addition, the scaling coefficients were investigated, analyzed and determined complying with the laws of geometric similarity, kinematics and dynamics between models and prototypes and also taking into account the π theorem by Vaschy-Buckingham to determine the dimensionless numbers. After that, the CAD modeling of the wind turbine model in solidworks was carried out for its subsequent analysis by means of finite elements. The wind rotor modeling was manufacture by using the 3D printing technique in order to know the flow lines behavior. Equipment and elements that allowed to acquire reliably data was implemented in the wind tunnel, the data acquired were the wind speed, the electrical power generated by the wind rotor model and the shaft rotational speed. The experimental trials were carried out with the data from the wind power potential of Urbina an Atillo, obtaining an electrical power of 0.52 [W] IN Atillo and 1.25 [W] in Urbina. So, it was determined that the implementation of a wind farm is viable since the prototype will have an approximate generation capacity of 1750 [KW]. It is recommended to continue with research between models and prototypes not only in the power generation field, but also in other areas based on the methodology proposed in this experiment.

KEYWORDS: <TECHNOLOGIES AND ENGINEERING SCIENCES> <MECHANICAL ENGINEERING> <WIND ROTOR> <WIND POWER> <SIMILARITY LAWS> <POWER GENERATION> <DIMENSIONAL ANALYSIS> <AERODYNAMIC FEATURES>

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN.

1.1 Identificación del Problema.

Cuando se discute la situación energética en países en desarrollo como el Ecuador y especialmente en las áreas donde existe potencial eólico, es de reconocimiento general que las pequeñas centrales eólicas juegan un importante rol en el desarrollo de las mismas. Sin embargo, el costo de inversión inicial de las pequeñas centrales eólicas es considerado relativamente alto y esto ha restringido, en algunos países más que en otros, de manera considerable el desarrollo de estas potenciales energías renovables.

En la provincia de Chimborazo, previo a este trabajo experimental, el Grupo de Energías Alternativas y Ambiente (GEAA) de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), ha recopilado a lo largo de los años una serie de datos informativos que involucran las velocidades del viento en distintas zonas de la provincia, los mismos que fueron tratados y analizados por medio de un trabajo de investigación obteniendo como resultado que en las estaciones de Atillo y Urbina existe un potencial eólico considerable para la implementación de un parque eólico, a la vez en dicho trabajo de investigación también hacen una propuesta del tipo de aerogenerador que se debería implementar en estas dos zonas de la provincia.

La falta de información sobre el comportamiento de los rotores eólicos expuestos a diferentes condiciones, ha sido el motivo principal por el cual no se ha podido desarrollar este tipo de proyectos de energía renovable en la provincia y el país, obligando de esta manera a emplear combustibles fósiles que contaminan el ambiente.

1.2 Justificación de la investigación.

La elaboración de este estudio permitirá conocer de forma puntual el proceso del análisis dimensional entre el modelo y prototipo de aerogenerador, cumpliendo con las condiciones de similitud geométrica, dinámica y cinemática, mismas que servirán como base fundamental para su modelado geométrico y fabricación final y así poder realizar la experimentación con un modelo de rotor eólico adecuado.

La experimentación también permitirá recopilar datos reales acerca del comportamiento del rotor eólico, los cuales mediante su análisis proveerá información sobre la capacidad de generación de energía eléctrica que obtendremos del prototipo.

Para realizar el análisis del comportamiento de un modelo de rotor eólico expuesto a diferentes condiciones, se requiere la aplicación del método experimental, ya que por medio de este se podrá medir, recopilar, analizar e interpretar datos de los diferentes parámetros característicos de un rotor eólico y así proceder al análisis de los mismos, obtener las gráficas de las curvas características de un rotor eólico, para posteriormente compararlas con las curvas del prototipo de tal forma que se podrá predecir cuál sería la capacidad generación de energía eléctrica de un potencial eólico analizado.

Cabe mencionar que el trabajo experimental propuesto esta también justificado por los siguientes aspectos:

- Aprovechamiento del túnel de viento didáctico del laboratorio de mecánica de fluidos de la facultad, que tiene equipos de mayor exactitud, fiabilidad y confiabilidad.
- Con un costo económico mínimo, a esta experimentación de pruebas se acoplarán accesorios o elementos que permitan monitorear ciertos parámetros.
- Con este proyecto, se ganará en funcionalidad, ya que fortalecerá los laboratorios de mecánica de fluidos de la facultad.
- La posibilidad de realizar una mayor cantidad de prácticas del funcionamiento de un rotor eólico, por parte de los estudiantes, personas y entidades ajenas a la facultad, ya que es un módulo didáctico que permitirá experimentar con datos reales de diferentes zonas del país.

Además, se conoce también que en la ESPOCH no existen temas relacionados con el análisis dimensional y leyes de similitud aplicado a modelos y prototipos anteriormente desarrollados, motivo por el cual se propone realizar una metodología para este tipo de trabajos de investigación.

1.3 Alcance

Por medio de la realización de este trabajo de tipo experimental se determinara los parámetros adimensionales y factores de escala geométrico, dinámico y cinemático entre el modelo y

prototipo de un rotor eólico; se desarrollara también una metodología que permita obtener la geometría correcta del modelo para su posterior fabricación y simulación mediante el análisis de elementos finitos; además se implementara la instrumentación requerida en el túnel de viento y en el modelo de rotor eólico para obtener los datos al realizar la fase experimental para el posterior análisis de resultados, logrando obtener finalmente las curvas características de un modelo de rotor eólico y así compararlas con las del prototipo estimando finalmente la potencia eléctrica que se podría generar.

1.4 Objetivos.

1.4.1 *Objetivo general*

Estudiar mediante la experimentación el funcionamiento de un modelo de rotor eólico por medio de análisis dimensional y similitud para evaluar el potencial eléctrico disponible en la ciudad de Riobamba.

1.4.2 *Objetivos Específicos*

- Examinar el estado del arte correspondiente al estudio mediante la experimentación y leyes de semejanza de rotores eólicos.
- Cumplir las condiciones de similitud geométrica, cinemática y dinámica entre el modelo y el prototipo.
- Implementar las condiciones idóneas para la experimentación.
- Desarrollar la fase experimental.

CAPÍTULO II

2. MARCO REFERENCIAL.

2.1 Antecedentes del estudio.

El empleo de la energía eólica en el mundo se remonta desde tiempos antiguos ya que las primeras evidencias del uso del viento como fuente de energía se dan en el siglo XVII, donde se la empleó principalmente para el transporte naval por medio de barcos a vela, así como también para sistemas de bombeo de agua basados en molinos de viento empleados para el riego agrícola. (EKIDOM, 2010)

El principio de funcionamiento de la energía eólica consiste en convertir la energía que se produce al exponer las palas de un molino de viento en energía mecánica, esta energía es absorbida por un eje giratorio conectado a las aspas del molino de viento, y a su vez este eje se puede conectar a diferentes tipos de máquinas como moladoras de granos, bombas empleadas para el transporte de fluidos o para la generación de energía eléctrica. (NÚÑEZ SILVA, y otros, 2017)

Hoy en día la energía eólica es una de las principales fuentes de energía renovable que mayor crecimiento y desarrollo tecnológico ha presentado durante los últimos años, ya que este tipo de energía muestra una variedad de ventajas pues es un tipo de energía que se renueva, es totalmente inagotable, no produce contaminación y reduce el uso de combustibles fósiles, debido a todas estas ventajas el desarrollo de este tipo de tecnología para la generación eléctrica se ha ido incrementando, ya sea en pruebas a gran escala así como también en modelos sometidos a situaciones reales durante pruebas controladas en el laboratorio o también por medio de softwares de simulación es decir análisis computacional CFD. Logrando así de esta manera experimentar nuevas propuestas de diseño y de esta forma seguir potenciando el desarrollo de este tipo de energía.

En la universidad politécnica de Madrid mediante un trabajo de investigación se construyó una mini turbina eólica de eje horizontal mediante la impresión 3D, la misma que permitió experimentar a distintas velocidades del viento y obtener las respectivas curvas de funcionamiento y así de esta forma determinar si su perfil y modelo de aerogenerador desarrollado sería óptimo para implementarlo. (DE CASTRO, 2014)

Por otra parte en la escuela politécnica del litoral (ESPOL), se elaboró un modelo CFD de generador eólico el cual posteriormente se validó con la experimentación, desarrollando una metodología de estudio que permite predecir la potencia que se obtendrá al exponer un modelo dado de aerogenerador a condiciones reales, una herramienta realmente útil que disminuye los costos de experimentación ya que se realiza netamente mediante herramientas CAD y CFD, además se puede realizar modificaciones en la geometría ya sea de las aspas o cualquier otro componente del aerogenerador y así buscar o desarrollar geometrías acorde a las condiciones a las cuales estarán expuestas alcanzando una eficiencia considerable. (ESPINOZA ROMÁN, 2008)

De igual forma en la universidad de Buenos Aires desarrollaron un rotor eólico experimental a escala y se ensayó en un túnel de viento, logrando experimentar con dicho modelo diferentes regímenes de viento y velocidad de rotación variable, además también dicho rotor permitió experimentar con distintos tipos de aspas, a fin de estudiar su comportamiento en distintas condiciones de ensayo. (SCHUPBACH, y otros)

En el Ecuador la energía eólica se la aprovecha desde el año 2007 con la inauguración del primer parque eólico con una capacidad de generación de 2.4 MW y una producción anual estimada de 3.2 GWh, este parque se encuentra ubicado en la isla San Cristóbal del archipiélago de Galápagos. Posterior a esto en el año 2011 en la provincia de Loja en el cerro Villonaco se construye un segundo parque eólico en el Ecuador que cuenta con 11 aerogeneradores con una capacidad de producción de 1.5 MW cada uno, este parque marco un hito en el Ecuador y en el mundo ya que consta con una velocidad promedio anual de 12.7 m/s y una altitud de 2700 msnm.

Se conoce también que en la isla Baltra se encuentra en construcción un proyecto eólico con una capacidad de 2.25 MW, La energía equivalente proporcionada por todos estos parques eólicos en el Ecuador logran abastecer los hogares de 150mil ecuatorianos. (GOBIERNO DE LA REPÚBLICA DEL ECUADOR, 2016)

La Escuela Superior Politécnica de Chimborazo a través del GEAA ha venido realizando distintas investigaciones desde el año 1995 en el área ambiental y energética.

El GEAA ha logrado realizar varias investigaciones las mismas que se han publicado y dado a conocer en diferentes eventos científicos, a la par del GEAA trabaja el centro de Investigación en Energías Alternativas y Ambiente (CEAA), el mismo que ha desarrollado distintas investigaciones en zonas alta andinas de la provincia de Chimborazo, las cuales tienen como objetivo preservar el ecosistema del páramo como un recurso para reducir el efecto invernadero

y a su vez conservar el recurso hídrico, todas estas investigaciones se llevan a cabo con un trabajo en conjunto de universidades ecuatorianas, así como también por las facultades y escuelas de ingeniería de la ESPOCH, por medio de trabajos de grado y postgrado.

El CEAA tiene implementado 11 estaciones de monitoreo en distintas localidades.

- Estación de monitoreo Espoch.
- Estación de monitoreo Aloa.
- Estación de monitoreo Atillo.
- Estación de monitoreo Cumandá.
- Estación de monitoreo Matus.
- Estación de monitoreo Quimiag.
- Estación de monitoreo San Juan.
- Estación de monitoreo Tixan.
- Estación de monitoreo Tunshi.
- Estación de monitoreo Urbina.

Todas estas estaciones por medio de herramientas tecnológicas nos han brindado a detalle las condiciones ambientales de dichas zonas, uno de estos datos obtenidos es el potencial eólico que brinda la provincia de Chimborazo, el cual ha sido estudiado y analizado por medio de un trabajo de pregrado el mismo que permitió conocer el prototipo de aerogenerador adecuado para las zonas de potencial eólico elevado sea un modelo MM82 fabricado por SENVION, a su vez también se obtuvo a detalle las velocidades del viento en dichas zonas.

2.2 Marco conceptual y teórico.

En el presente capítulo se pretende investigar los distintos parámetros y fundamentos que intervienen en la experimentación en modelos de rotores eólicos, la energía eólica en el Ecuador,

los principios básicos de la mecánica de fluidos, teoría del análisis dimensional y similitud entre modelos y prototipos, sistemas de adquisición de datos en la laboratorios y capacidad de generación de energía eléctrica.

Se parte del potencial eólico disponible en el mundo, Ecuador y la ciudad de Riobamba y el aerogenerador más idóneo para la generación de energía que se empleara para realizar la experimentación en el laboratorio.

Además, se analizará los diferentes modelos de experimentación, variables, medio ambiente, instrumentos, procedimiento experimental, análisis de resultados y todas las técnicas para realizar el estudio de experimento planteado.

2.2.1 *La energía eólica*

El aire en movimiento da origen a la energía eólica, es decir, este tipo de energía tiene su origen en el viento, se lo puede definir a este como una corriente de aire que resulta de la diferencia de presión que sufre la atmosfera, provocada en su mayoría de casos por la diferencia de temperatura que se da debido a la variación de la radiación solar en diferentes puntos de la tierra. (Ramón, 2014)

Se dice también que la energía eólica tiene un elevado potencial de desarrollo, es por ello que constituye una de las fuentes de energía renovable con mayor crecimiento, tanto por su técnica avanzada y su viabilidad económica. Asimismo, es una de las fuentes de energía que permite reducir las emisiones de CO₂. Actualmente se pueden encontrar máquinas eólicas con aplicaciones tan diversas como el accionamiento de bombas de agua para riego, la producción autónoma de electricidad o la generación eléctrica a gran escala, dichas maquinas se las encuentra en una amplia gama de potencias que van desde el centenar de vatios hasta el millar de kilovatios. (VILLARRUBIA, 2004)

2.2.2 *La energía eólica en el mundo*

En la actualidad el consumo de energía eléctrica se ha convertido en una necesidad indispensable, ya que la electricidad es una de las principales formas de energía usadas a nivel mundial en diferentes sectores como: las comunicaciones, el transporte, el abastecimiento de los alimentos y por lo general en la mayor parte de los servicios de oficinas, industria, hogares. Todos los sectores mencionados anteriormente dependen de un suministro confiable de energía eléctrica.

A medida de como los países se vayan industrializando el consumo mundial de energía ha aumentado muy rápidamente en los últimos años, según los diferentes estudios realizados el promedio del consumo de energía eléctrica por habitantes es alrededor de diez veces mayor en los países industrializados que en el mundo en desarrollo.

El consumo mundial aproximado de energía eléctrica a finales del año 2009 fue de 17,056 TWh, en el siguiente gráfico se muestra las diferentes fuentes de energía y su consumo a nivel mundial. (UNAM, 2011)

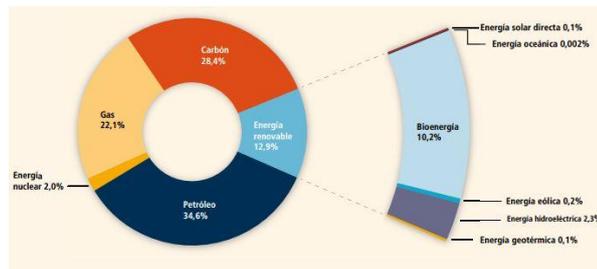


Gráfico 1-2: Fuentes de energía para el consumo mundial

Fuente: (IPCC, 2011)

Como se puede observar en el gráfico 1-2, las energías renovables aportan un 12,9% de energía respecto al consumo mundial de la misma, dentro de las energías renovables se enmarcan una serie de tecnologías las cuales aprovechan recursos naturales, e inagotables, como el agua, el sol, la biomasa y el viento.

De entre las energías renovables, la energía eólica es la que más se ha podido desarrollar en los últimos años, llegando casi a competir con fuentes tradicionales de energía eléctrica. El costo de producción de energía eléctrica de origen eólica ha caído en un 85% debido a las diferentes actividades de investigación y desarrollo, así como el aumento de fabricación de aerogeneradores, permitiendo así el crecimiento potencial de este tipo de energía a nivel mundial. (ACADEMIA EUROPEA DE CIENCIAS Y ARTES, 2005)

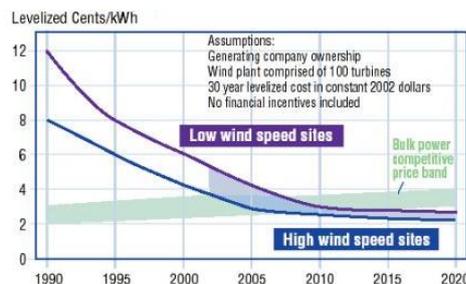


Gráfico 2-2: Costo de producción de energía eólica

Fuente: (ACADEMIA EUROPEA DE CIENCIAS Y ARTES, 2005)

La capacidad de energía eólica en todo el mundo creció un 12,4% en 2016, llegando así a situarse en 486.749 MW, según los datos proporcionados por el GWEC (Global Wind Energy Council). Los países como China, Estados Unidos, Alemania, India y España son los países pioneros y los mejores situados en cuanto a generación de energía eléctrica a partir de la energía eólica. A continuación, se muestran valores reales de potencias eólicas instaladas alrededor del mundo en los últimos años. (ASOCIACIÓN EMPRESARIAL EÓLICA, 2017)

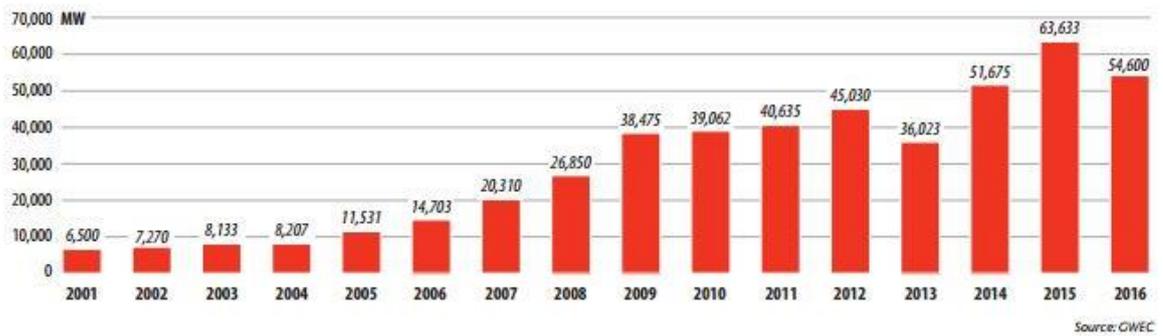


Gráfico 3-2: Potencia eólica instalada a nivel mundial

Fuente: (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2017)

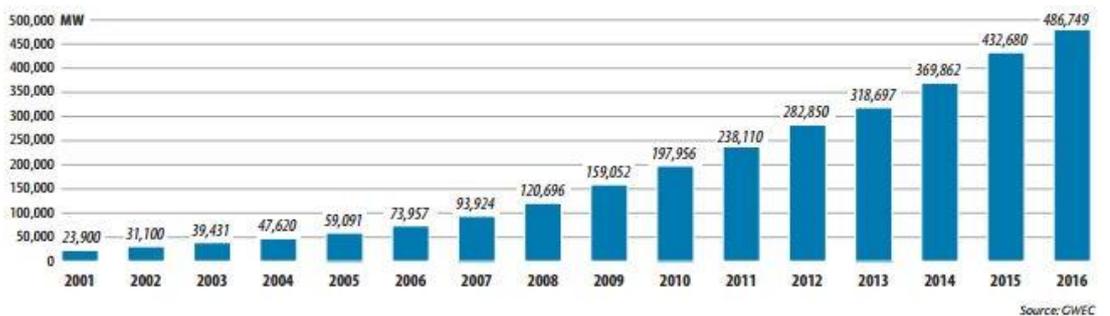


Gráfico 4-2: Potencia eólica instalada a nivel mundial acumulada

Fuente: (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2017)

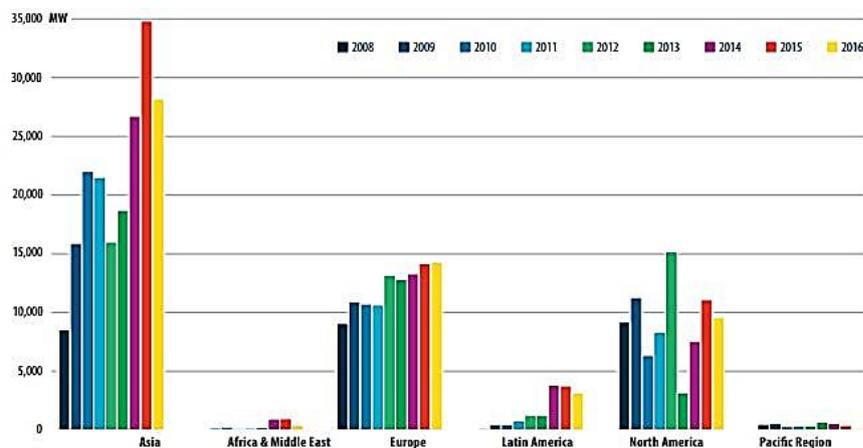


Gráfico 5-2: Potencia eólica instalada por regiones

Fuente: (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2017)

Según los datos publicados por el GWEC, la generación de energía eléctrica por parte de las plantas eólicas ha evitado la emisión aproximadamente de unos 400 millones de toneladas de CO2. Los países que han potenciado el desarrollo de este tipo de energía en el último año se los muestra a continuación.

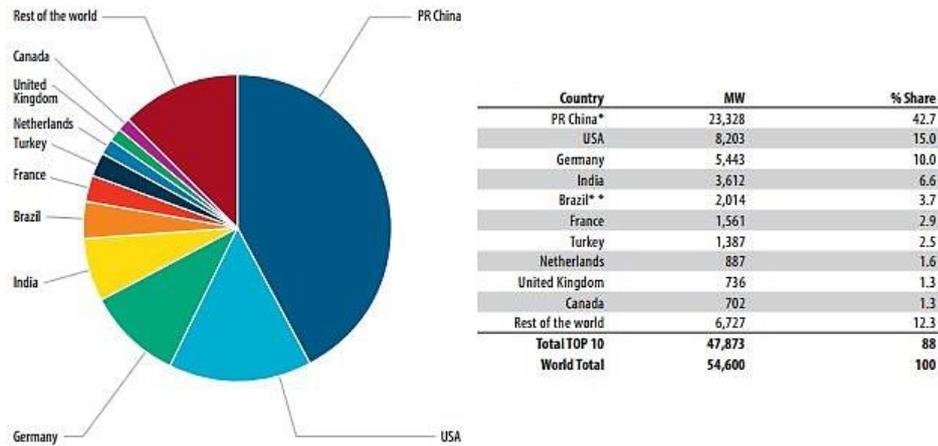


Gráfico 6-2: Países con mayor potencia eólica instalada en el 2016

Fuente: (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2017)

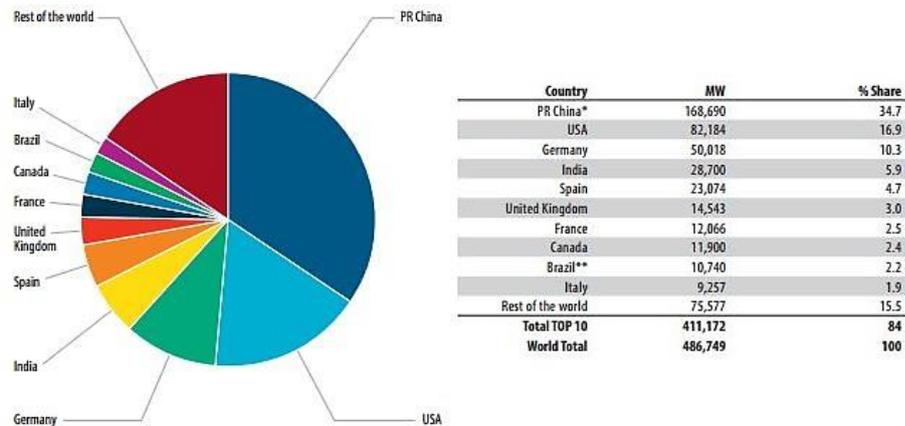


Gráfico 7-2: Potencia eólica acumulada instalada en diferentes países

Fuente: (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2017)

Se puede destacar que en los dos últimos años Brasil ha sido el país con mayor crecimiento en cuanto a potencia eléctrica proveniente de la energía eólica instalada con un incremento del 14%.

Entre los países líderes en producción de energía eléctrica a partir de la energía eólica se puede destacar a los siguientes:

- China cuenta con 80 parques eólicos que se distribuyen a lo largo de todo el territorio nacional entre ellos suman una capacidad de generación de 45GW, su objetivo principal

es cubrir toda su demanda energética que es de 350GW empleando la energía eólica. (INFOBAE, 2016)

- Estados Unidos es el único país americano líder en producción de energía eléctrica a partir de la energía eólica, cuenta con 101 parques eólicos que suman entre ellos una capacidad de generación de 43GW, otro aspecto que se puede destacar de Estados Unidos es que alberga el parque eólico más grande del mundo que consta de 627 turbinas y su capacidad de generación es de 781 MW, su principal objetivo es equiparar las energías renovables frente al actual consumo masivo de combustibles fósiles. (INFOBAE, 2016)
- Alemania dispone de 21.607 aerogeneradores distribuidos en diferentes localidades a lo largo de su territorio nacional, la capacidad de generación de estos suma 28GW los cuales cubren el 9% de su demanda energética nacional. (INFOBAE, 2016)

En conclusión, se puede decir que la energía eólica se ha convertido en una parte fundamental de los sistemas de generación de energía en varios países, siendo reconocida como una fuente fiable y accesible de energía eléctrica. (OLLAGUE ARMIJOS, y otros, 2014)

2.2.3 *Energía eólica en el Ecuador*

Actualmente en el Ecuador se ha dado un incremento en la demanda energética debido al crecimiento de la población y el aumento del número de industrias. Según el Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos a través de su publicación realizada en el balance energético nacional determino que el crecimiento promedio anual de la demanda energética es del 5,3%. (MICSE, 2016)

Con la finalidad de solventar esta demanda energética, actualmente el gobierno del Ecuador a través del Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) mediante el plan nacional del buen vivir, tiene como objetivos promover la eficiencia y una mayor participación de energías renovables sostenibles como medida de prevención de la contaminación ambiental. En el gráfico 8-2 se presenta la producción de energías renovables no convencionales en el Ecuador entre el año 2014 y 2015. (INER, 2015)

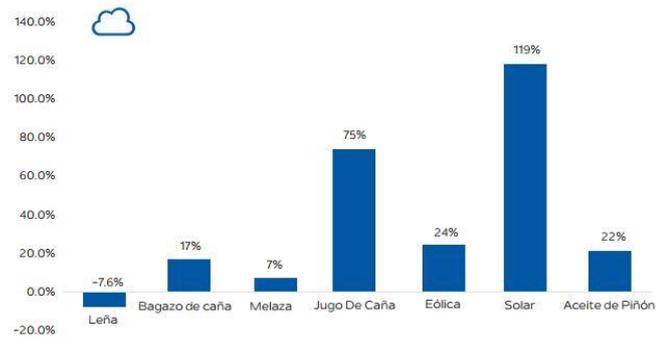


Gráfico 8-2: Producción ERNC 2014 - 2015

Fuente: (MICSE, 2016)

Se puede observar que la energía eólica tuvo un incremento del 24%, este incremento se presenta debido a la implementación de proyectos eólicos (parques eólicos) actualmente presentes en la provincia de Galápagos en la Isla San Cristóbal, la misma que consta de 3 aerogeneradores cuyo rotor eólico posee las siguientes especificaciones.

Tabla 1-2: Especificaciones técnicas – AE-59

Rotor	Especificaciones
Diámetro	59 m
Área de barrido	2733.97 m ²
Rango de velocidad	11.3 a 22.6 rpm
Número de palas	3
Tipo de pala	LM 28.6 P
Angulo de inclinación	5 °

Realizado por: Autor, 2018

Fuente: (PROYECTO EÓLICO SAN CRISTÓBAL, 2013)

La capacidad de generación de cada uno de los aerogeneradores es de 800 KW, logrando de esta manera producir 3600 MW/año cubriendo y de esta manera cubre el 32% de la demanda aula de la isla.

De igual manera en la provincia de Loja se encuentra el parque eólico en el cerro Villonaco, que consta de 11 aerogeneradores cuyo rotor eólico posee las siguientes especificaciones.

Tabla 2-2: Especificaciones técnicas – GW70/1500

Rotor	Especificaciones
Diámetro	70 m
Área de barrido	3850 m ²
Rango de velocidad	10.2 a 19 rpm
Número de palas	3
Tipo de pala	LM 34 P
Angulo de inclinación	5 °

Realizado por: Autor, 2018

Fuente: (SARMIENTO RIVERA, y otros, 2014)

La capacidad de generación de cada uno de los aerogeneradores es de 1500 KW, logrando de esta manera producir 90,92 GWh/año. (CELEC EP, 2013)

2.2.4 *Potencial eólico disponible en la provincia de Chimborazo*

El potencial eólico presente en la provincia de Chimborazo ha sido determinado por el GEAA perteneciente a la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, a partir de los datos proporcionados por siete estaciones de monitoreo (Espoch, Atillo, Matus, Quimiag, San Juan, Tunshi y Urbina), las mismas que están distribuidas a lo largo del territorio de la provincia. A continuación, en la figura 1-2 se muestra el mapa de la provincia de Chimborazo en el mismo se puede observar los puntos de las siete estaciones antes mencionadas. (NÚÑEZ SILVA, y otros, 2017)

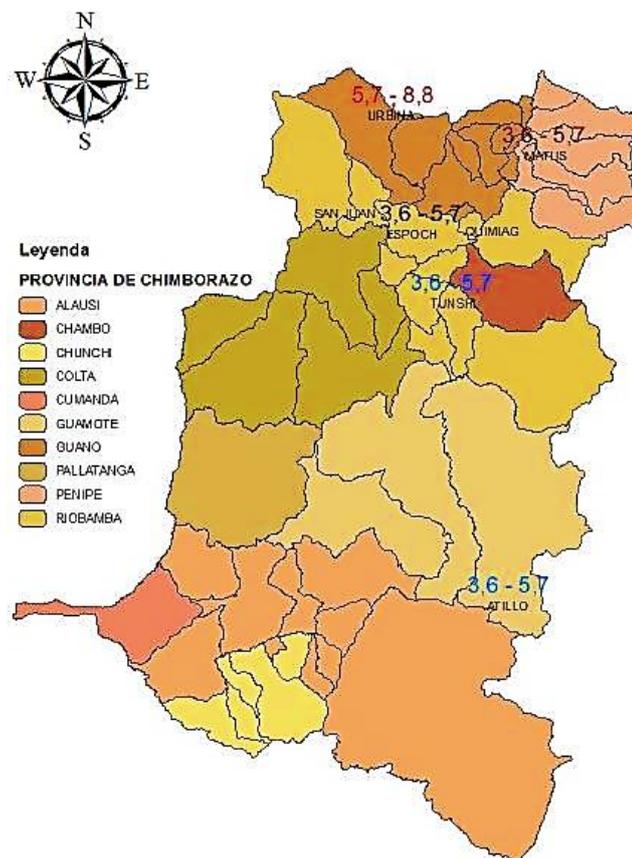


Figura 1-2: Mapa de la provincia de Chimborazo

Fuente: (NÚÑEZ SILVA, y otros, 2017)

Los datos analizados y presentados corresponden a la velocidad del viento promedio y máxima, la dirección del viento promedio y máxima, todos los datos de las variables anteriormente mencionadas fueron recopilados durante los años 2104, 2015 y 2016 sumando entre todos ellos un total de 399084 datos. (NÚÑEZ SILVA, y otros, 2017)

Dichos datos fueron analizados mediante un trabajo de investigación realizado en la ESPOCH, presentando resultados por año de estudio del potencial eólico disponible en la provincia de Chimborazo, los mismos se presentan a continuación:

- En el año 2014 la energía anual en Atillo (728.2 MWh), Espoch (521.4 MWh), Matus (409.38 MWh), Quimiag (7.44 MWh), San Juan (156.05 MWh), Tunshi (27.791 MWh) y en Urbina (873.08 MWh). (NÚÑEZ SILVA, y otros, 2017)
- En el año 2015 la energía anual en Atillo (612.67 MWh), Espoch (318.2 MWh), Matus (11.51 MWh), Quimiag (30.77 MWh), San Juan (158.04 MWh), Tunshi (25.20 MWh) y en Urbina (1328.57 MWh). (NÚÑEZ SILVA, y otros, 2017)
- En el año 2016 la energía anual en Atillo (351.05 MWh), Espoch (66.48 MWh), Matus (4.71 MWh), Quimiag (18.14 MWh), San Juan (44.078 MWh), Tunshi (14.864 MWh) y en Urbina (664.88 MWh). (NÚÑEZ SILVA, y otros, 2017)

Al mantener un nivel elevado de energía anual Atillo y Urbina son consideradas zonas ideales para una instalación de un parque eólico.

2.2.5 Aerogeneradores

Los aerogeneradores son máquinas diseñadas especialmente para transformar energía mecánica en energía eléctrica. En la actualidad las turbinas eólicas que producen energía eléctrica pasaron de ser simples máquinas de bajo rendimiento hasta llegar a convertirse en máquinas de gran tamaño y muy sofisticadas, hoy en día estas mejoras se han logrado conseguir gracias a los nuevos conocimientos científicos y técnicos, así como también las mejoras en los procesos de fabricación, herramientas computacionales y nuevos procedimientos de funcionamiento y mantenimiento. (IPCC, 2011)

Con la finalidad de generar energía eléctrica a partir de la energía cinética proporcionada por el aire se han investigado configuraciones de turbinas muy diversas, ubicando así en el mercado dos grandes grupos de aerogeneradores según la orientación del eje de rotación.

2.2.5.1 Aerogenerador de eje horizontal vs aerogenerador de eje vertical

A continuación, se menciona las principales diferencias y características respecto a los aerogeneradores de eje vertical y eje horizontal. (RAMIRO LEO, 2014)

Aerogenerador de eje vertical

- Sistema de orientación no necesario.
- Generador y multiplicador en tierra.
- Palas sujetas en dos puntos.
- Las palas entran en pérdidas a altas velocidades de viento

Aerogenerador de eje horizontal

- Tecnología más desarrollada.
- Mayor coeficiente de potencia.
- Velocidades de giro más altas.
- Área de palas más pequeñas para una misma superficie de barrido.
- Mayor aprovechamiento del viento por mayor altura.
- No necesita ser arrancada para dar potencia.

Para el trabajo experimental propuesto se realizará la experimentación empleando un modelo de aerogenerador de eje horizontal, ya que mediante estudios anteriormente realizados en la ESPOCH se determinó que en la provincia de Chimborazo este tipo de aerogenerador sería el más idóneo para el potencial eólico disponible.

2.2.6 *Aerogeneradores de eje horizontal*

Los aerogeneradores de eje horizontal (Figura 2-2) denominados también HAWTS (Horizontal Axis Wind Turbines) se caracterizan por tener su flecha y su sistema de generador paralelo al suelo, y hoy en día son los más empleados en la generación de energía eléctrica, motivo por el cual se ha centrado el mayor esfuerzo de diseño en los últimos años. (SALAZAR VILLANUEVA, 2010)



Figura 2-2: Aerogenerador de eje horizontal

Fuente: (LÓPEZ, 2016)

Cabe mencionar también que por la posición del equipo con respecto al viento existen dos tipos de aerogeneradores de eje horizontal que son:

- A sotavento

El viento en este tipo de aerogenerador pasa en primera instancia por el mecanismo de orientación después de esto actúa sobre las aspas (Figura 3-2). La principal desventaja en este tipo de aerogenerador es que existe fluctuación de potencia eólica debido al paso del rotor a través del abrigo de la torre. Cabe mencionar que su principal ventaja es que pueden ser fabricados sin un mecanismo de orientación, si el rotor y la góndola son diseñadas apropiadamente estos pueden seguir al viento pasivamente.

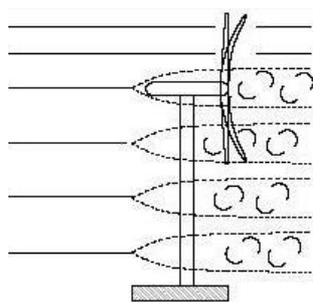


Figura 3-2: Aerogenerador a sotavento

Fuente: (OPEX ENERGY, 2013)

- A barlovento

El viento en este tipo de aerogenerador viene de frente hacia las palas, teniendo el sistema de orientación en la parte posterior (Figura 4-2). Una desventaja considerable en este tipo de

aerogeneradores es que el rotor necesita ser bastante robusto y a su vez estar ubicado a una distancia de la torre considerable, además de eso este tipo de máquina necesita de un mecanismo de orientación para mantener el rotor de cara al viento. Por otro lado, su principal ventaja es que evita el abrigo del viento tras la torre. (SALAZAR VILLANUEVA, 2010)

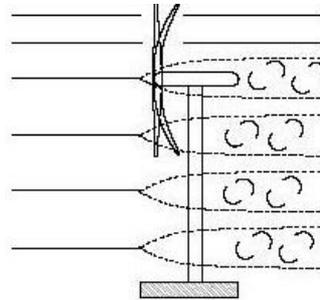


Figura 4-2: Aerogenerador a barlovento

Fuente: (OPEX ENERGY, 2013)

Hoy en día el diseño preferido para los aerogeneradores es el de eje horizontal provisto por tres alabes. El tamaño habitual de las turbinas eólicas en los últimos tiempos ha aumentado considerablemente, en 2009 la mayor parte de las turbinas eólicas tenían una capacidad nominal de 1,5 y 2,5 MW, a partir de 2010 las turbinas eólicas normalmente se empezaron a instalar en torres de entre 50 a 100 m de altura y con unos rotores de iguales magnitudes de diámetros, en la actualidad existen dispositivos comerciales con diámetros de rotores y alturas de torre superior a los 125 m y se sigue avanzando en cuanto a tamaño de aerogeneradores para potenciar este tipo de tecnología, en la siguiente figura se muestra la evolución en cuanto a tamaño de los aerogeneradores de eje horizontal. (IPCC, 2011)

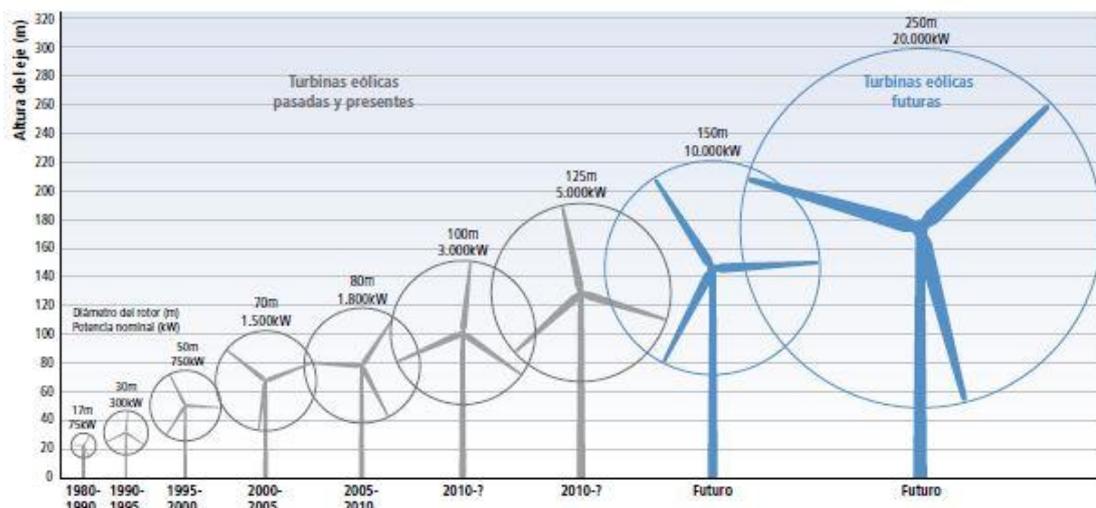


Figura 5-2: Evolución de un aerogenerador eólico en el tiempo

Fuente: (IPCC, 2011)

2.2.6.1 Partes de un aerogenerador de eje horizontal

En la siguiente figura se muestran los componentes principales de un aerogenerador de eje horizontal de tres álabes.

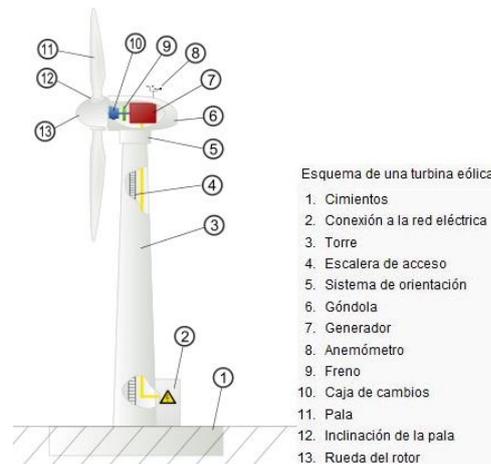


Figura 6-2: Partes de un aerogenerador

Fuente: (SALAZAR VILLANUEVA, 2010)

Dentro de las partes descritas en la figura 6-2 se pueden destacar como principales las siguientes:

- Torre

Parte estructural del aerogenerador cuya función es soportar todo el peso de la góndola y alabes, normalmente sus longitudes son elevadas ya que a mayor altura mayor velocidad del viento. (SALAZAR VILLANUEVA, 2010)

- Rotor

Los alabes de un aerogenerador eólico están generalmente conectadas al buje del rotor y este se encuentra ubicado en la parte frontal del aerogenerador, usualmente están formados por tres alabes ya que de esta manera proporcionan una mayor suavidad en el giro. (SALAZAR VILLANUEVA, 2010)

- Alabes

Los alabes dependen principalmente de la potencia que se desea generar para dimensionarlos y determinar la geometría y perfil del mismo, se los fabrica generalmente de materiales compuestos reforzados con fibra, esta puede ser de vidrio o de carbono. (SALAZAR VILLANUEVA, 2010)

- Góndola

La góndola en un aerogenerador es la parte más esencial ya que lleva dentro de esta los componentes principales para la generación de energía eléctrica, usualmente están fabricadas de acero y fibra de vidrio. (SALAZAR VILLANUEVA, 2010)

2.2.6.2 Aerodinámica de los aerogeneradores de eje horizontal

El funcionamiento de un aerogenerador se da debido a la interacción del viento con sus alabes, motivo por el cual el estudio aerodinámico de los alabes es la base fundamental para el diseño de los aerogeneradores. (GRATEROL, y otros, 2006)

El diseño aerodinámico de los álabes se basa en el comportamiento en estado estacionario del viento promedio. Esto se da debido a la naturaleza no uniforme del viento, tanto en dirección como en velocidad, según estudios realizados se ha demostrado que el comportamiento de un generador eólico está determinado principalmente por las fuerzas aerodinámicas que son generadas por el viento. Para el estudio aerodinámico de los generadores eólicos la teoría más ampliamente usada es la teoría de momento aplicada a elementos de álabe (BEM), esta teoría es una ampliación de la teoría de disco actuante y está a la vez proviene del uso en conjunto de dos teorías: la teoría de elemento de alabe y la teoría de momento. (GRATEROL, y otros, 2006)

2.2.6.3 Potencia disponible en aerogeneradores de eje horizontal

En este apartado se realizará un análisis que permitirá determinar la energía que un aerogenerador podrá extraer del viento empleando la teoría de disco actuante, para ello se procederá a analizar como una situación ideal con un flujo de aire unidimensional (Figura 7-2) que atraviesa el aerogenerador con un número determinado de palas cuya área de barrido de las mismas está representada por un disco.

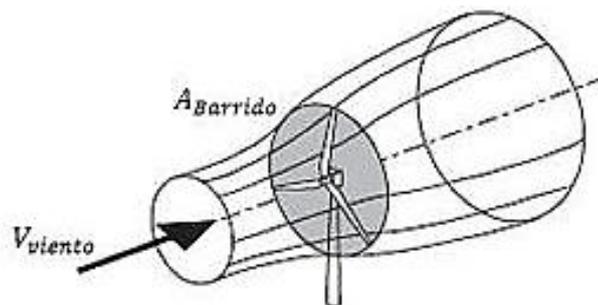


Figura 7-2: Flujo de aire a través de un rotor eólico

Fuente: (SALAZAR VILLANUEVA, 2010)

La teoría de disco actuante para aerogeneradores de eje horizontal asume las siguientes condiciones:

- El aire es considerado como un fluido en estado estacionario, incompresible y homogéneo.
- La fricción viscosa es ignorada.
- El número de alabes es considerado como infinito.
- Las velocidades rotacionales inducidas sobre el viento son ignoradas.
- La presión estática tanto antes como después de la turbina en puntos distanciados es considerada igual a la presión atmosférica.

Con todas estas consideraciones asumidas el flujo de aire a través del aerogenerador como se muestra en la figura 8-2 es idealizado.

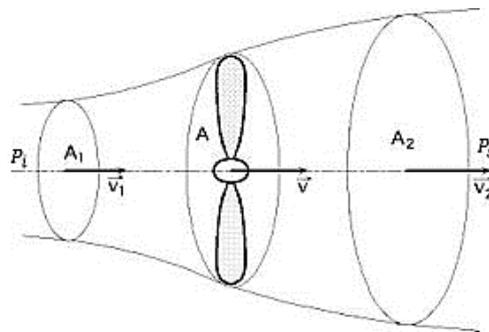


Figura 8-2: Flujo de aire idealizado a través de un rotor eólico

Fuente: (FERNÁNDEZ DÍEZ , 2000)

Donde:

- A_1 : Área inicial del cilindro de corriente de aire
- P_i : Presión antes del rotor eólico
- V_1 : Velocidad del viento libre
- A : Área de barrido por los álabes
- V : Velocidad del viento al pasar por el rotor
- A_2 : Área final del cilindro de corriente de aire
- P_s : Presión después del rotor eólico
- V_2 : Velocidad del viento después de atravesar el rotor

La fuerza de empuje que actúa sobre el rotor eólico se la puede determinar empleando la ecuación de conservación de cantidad de movimiento.

$$F = \dot{m} \cdot (V_1 - V_2) = \rho \cdot A \cdot V \cdot (V_1 - V_2) \quad (1)$$

Donde:

\dot{m} : Flujo másico del aire a través del rotor

F : Fuerza de empuje sobre el rotor

ρ : Densidad del aire

Ecuación Formulada por Isaac Newton, Cantidad de Movimiento (GRATEROL, y otros, 2006)

De igual manera se podría calcular el empuje que ejerce el aire sobre el rotor eólico mediante la caída de presión según la ley de Poiseuille (1839).

$$F = A \cdot (P_i - P_d) \quad (2)$$

El flujo de aire no produce ningún tipo de trabajo antes y después del rotor eólico, por ende, se puede aplicar la ecuación de Bernoulli para los volúmenes de control antes y después del rotor eólico, por lo que la ecuación 2 quedaría de la siguiente forma.

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (3)$$

Al combinar la ecuación 2 y 3.

$$V = \frac{1}{2} \cdot (V_1 - V_2) \quad (4)$$

Se debe tener presente el factor de inducción axial, a , que mide la influencia del rotor sobre el viento y que está dado por la siguiente ecuación.

$$a = \frac{V_1 - V}{V_1} \quad (5)$$

La potencia aprovechable del viento está dada por el producto de la ecuación del empuje y la velocidad del viento en el rotor.

$$Pot = F \cdot V = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (V_1^2 - V_2^2) \right) \cdot V = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1 - V_2) \quad (6)$$

Mediante el coeficiente de potencia se puede calcular el rendimiento del rotor, dicho coeficiente permite cuantificar cuanta energía del viento es extraída por el rotor eólico, y está dada por la siguiente ecuación.

$$Cp = \frac{Pot}{Pot_{viento}} = \frac{Pot}{0,5 \cdot (\rho) \cdot U^3 \cdot A} = 4 \cdot a \cdot (1 - a)^2 \quad (7)$$

El factor de inducción axial puede ser determinado derivando Cp respecto de a e igualándole a cero, y de esta manera determinar el coeficiente máximo de potencia.

$$\begin{aligned} \frac{d}{da} Cp &= \frac{d}{da} [4a \cdot (1 - a)^2] = 1 - 4a + 3a^2 = 0 \\ a &= \frac{1}{3} \end{aligned} \quad (8)$$

Al reemplazar el valor de a en la ecuación 8 obtendremos el valor máximo de Cp_{mzx} .

$$Cp_{mzx} = \frac{16}{27} = 0,5927 \quad (9)$$

Este valor obtenido se lo conoce como el límite de Betz, teóricamente nos dice que la potencia máxima extraíble del aire por medio de un rotor eólico es del 59,27%.

2.2.7 *Perfiles aerodinámicos*

Se dice que el principal elemento de un aerogenerador eólico es su rotor, el cual está constituido por una o varios álabes (palas).

Según su geometría los perfiles aerodinámicos tienen distinto nombre. Se los conoce como **biconvexos** si el intradós y el extradós son convexos, **plano-convexos** si tienen el extradós convexo y el intradós plano, y de **doble curvatura** si tanto el extradós y el intradós son cóncavos. (GONZÁLEZ-LONGATT, 2007)

2.2.7.1 Terminología y variables geométricas en los perfiles aerodinámicos

Durante el diseño y análisis de perfiles aerodinámicos es necesario conocer las variables y conceptos principales de un perfil aerodinámico, los mismos se detallan a continuación.

- Terminología

Línea de curvatura. Se la denomina así a una línea recta que une el borde de salida y el borde de ataque de un perfil.

Cuerda. Es la longitud de una línea anterior, todas las dimensiones de un perfil se miden en términos de la cuerda.

Línea de curvatura media. Se encuentra localizada entre el intradós y extradós.

Ordenada máxima de la línea de curvatura. Es la máxima distancia que puede alcanzar la línea de curvatura media y la cuerda, su posición es importante para la determinación de las características aerodinámicas de un perfil.

Espesor máximo. Se llama así a la distancia máxima entre el intradós y extradós.

Radio de borde de ataque. Es una medida del afilamiento del borde de ataque.

Todas estas terminologías descritas anteriormente se presentan a continuación en la siguiente figura.

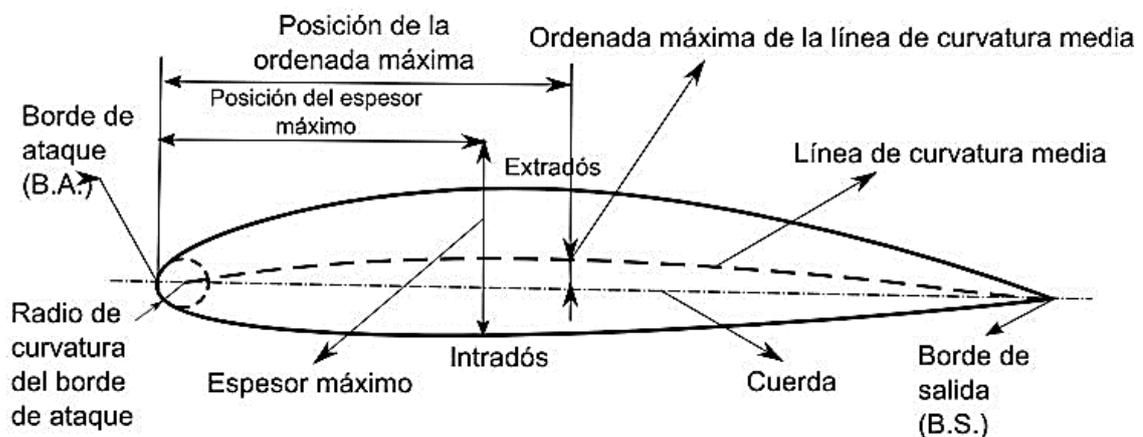


Figura 9-2: Nomenclatura de un perfil aerodinámico

Fuente: (ACADEMIC, 2010)

- Variables geométricas

En la geometría de un perfil aerodinámico existen cuatro variables principales que son:

- Configuración de la línea de curvatura media.
- Espesor.
- Localización del espesor máximo.
- Radio de borde de ataque.

- Perfiles NACA

Los perfiles de la serie NACA fueron desarrollados con la finalidad de estandarizar distintas geometrías de perfiles aerodinámicos que ayuden a impulsar el análisis en la ingeniería y el desarrollo aeronáutico. (GONZÁLEZ-LONGATT, 2007)

Estos perfiles están clasificados y agrupados en función al número de dígitos que tengan, a continuación, en la siguiente tabla se presenta las distintas familias de perfiles naca con sus principales ventajas y características.

Tabla 3-2: Familia de perfiles NACA

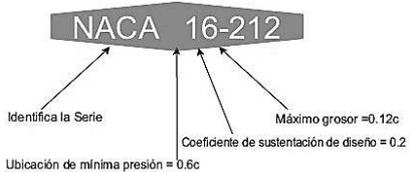
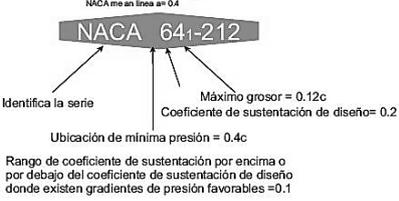
Familia	Ventajas	Desventajas	Nomenclatura
4 Dígitos	Posee buenas características de pérdidas a nivel de docilidad.	Coefficiente de sustentación baja, alta resistencia sobre la mayoría de condiciones operativas	
5 Dígitos	Incremento en el coeficiente de sustentación, minimiza el momento de elevación inherente al diseño del perfil alar.	Bajo comportamiento en pérdida de sustentación y alta resistencia.	
1 Dígito	Capa limite laminar.	Presión de gradiente desfavorable.	

Tabla 3-2: (continuación) Familia de perfiles NACA

6 Dígitos	Flujo laminar constante, máximo coeficiente de sustentación, aplicaciones a alta velocidad.	Alta resistencia fuera de las condiciones de diseño, Incremento en momentos de elevación inherentes al diseño de perfil alar, pobre comportamiento en pérdidas de sustentación.	
-----------	---	---	--

Realizado por: Autor,2018

Fuente: Elaboración Propia

Todas las familias de perfiles aerodinámicos descritos en la tabla anterior, tienen aplicaciones específicas debido a que cada uno de estas familias muestran diferentes geometrías, por ende, pueden ser empleados en diferentes condiciones, ya sea para el diseño de aerogeneradores o para el diseño de las alas de los aviones.

A continuación, la figura 10-2 nos muestra los principales perfiles NACA empleados en la industria, además de esto nos permite diferenciar las formas geométricas que existe entre las diversas familias de perfiles aerodinámicos.

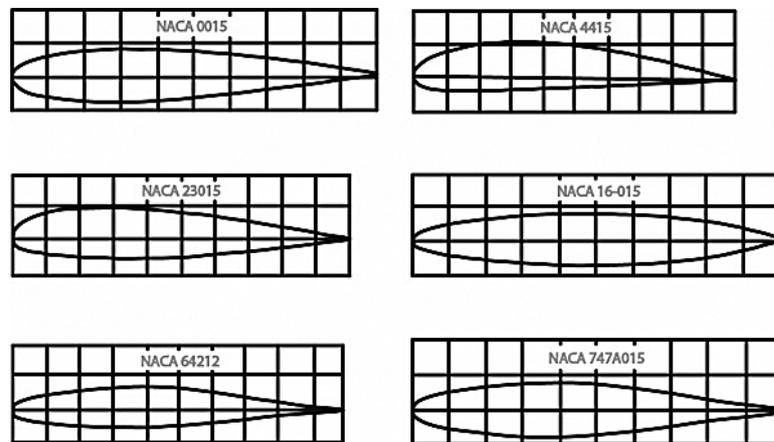


Figura 10-2: Perfiles NACA

Fuente: (CONTRERAS, 2011)

2.2.8 Fuerzas sobre un álabe

2.2.8.1 Fuerza de sustentación

La fuerza de sustentación o fuerza ascendente F_L , se produce debido a la diferencia de presión que existe entre las caras de un álabe, este análisis es consistente con la tercera ley de Newton. El

álabe ejerce una fuerza sobre el aire y de esta manera mediante del ángulo de ataque γ se produce un cambio en la dirección del flujo (figura 11-2), la reacción es la llamada fuerza de sustentación que es la ejercida por parte del aire sobre la superficie del alerón. (DE BATTISTA, 2000).

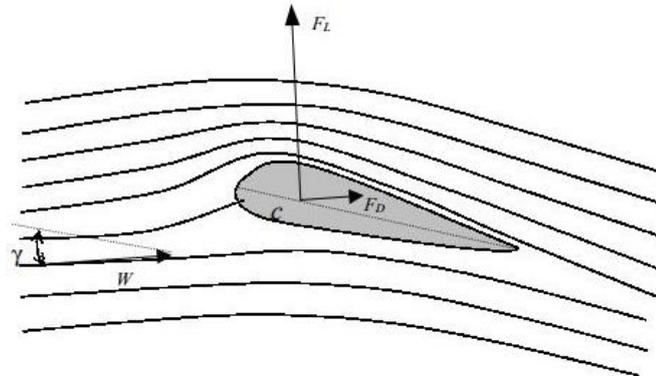


Figura 11-2: Fuerza de sustentación y arrastre en un álabe de aerogenerador

Fuente: (DE BATTISTA, 2000)

2.2.8.2 Fuerza de arrastre

La fuerza de arrastre se produce al sumergir el álabe en un fluido viscoso y a su vez este estar sometido a una fuerza en dirección del flujo, dicha fuerza se la denomina fuerza de arrastre F_D . El álabe de un aerogenerador está diseñado con el fin de evitar turbulencias en el flujo de aire y de esta manera minimizar la fuerza de arrastre, sin embargo se debe tener en cuenta que cuando el ángulo de ataque supera un valor determinado el flujo de aire deja de ser laminar, es decir en la cara superior del álabe las líneas de corriente de aire se separan (figura 12-2). Al producirse esta última condición la fuerza de arrastre aumenta de manera considerable y es ahí cuando se dice que el álabe entra en pérdida. (DE BATTISTA, 2000)

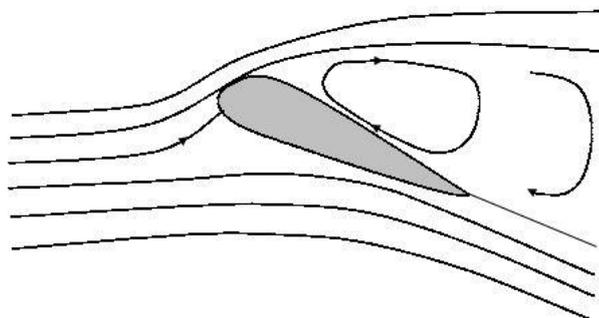


Figura 12-2: Álabe en pérdida

Fuente: (DE BATTISTA, 2000)

A partir de la fuerza de sustentación dada por unidad de longitud se origina el coeficiente de sustentación y está gobernado por la siguiente ecuación:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot c} \quad (10)$$

Donde:

F_L : Fuerza de sustentación

V : Velocidad del viento

ρ : Densidad del aire

c : Cuerda del perfil

Al igual que la fuerza de sustentación la fuerza de arrastre por unidad de longitud da origen al denominado coeficiente de arrastre o de resistencia, el mismo que se encuentra gobernado por la siguiente ecuación:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot c} \quad (11)$$

Donde:

F_D : Fuerza de arrastre

V : Velocidad del viento

ρ : Densidad del aire

c : Cuerda del perfil

Se dice que los coeficientes de arrastre y sustentación dependen principalmente de la geometría del perfil del álabe, número de Reynolds, rugosidad adimensional y del ángulo de ataque.

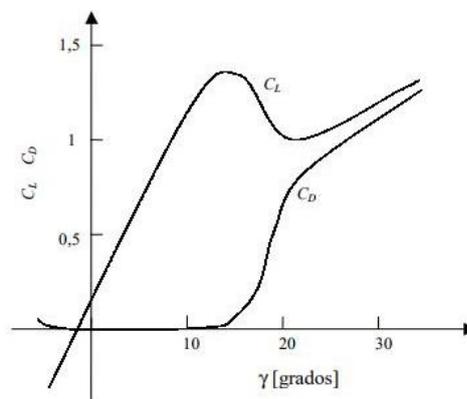


Gráfico 9-2: Coeficientes de sustentación y arrastre

Fuente: (DE BATTISTA, 2000)

2.2.8.3 Teoría del elemento pala – fuerzas en turbinas de eje horizontal

Las fuerzas de sustentación y arrastre presentes en el alabe de un aerogenerador de eje horizontal pueden descomponerse en una fuerza de resistencia axial que debe estar soportada por la estructura y por los álabes del rotor, y una fuerza en el plano de rotación la misma que genera el par de rotación del rotor.

En la figura 13-2 se puede observar las fuerzas que actúan sobre un álabes y a su vez la disposición de este con respecto al plano de rotación con una velocidad de rotación Ω_T . La velocidad tangencial del álabes se puede decir entonces que es, $W_t = r \cdot \Omega_T$ y es perpendicular a la velocidad del viento W . Formando entre estos la velocidad relativa del viento W_{rel} que forma un ángulo ϑ con el plano de rotación.

$$W_{rel} = \sqrt{W^2 + (r \cdot \Omega_T)^2} \quad , \quad \vartheta = \text{tg}^{-1} \left(\frac{W}{r \cdot \Omega_T} \right) \quad (12)$$

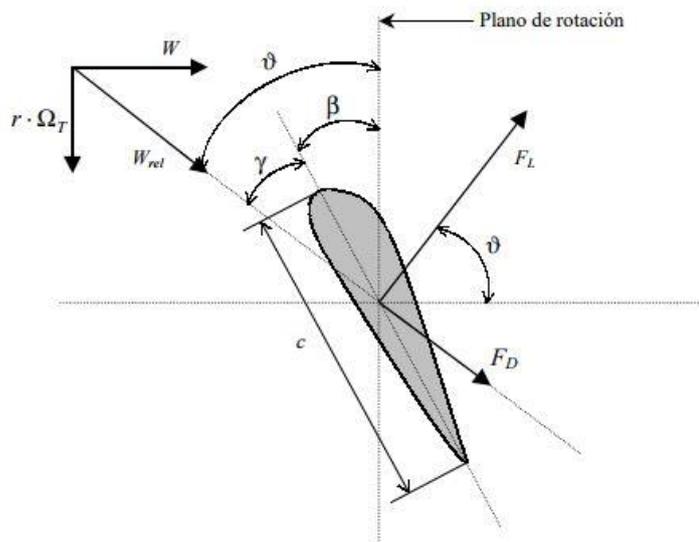


Figura 13-2: Fuerzas presentes en el álabes de un aerogenerador

Fuente: (DE BATTISTA, 2000)

Se puede observar que el alabe está inclinado un ángulo β respecto al plano de rotación, a este ángulo se lo conoce como ángulo de torsión. Por lo tanto, el ángulo de ataque sería igual a:

$$\gamma = \vartheta - \beta \quad (13)$$

Al combinar la ecuación 13 con las ecuaciones de los coeficientes de sustentación y arrastre (10, 11), obtenemos:

$$\delta F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c \cdot W_{rel}^2 \cdot (C_L(\gamma) \cdot \cos \vartheta + C_D(\gamma) \cdot \sin \vartheta) \quad (14)$$

$$\delta F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c \cdot r \cdot W_{rel}^2 \cdot (C_L(\gamma) \cdot \sin \vartheta - C_D(\gamma) \cdot \cos \vartheta) \quad (15)$$

Ecuaciones diferenciales de la fuerza de empuje (14), y del momento diferencial que se ejerce sobre el álabe (15), descritas por Sharpe (1990).

2.2.8.4 Curvas características de un aerogenerador

En este apartado se analizarán y estudiarán las diferentes curvas características que describen el funcionamiento de un aerogenerador, en función de sus variables principales.

- Curva de potencia

En esta curva se presenta la potencia eléctrica disponible en función de la velocidad del viento (gráfico 10-2).

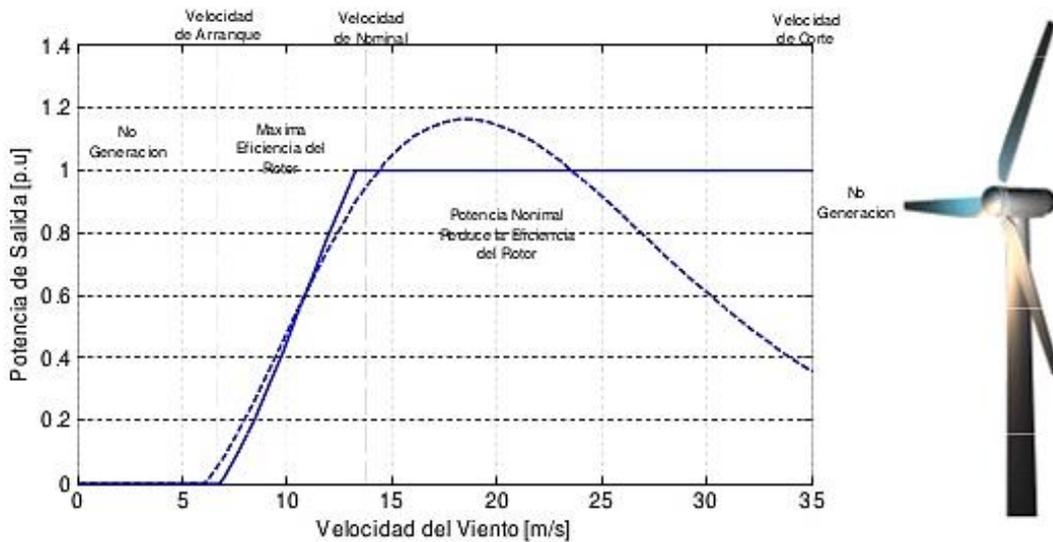


Gráfico 10-2: Curva de potencia de un aerogenerador de eje horizontal

Fuente: (SLIDESHARE, 2016)

Se puede observar en el gráfico 10-2 que el aerogenerador permanece parado cuando la velocidad del viento es inferior a la velocidad de arranque V_a , cuyo valor suele variar entre 3 y 5 m/s, al momento que el aerogenerador alcanza velocidades que oscilen entre los 25 m/s el aerogenerador se desconecta de la red y se frena de manera automática, a esta velocidad se la conoce como la velocidad de parada V_p .

- Curva par

El momento o par que se presenta en un rotor eólico viene dado por la relación entre la potencia mecánica en el eje y la velocidad de giro.

$$M = \frac{P_{mec}}{\Omega_T} \quad (16)$$

La variación del par en máquinas con velocidad de giro constante es directamente proporcional a la velocidad del viento.

Los aerogeneradores eléctricos por lo general utilizan rotores con un número de álabes pequeño, mejorando así la eficiencia del rotor debido a que el par es pequeño. El par en un aerogenerador aumenta de acuerdo a la solidez σ , la cual está descrita por la siguiente ecuación. (OLLAGUE ARMIJOS, y otros, 2014)

$$\sigma = \frac{Bc}{2\pi r} \quad (17)$$

Donde:

- B : Número de álabes
 c : Longitud de la cuerda
 r : Radio del área de barrido del rotor

Por lo tanto, el coeficiente de par se expresa como:

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot \pi \cdot D^3 / 8} = \frac{C_p}{\lambda} \quad (18)$$

En el gráfico 11-2 se muestra la variación del coeficiente de par que aumenta con la velocidad del viento para valores altos de λ^1 , hasta alcanzar un valor máximo cuando el aerogenerador alcanza un límite de potencia.

¹ Velocidad específica de un aerogenerador

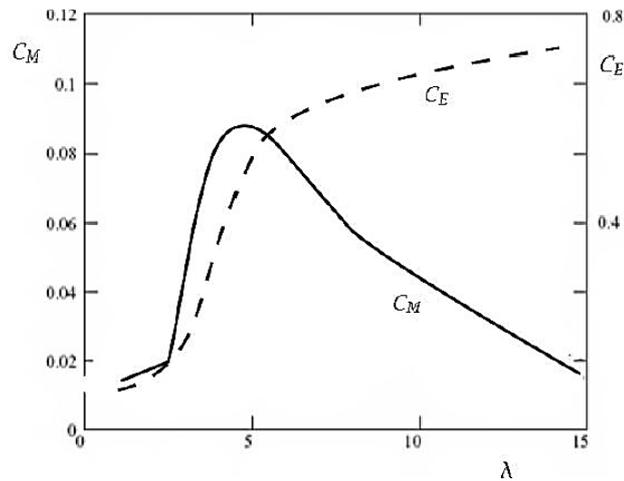


Gráfico 11-2: Variación del coeficiente de par y de empuje

Fuente: (OLLAGUE ARMIJOS, y otros, 2014)

De igual forma se puede observar la variación de un C_E (Coeficiente de empuje), en función a la velocidad específica del rotor. La fuerza de empuje una fuente de carga estacionaria considerada importante ya que estas crecen de manera significativa con la solidez del rotor.

2.2.9 *Análisis dimensional entre modelos y prototipos*

El análisis dimensional se basa en los conceptos de medida de una magnitud física y de las dimensiones que están asociadas a la misma, su objetivo principal es la determinación de una relación de dependencia que existe entre una variable con una serie de parámetros que gobiernan una situación dada.

El análisis dimensional nos permite, construir modelos de un prototipo para posteriormente analizarlo, sometiéndole a condiciones equivalentes a las del dicho prototipo, los propósitos principales del análisis dimensional son:

- Generación de parámetros adimensionales que brinden ayuda para el diseño de experimentos ya sean estos físicos o numéricos, así como también para la generación de reportes de resultado.
- Determinar leyes de escalamiento de tal manera que se puede predecir el comportamiento del modelo a partir del comportamiento del prototipo.
- En muchas ocasiones la predicción de las tendencias es la relación entre los parámetros.

2.2.10 Leyes de similitud entre modelos y prototipos

Para lograr una similitud completa entre modelos y prototipos se deben cumplir tres condiciones necesarias que son:

- Similitud geométrica
- Similitud cinemática
- Similitud dinámica

Cuando se llegue a cumplir las condiciones descritas anteriormente se puede afirmar y garantizar que existe una similitud completa entre el prototipo y el modelo.

2.2.10.1 Similitud geométrica

La similitud geométrica establece que el modelo escalado debe tener la misma forma que el prototipo (figura 14-2), es decir guardar relación entre las magnitudes geométricas. Estas magnitudes son la longitud (L), el área (L²) y el volumen (L³). (ANTA ÁLVAREZ, 2008)

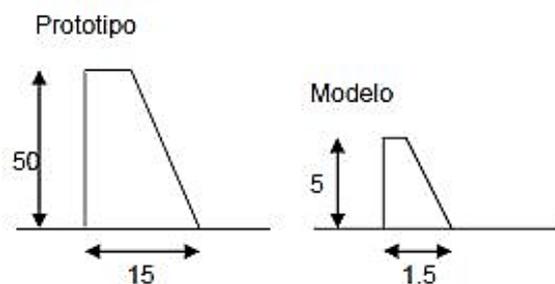


Figura 14-2: Similitud geométrica entre prototipo y modelo

Fuente: (ANTA ÁLVAREZ, 2008)

Se puede apreciar también que la relación entre las longitudes características del modelo y el prototipo se mantienen constantes, para lograr esta condición se debe determinar el llamado coeficiente de semejanza geométrica (λ_G).

$$\lambda_G = \frac{L_p}{L_m} = \frac{D_p}{D_m} = \frac{H_p}{H_m} \quad (19)$$

Los sub índices m y p, nos hacen referencia a modelo y prototipo respectivamente.

Se debe tener en cuenta que en modelos distorsionados (figura 15-2) las escalas de dirección son distintas en las diferentes direcciones. (TAMBURRINO, 2013)

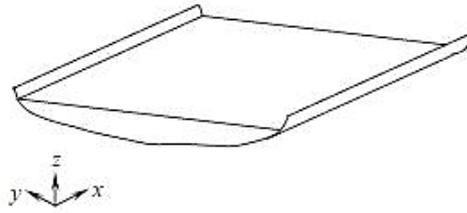


Figura 15-2: Similitud geométrica en modelo distorsionado

Fuente: (TAMBURRINO, 2013)

$$\lambda_x = \frac{x'}{x} \quad ; \quad \lambda_y = \frac{y'}{y} \quad ; \quad \lambda_z = \frac{z'}{z} \quad (20)$$

Se dice entonces que:

$$\lambda_x = \lambda_y = \lambda_G \quad ; \quad \lambda_z = \lambda_H \quad (21)$$

De la ecuación 21 se determina el llamado factor de distorsión

$$\frac{\lambda_H}{\lambda} = \lambda_{Dis} \quad (22)$$

2.2.10.2 Similitud cinemática

La similitud cinemática está presente entre el modelo y el prototipo cuando sus líneas de corriente son semejantes. Es decir que la velocidad en un punto específico en el flujo del modelo debe ser proporcional a la velocidad del mismo punto en el flujo del prototipo como se muestra en la figura 16-2.

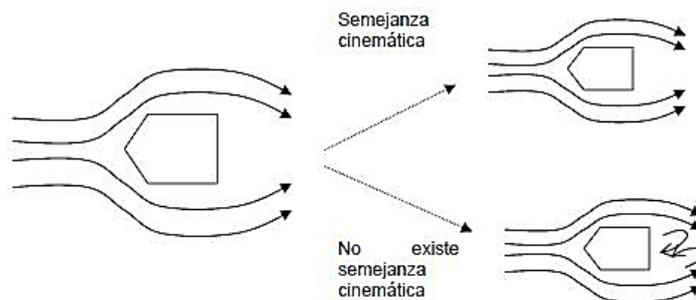


Figura 16-2: Similitud cinemática entre prototipo y modelo

Fuente: (ANTA ÁLVAREZ, 2008)

La figura 27 nos dice que no existe semejanza cinemática si en el modelo se presenta algún tipo de singularidad que no exista en el prototipo, ya que de existir estos pueden provocar fenómenos de tensión superficial. Habiendo corroborado la semejanza geométrica se podrá calcular el factor de semejanza cinemática.

$$\lambda_c = \frac{V_p}{V_m} = \frac{\lambda_G}{\lambda_t} \quad (23)$$

Se puede decir entonces que el factor de escala cinemático es la relación de velocidades del prototipo y el modelo, o a su vez la relación entre los factores de longitudes (geométrico) y tiempo.

2.2.10.3 Similitud dinámica

Existe similitud dinámica cuando todas las fuerzas presentes en el flujo de un modelo son homólogas a las presentes en el prototipo y manteniendo entre ellas una relación constante.



Figura 17-2: Similitud dinámica entre prototipo y modelo

Fuente: (TAMBURRINO, 2013)

El factor de escala dinámico está dado por:

$$\lambda_D = \frac{(F_1)_p}{(F_1)_m} = \frac{(F_2)_p}{(F_2)_m} \quad (24)$$

$$F = m \cdot a \quad ; \quad m = \rho \cdot u \quad (25)$$

Donde:

F : Fuerza

m : Masa

u : Volumen

a : Aceleración

Al combinar las ecuaciones 24 y 25 obtenemos un factor de escala dinámico en función a la densidad y los factores de longitud (geométrico) y tiempo.

$$\lambda_D = \frac{(F_1)_p}{(F_1)_m} = \frac{m' \cdot a'}{m \cdot a} = \frac{\rho' \cdot u' \cdot a'}{\rho \cdot u \cdot a} = \lambda_\rho \cdot \left(\frac{\lambda_G^4}{\lambda_t^2} \right) \quad (26)$$

2.2.11 Parámetros adimensionales

Para establecer todos los posibles parámetros adimensionales, se analizará el fenómeno asumiendo que este está expuesto a todas las posibles fuerzas que actúan sobre el flujo como se observa en la figura 18-2.

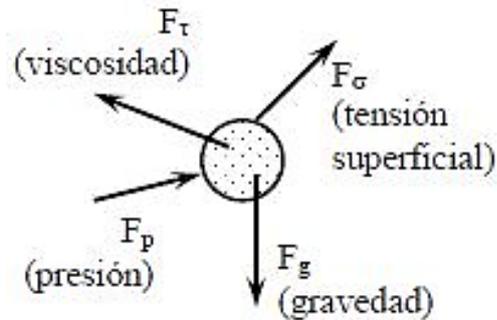


Figura 18-2: Fuerzas presentes sobre el flujo

Fuente: (TAMBURRINO, 2013)

2.2.11.1 Fuerzas de origen gravitacional

Un fenómeno expuesto a fuerzas de origen gravitacional da origen al parámetro adimensional conocido como número de Froude.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{L \cdot g}} \quad (26)$$

Donde:

- V: Velocidad
- L: Longitud
- g: Gravedad

Es decir, si se estudia un fenómeno expuesto a fuerzas de origen gravitacional se debe tener presente que el número de Froude del modelo debe ser igual al del prototipo.

2.2.11.2 *Fuerzas de origen viscoso*

Las fuerzas de origen viscosa presentes en un fenómeno de estudio dan origen al parámetro adimensional llamado número de Reynolds.

$$Re = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (27)$$

Donde:

V : Velocidad

L : Longitud

ν : Viscosidad cinemática

Cuando en el fenómeno de estudio dominan las fuerzas de origen viscosa, se debe preservar el número de Reynolds entre el modelo y el prototipo. En el caso que actué el mismo fluido tanto en el modelo y el prototipo, es decir, sean de igual viscosidad y densidad se establece lo siguiente:

$$\lambda_c = \lambda^{-1}$$
$$\lambda_t = \lambda^2 \quad (28)$$

2.2.11.3 *Fuerzas debido a la tensión superficial*

El parámetro adimensional originado por las fuerzas debido a la tensión superficial da origen al número de Weber.

$$We = \frac{\rho \cdot L \cdot V^2}{\sigma} \quad (29)$$

De igual manera si el fenómeno está expuesto a fuerzas debido a la tensión superficial se debe cumplir que el número de Weber en el modelo y el prototipo deben ser iguales. Al estar expuestos el modelo y el prototipo al mismo líquido se establece lo siguiente:

$$\lambda_v = \lambda^{-1/2} \quad (30)$$

2.2.11.4 Fuerzas debido a la presión

El parámetro adimensional originado por las fuerzas debido a la presión se lo denomina número de Euler.

$$Eu = \frac{P}{\rho \cdot V^2} \quad (31)$$

2.2.11.5 Fuerzas de compresión elástica

Para determinar el parámetro adimensional debido a las fuerzas de compresión elástica se debe considerar el módulo de compresibilidad elástico (E) y la velocidad del sonido, teniendo en cuenta estas condiciones nace el parámetro adimensional denominado número de Mach.

$$M = \frac{V}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}} = \frac{V}{a} \quad (32)$$

Donde:

a : Velocidad del sonido
 E : Módulo de compresibilidad elástico

2.2.11.6 Fuerzas debido al comportamiento oscilatorio del flujo

Para determinar el parámetro adimensional debido a las fuerzas de comportamiento oscilatorio de un flujo se debe considerar la frecuencia de desprendimiento de vórtices teniendo en cuenta estas condiciones nace el parámetro adimensional denominado número de Strouhal.

$$St = \frac{fr \cdot D}{V} \quad (32)$$

Donde:

fr : Frecuencia del desprendimiento de vórtices.

2.2.12 Sistema de adquisición de datos DAQ

Es el proceso en el cual se realiza la medición de una magnitud física por medio de un sensor de medida, este proceso de digitalización de señales consta de las siguientes etapas:

- Conversión de una magnitud física a una señal eléctrica.
- Acondicionamiento de la señal eléctrica para su posterior lectura digital.
- Hardware de adquisición de datos, por lo general esta etapa se la realiza a través de un computador.

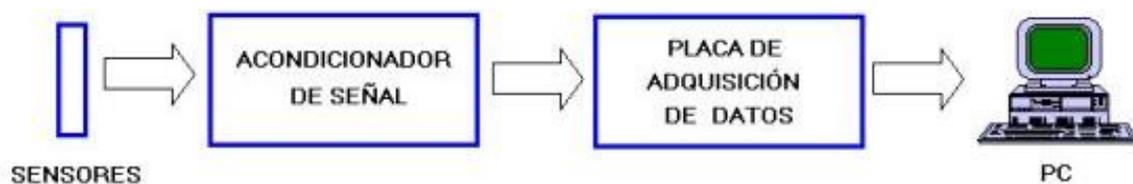


Figura 19-2: Proceso de adquisición de datos

Fuente: (RUA, 2008)

2.2.12.1 Sensores de medida

En un sistema de adquisición de datos el sensor de medida es el elemento primordial ya que este es el encargado de percibir la magnitud física a medir sean estas magnitudes de temperatura, velocidad, presión, etc. y convertirlas en señales eléctricas analógicas o digitales para su posterior digitalización a través de la DAQ (Data Acquisition).

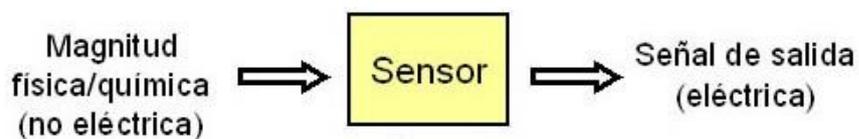


Figura 20-2: Esquema del funcionamiento de un sensor

Fuente: (AFICIONADOS A LA MECÁNICA, 2014)

2.2.12.2 Tarjetas de adquisición de datos

Son conocidas también como DAQ, encargadas de convertir las señales analógicas en digitales (ADC), y a su vez permite la comunicación con el computador empleando el software correspondiente de adquisición de datos como labview.



Figura 21-2: Procesador de datos - Arduino

Fuente: (ARDUINO, 2017)

2.2.12.3 *Software LabView*

Su lenguaje de programación es de forma gráfica, lo cual facilita la programación de diferentes sistemas de adquisición de datos y control de procesos industriales. Comúnmente es utilizado en sistemas de medición ya que tiene un grado de confiabilidad elevado y a su vez permite visualizar el comportamiento del fenómeno medido en tiempo real.



Figura 22-2: Software LabView

Fuente: (DIAGNOSYS, 2017)

2.3 **Hipótesis.**

2.3.1 *Hipótesis Nula*

Mediante el análisis y experimentación con datos reales del potencial eólico de la ciudad de Riobamba en un modelo de rotor eólico, no se podrá alcanzar la similitud completa y estimar la potencia eléctrica que podrá generar dicho prototipo de rotor eólico.

2.3.2 *Hipótesis Alternativa*

Mediante el análisis y experimentación con datos reales del potencial eólico de la ciudad de Riobamba en un modelo de rotor eólico, se podrá alcanzar la similitud completa y estimar la potencia eléctrica que podrá generar un prototipo de rotor eólico.

2.4 Variables

2.4.1 *Variable Independiente*

- Velocidad del viento
- Densidad del aire
- Temperatura
- Presión

2.4.2 *Variable dependiente*

- Potencial eólico de la ciudad de Riobamba
- Capacidad generación eléctrica

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo y nivel de investigación.

El método científico que está apoyado en los procesos de inducción, deducción, análisis y síntesis fue el que se aplicó para el desarrollo de esta investigación, ya que este método consiste en identificar un problema, ubicarlo en un contexto teórico correspondiente, planear una hipótesis y contrastarla, logrando así de esta manera establecer las conclusiones correspondientes.

Según la información manejada esta investigación es cuantitativa, debido a que se manipula datos del potencial eólico disponible en la ciudad de Riobamba, específicamente la velocidad del viento en m/s y a partir de este dato mediante el uso de leyes de escalamiento y análisis dimensional se podrá determinar la energía eléctrica que podríamos generar al implementar aerogeneradores. Por otra parte, en esta investigación se realizará la primera aproximación de la estimación del potencial eléctrico disponible en la ciudad de Riobamba por medio de la energía eólica, por lo que la investigación se la denomina exploratoria.

En esta investigación también se manipula de forma intencional la variable de la velocidad del viento, obteniendo como respuesta el potencial eléctrico disponible en la ciudad de Riobamba; por todo lo descrito anteriormente la investigación es de tipo experimental.

Se realizó la revisión bibliográfica empleando el método análisis – síntesis, histórico – lógico, logrando de esta manera obtener toda la información necesaria para realizar la investigación descrita.

3.2 Descripción del ámbito de investigación.

La investigación abarca el análisis y estudio de un modelo de rotor eólico expuesto a diferentes velocidades del viento en el laboratorio de pruebas. Obteniendo de esta manera información sobre la capacidad de generación de energía eléctrica en la ciudad de Riobamba a partir de la energía eólica, mediante la aplicación de leyes de semejanza y análisis dimensional. Logrando de esta manera estimar cuanta energía eléctrica se podría obtener de un prototipo de aerogenerador.

La información obtenida durante las pruebas realizadas en el laboratorio se recopiló y procesó para su posterior análisis. Los datos recopilados son: velocidad del viento, velocidad de giro del eje del rotor y capacidad de generación eléctrica, los datos fueron tomados en tiempo real.

3.3 Población y muestra.

3.3.1 Población

La población será conformada por el túnel de viento ubicado en el laboratorio de mecánica de fluidos de la facultad de mecánica de la ESPOCH, en el cual se realizarán las pruebas necesarias de tal forma que se adquiera los datos suficientes para la investigación.

Los datos recopilados para su posterior análisis fueron tomados en tiempo real durante las pruebas realizadas al modelo de rotor eólico sometido a distintas velocidades del viento con la finalidad de determinar la capacidad de generación eléctrica a partir de la energía eólica, se obtuvieron un total de 1036 datos recopilados de las siguientes variables medidas: Velocidad del viento, velocidad de rotación del eje del rotor eólico, potencia eléctrica generada.

3.3.2 Muestra

Para lograr una estimación más asemejada a la realidad y por efectos de cálculos, podemos decir que debemos contar con la mayor cantidad de datos posibles obtenidos durante el proceso de pruebas experimentales, por esta razón durante este trabajo experimental no se extrajo ningún tipo de muestra, se trabajó con toda la población.

3.4 Técnicas e instrumentos.

3.4.1 Técnicas de escalamiento

Para llevar a cabo el trabajo experimental propuesto se emplearon una variedad de técnicas, logrando por medio de estas cumplir con todas las condiciones pre establecidas, obteniendo resultados tengan un mínimo de error posible, dichas técnicas son:

3.4.1.1 Teorema π de Vaschy-Buckingham

Empleando este teorema podremos determinar si existe semejanza entre el modelo y el prototipo por medio de números adimensionales, estos números adimensionales se los determinará

empleando y analizando los parámetros de mayor relevancia y los que nos permitan estudiar el comportamiento del modelo durante la experimentación, los principales parámetros que dominan el fenómeno de estudio se muestra a continuación.

Tabla 1-3: Parámetros influyentes en la experimentación

Parámetro	Descripción
ρ [kg/m^3]	Densidad del aire
ν [m^2/seg]	Viscosidad cinemática
c [m]	Cuerda del perfil aerodinámico
b [m]	Ancho del perfil aerodinámico
v [m/seg]	Velocidad del viento
F_L [N]	Fuerza de sustentación
γ [rad]	Ángulo de ataque
f [rpm]	Frecuencia de giro
D [m]	Diámetro del rotor

Realizado por: Autor,2018

Fuente: Elaboración Propia

Una vez definidos los parámetros relevantes procedemos a elaborar una matriz relacionando en ella las dimensiones de las variables determinadas anteriormente.

Tabla 2-3: Dimensiones de las variables más relevantes

Dimensiones	ρ	ν	c	b	v	F_L	D
M	1	0	0	0	0	1	0
L	-3	2	1	1	1	1	1
T	0	-1	0	0	-1	-2	0

Realizado por: Autor,2018

Fuente: Elaboración Propia

Analizando la matriz de dimensiones de las variables más relevantes y según lo establecido por el teorema de PI, se determinaron los siguientes números adimensionales.

$$\pi_1 = \frac{F_L}{\rho \cdot c \cdot b \cdot v^2} \quad (33)$$

$$\pi_2 = \frac{v \cdot c}{\nu} \quad (34)$$

$$\pi_3 = \frac{c}{b} \quad (36)$$

$$\pi_4 = \frac{f \cdot D}{v} \quad (37)$$

El ángulo de ataque del viento sobre el perfil aerodinámico se lo mide en radianes, la cual esta ya es una medida adimensional por tal motivo se lo puede considera como otro número adimensional.

$$\pi_5 = \gamma \quad (38)$$

Se observa que los número adimensionales π_2 y π_3 están en función de c y b que representan la cuerda y el ancho del perfil respectivamente, ya que el prototipo se lo fabricara basado en la impresión 3D, estos parámetros se mantendrán constantes durante la prueba experimental que se la realizara en condiciones ambientales sin variación de temperatura y densidad del aire, por esta razón se mantendrá constante la viscosidad cinemática del fluido (aire), dando como resultado que los números adimensionales π_2 y π_3 sean constantes.

Aplicando los números adimensionales analizados se poda estimar el torque y la potencia que tendrá el modelo al cual se le realice las pruebas experimentales, empleando las ecuaciones obtenidas a partir del análisis de los números adimensionales, como se muestra a continuación.

$$F_{L_p} = \rho_p \cdot c_p \cdot b_p \cdot v_p^2 \quad (39)$$

Por medio de la ecuación (38) se podrá hallar el valor de la fuerza de sustentación en el prototipo, y por medio de su descomposición según sea el ángulo correspondiente se determinará la fuerza tangencial, permitiéndonos así de esta manera hallar el torque total ejercido según la ecuación (40).

$$F_t = F_L \cdot \text{sen}(\beta + \alpha) \quad (40)$$

$$T = F_t \cdot d \quad (41)$$

La potencia total generada por el prototipo se podrá estimar según los resultados obtenidos de la experimentación realizada en el modelo.

Por otra parte, empleando los números adimensionales hallados anteriormente, sabiendo además que la dimensión de la potencia es igual al producto de un momento por una velocidad angular, y puesto que se espera tener los dos equipos geoméricamente semejantes se obtiene a la potencia descrita como.

$$\dot{W} = F(v, D, \nu, \rho, f) \quad (42)$$

A su vez también se llegó a conocer que se involucran los números adimensionales de Reynolds y Strouhal, combinando dichos números con la ecuación 42 tenemos.

$$\frac{\dot{W}}{v^3 \cdot D^2} = F(Re, St) \quad (43)$$

Al tener una igualdad entre los números de Reynolds la ecuación 43 se simplifica y además también se debe obtener una igualdad entre los números de Strouhal como se indica a continuación.

$$St_p = St_m = \frac{f_m \cdot D_m}{V_m} = \frac{f_p \cdot D_p}{V_p} \quad (44)$$

Combinando las ecuaciones 43 y 44 obtenemos finalmente la ecuación que nos permitirá estimar la potencia que generará el prototipo.

$$\dot{W}_p = \left(\frac{D_p}{D_m}\right)^2 \cdot \left(\frac{v_p}{v_m}\right)^3 \quad (45)$$

3.4.1.2 Similitud geométrica

Para cumplir con esta condición de similitud o semejanza entre el modelo y el prototipo, se realizó un escalado a partir de las dimensiones del prototipo de aerogenerador existente MM82 fabricado por SENVION y a su vez en función del tamaño de la sección de pruebas del túnel de viento como se detalla a continuación.

- Datos del prototipo.

Tabla 3-3: Datos del prototipo de aerogenerador MM82

REpower MM82	
Diámetro del rotor	82 [m]
Área de barrido	5281 [m ²]
Numero de palas del rotor	3
Perfil Naca	4415, 4418, 4421
Longitud de la pala del rotor	aprox. 40 m
Velocidad nominal del viento	14,5 m/s
Ancho máximo de la cuerda	3,3 [m]
Altura de torre	80 [m]

Realizado por: Autor, 2018

Fuente: (REpower, 2011)

La sección de pruebas del túnel de viento tiene un diámetro igual a 410 mm por este motivo y empleando la ecuación (19) el factor de escala geométrico basándonos en el diámetro del rotor del prototipo es igual a:

$$\lambda_G = \frac{D_p}{D_m} = \frac{82000 \text{ mm}}{360 \text{ mm}} = 227.77 \approx 228$$

Aplicando el factor de escala determinado y empleando el software SOLIDWORKS se realizó el modelado correspondiente del prototipo de aerogenerador como se observa en la figura 1-3

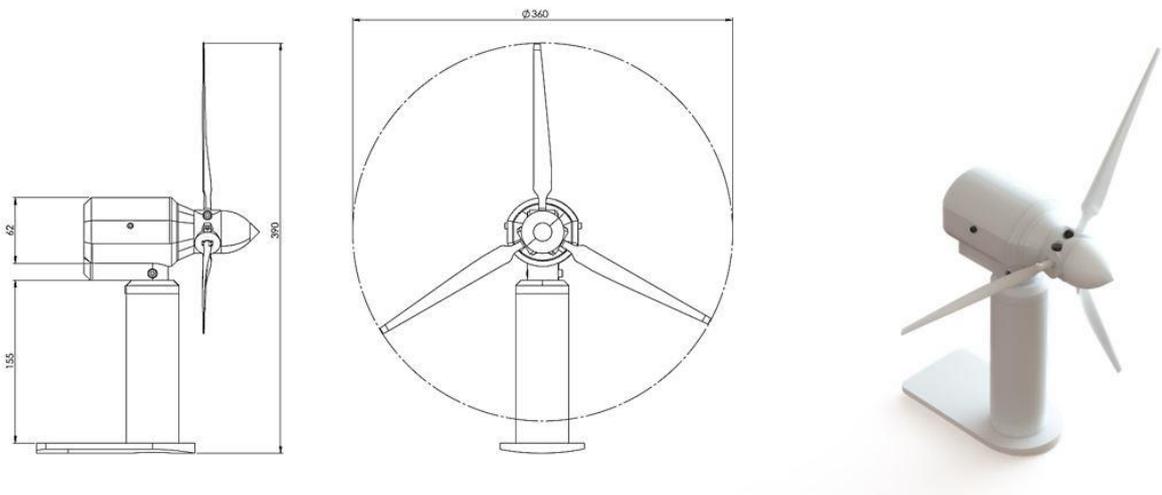


Figura 1-3: Modelo de aerogenerador REpower MM82

Fuente: Elaboración Propia

3.4.1.3 Similitud cinemática

Para alcanzar una similitud completa entre el modelo y el prototipo de deberá mantener constantes los coeficientes de arrastre y sustentación (ANEXO A), dichos coeficientes están en función del ángulo de ataque, número de Reynolds y número de Mach, despreciando este último ya que en turbinas eólicas se dice que la densidad es constante y por lo tanto se considera un flujo incompresible.

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente nos lleva afirmar que la similitud cinemática se la determinara únicamente en función del número de Reynolds, se debe tener en cuenta también que modelo del aerogenerador está construido mediante la impresión 3D motivo por el cual no se podrá realizar variaciones en su geometría es decir se mantendrá constante su ángulo de ataque y cuerda; de igual forma la experimentación se realiza en condiciones ambientales por ello no existirá variación en la densidad y por ende en la viscosidad cinemática del fluido.

De esta manera la similitud entre perfiles aerodinámicos se obtiene al igualar sus números de Reynolds correspondientes y a través de estos se podrá determinar la velocidad a la cual deberá trabajar el túnel de viento para realizar la experimentación.

$$Re_p = Re_m$$

Comúnmente el número de Reynolds en turbinas eólicas es de 25000, asumiendo las condiciones ideales la velocidad del viento para la experimentación será igual a:

$$Re_p = Re_m$$

$$25000 = Re_m = \frac{v \cdot c}{\nu}$$

$$25000 = \frac{v \cdot (0,021) \text{ s.m}}{1,47 \times 10^{-5} \text{ m}^2}$$

$$\frac{25000(1,47 \times 10^{-5} \text{ m}^2)}{(3,5)(0,021) \text{ s.m}} = v$$

$$v = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

3.4.1.4 Similitud dinámica

El factor de escala para evaluar este tipo de similitud entre el modelo y el prototipo se obtendrá al analizar el número adimensional π_1 que involucra a la fuerza de arrastre, al relacionar las dos fuerzas se podrá obtener el factor de escala dinámico.

$$\pi_1 = \frac{F_L}{\rho \cdot c \cdot b \cdot v^2}$$

$$\frac{F_{Lp}}{\rho_p \cdot c_p \cdot b_p \cdot v_p^2} = \frac{F_{Lm}}{\rho_m \cdot c_m \cdot b_m \cdot v_m^2}$$

$$\frac{F_{Lp}}{F_{Lm}} = \frac{\rho_p \cdot c_p \cdot b_p \cdot v_p^2}{\rho_m \cdot c_m \cdot b_m \cdot v_m^2}$$

$$\frac{F_{Lp}}{F_{Lm}} = 15$$

3.4.2 *Técnica de modelado y simulación en 3D*

3.4.2.1 *Generación de la geometría y el sólido del modelo*

En este apartado se indicarán una cadena de pasos que nos permitan generar las geometrías correctas de las aspas y el hub, ya que las mismas intervendrán en la simulación y a su vez serán empleadas para la posterior construcción del modelo.

- Modelado del aspa y componentes

Según datos proporcionados por el fabricante del prototipo de aerogenerador MM82, las aspas están fabricadas basándose en los perfiles aerodinámicos NACA 4415, 4418, 4421,

En primera instancia se deberá generar los perfiles aerodinámicos en 2D, para lo cual se empleará la herramienta de generación de perfiles aerodinámicos de la página web *airfoiltools.com*. En el entorno principal de la página web se debe seleccionar el número dígitos que contiene el perfil a crear, posteriormente aparecerá una lista con todos los perfiles que contienen ese número de dígitos, seleccionar el indicado, en caso de que el perfil a estudiar no se encuentre se deberá ingresar el dígito del mismo en la parte superior, o a su vez se podrá diseñar el perfil ingresando los datos y finalmente dar en plot, toda esta sucesión de comandos y los perfiles generados se muestra a continuación.

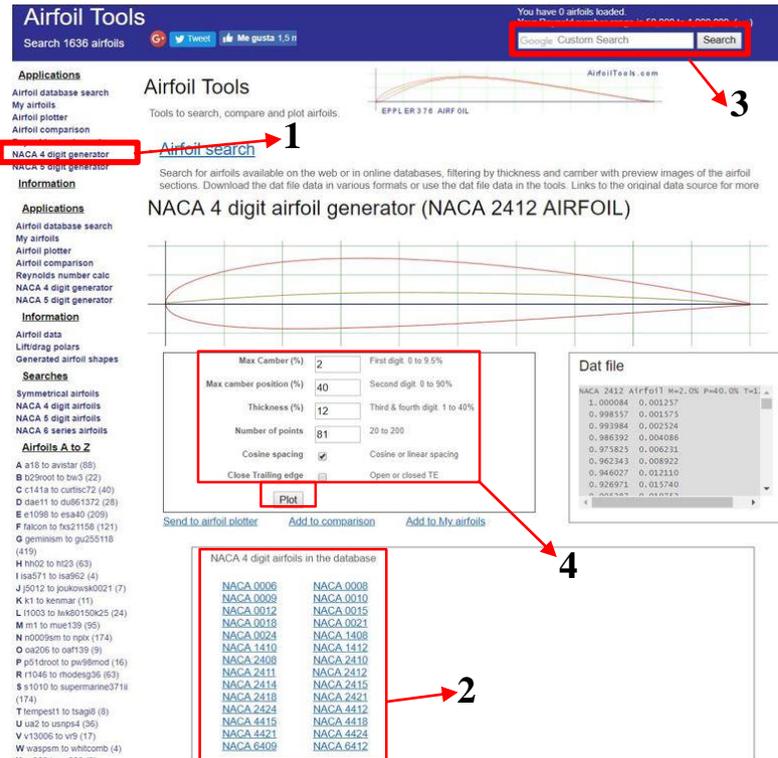
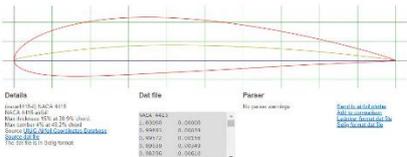
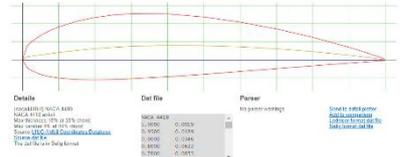
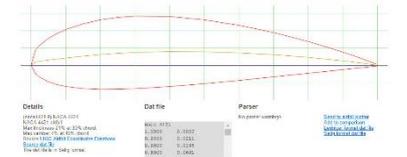


Figura 2-3: Secuencia para generación de perfil aerodinámico

Fuente: (AIRFOIL TOOLS, 2018)

Se ajustaron todos los parámetros antes mencionados se obtuvieron los perfiles a emplear.

Tabla 4-3: Perfiles NACA del prototipo de aerogenerador MM82

Orden	Imagen	Perfil Naca
1	<p>NACA 4415 (naca4415-il) NACA 4415 - NACA 4415 airfoil</p>  <p>Details: NACA 4415 Max thickness: 15% at 30% chord Max camber: 4% at 25% chord Static LE: 0.05 The airfoil has a leading edge radius of 0.015 chord.</p> <p>Dat file: NACA 4415 0.00000</p>	4415
2	<p>NACA 4418 (naca4418-il) NACA 4418 - NACA 4418 airfoil</p>  <p>Details: NACA 4418 Max thickness: 18% at 30% chord Max camber: 4% at 25% chord Static LE: 0.05 The airfoil has a leading edge radius of 0.015 chord.</p> <p>Dat file: NACA 4418 0.00000</p>	4418
3	<p>NACA 4421 (naca4421-il) NACA 4421 - NACA 4421 airfoil</p>  <p>Details: NACA 4421 Max thickness: 21% at 30% chord Max camber: 4% at 25% chord Static LE: 0.05 The airfoil has a leading edge radius of 0.015 chord.</p> <p>Dat file: NACA 4421 0.00000</p>	4421

Realizado por: Autor, 2018

Fuente: (AIRFOIL TOOLS, 2018)

La razón principal por lo cual se crearon los perfiles en la página web mencionada es porque nos proporciona las coordenadas con las cuales fueron generados, una vez obtenidas las coordenadas se debe generar una curva por puntos XYZ en el software solidworks y de esta manera el perfil se dibuja de manera automática.

Tabla 5-3: Coordenadas de los perfiles aerodinámicos

NACA 4415			NACA 4418			NACA 4421		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1.000000	0.000000	0	1.000000	0.001900	0	1.000000	0.002200	0
0.998930	0.000390	0	0.950000	0.018900	0	0.950000	0.021100	0
0.995720	0.001560	0	0.900000	0.034600	0	0.900000	0.038500	0
0.990390	0.003490	0	0.800000	0.062200	0	0.800000	0.069100	0
0.982960	0.006100	0	0.700000	0.085500	0	0.700000	0.095000	0
0.973470	0.009320	0	0.600000	0.104400	0	0.600000	0.116000	0
0.961940	0.013030	0	0.500000	0.118500	0	0.500000	0.131800	0
0.948440	0.017160	0	0.400000	0.127000	0	0.400000	0.141600	0
0.933010	0.021660	0	0.300000	0.127600	0	0.300000	0.142700	0
0.915730	0.026520	0	0.250000	0.124000	0	0.250000	0.138800	0
0.896680	0.031710	0	0.200000	0.117200	0	0.200000	0.131700	0
0.875920	0.037170	0	0.150000	0.106600	0	0.150000	0.120400	0
0.853550	0.042830	0	0.100000	0.091100	0	0.100000	0.103500	0
0.829670	0.048630	0	0.075000	0.080600	0	0.075000	0.092400	0
0.804380	0.054530	0	0.050000	0.067500	0	0.050000	0.078200	0
0.777790	0.060480	0	0.025000	0.050000	0	0.025000	0.058400	0
0.750000	0.066420	0	0.012500	0.037600	0	0.012500	0.044500	0
0.721140	0.072270	0	0.000000	0.000000	0	0.000000	0.000000	0
0.691340	0.077950	0	0.012500	-0.021100	0	0.012500	-0.024200	0
0.660720	0.083410	0	0.025000	-0.029900	0	0.025000	-0.034800	0
0.629410	0.088580	0	0.050000	-0.040600	0	0.050000	-0.047800	0
0.597550	0.093410	0	0.075000	-0.046700	0	0.075000	-0.056200	0
0.565260	0.097850	0	0.100000	-0.050600	0	0.100000	-0.061500	0
0.532700	0.101850	0	0.150000	-0.054900	0	0.150000	-0.067500	0
0.500000	0.105380	0	0.200000	-0.055600	0	0.200000	-0.069800	0
0.467300	0.108370	0	0.250000	-0.054900	0	0.250000	-0.069200	0
0.434740	0.110760	0	0.300000	-0.052600	0	0.300000	-0.067600	0
0.402450	0.112480	0	0.400000	-0.047000	0	0.400000	-0.061600	0
0.370590	0.113450	0	0.500000	-0.040200	0	0.500000	-0.053400	0
0.339280	0.113610	0	0.600000	-0.032400	0	0.600000	-0.044000	0
0.308660	0.112940	0	0.700000	-0.024500	0	0.700000	-0.033500	0
0.278860	0.111410	0	0.800000	-0.016700	0	0.800000	-0.023100	0
0.250000	0.109030	0	0.900000	-0.009300	0	0.900000	-0.012700	0
0.222210	0.105840	0	0.950000	-0.005500	0	0.950000	-0.007400	0
0.195620	0.101900	0	1.000000	-0.001900	0	1.000000	-0.002200	0
0.170330	0.097260	0	-	-	-	-	-	-
0.146450	0.091950	0	-	-	-	-	-	-
0.124080	0.086070	0	-	-	-	-	-	-

Tabla 5-3: (continuación) Coordenadas de los perfiles aerodinámicos

NACA 4415			NACA 4418			NACA 4421		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0.103320	0.079700	0	-	-	-	-	-	-
0.084270	0.072830	0	-	-	-	-	-	-
0.066990	0.065410	0	-	-	-	-	-	-
0.051560	0.057530	0	-	-	-	-	-	-
0.038060	0.049370	0	-	-	-	-	-	-
0.026530	0.041180	0	-	-	-	-	-	-
0.017040	0.033030	0	-	-	-	-	-	-
0.009610	0.024890	0	-	-	-	-	-	-
0.004280	0.016540	0	-	-	-	-	-	-
0.001070	0.008250	0	-	-	-	-	-	-
0.000000	0.000750	0	-	-	-	-	-	-
0.001070	-0.005660	0	-	-	-	-	-	-
0.004280	-0.011020	0	-	-	-	-	-	-
0.009610	-0.015900	0	-	-	-	-	-	-
0.017040	-0.020610	0	-	-	-	-	-	-
0.026530	-0.025020	0	-	-	-	-	-	-
0.038060	-0.029150	0	-	-	-	-	-	-
0.051560	-0.032810	0	-	-	-	-	-	-
0.066990	-0.035820	0	-	-	-	-	-	-
0.084270	-0.038170	0	-	-	-	-	-	-
0.103320	-0.039910	0	-	-	-	-	-	-
0.124080	-0.041060	0	-	-	-	-	-	-
0.146450	-0.041660	0	-	-	-	-	-	-
0.170330	-0.041770	0	-	-	-	-	-	-
0.195620	-0.041470	0	-	-	-	-	-	-
0.222210	-0.040780	0	-	-	-	-	-	-
0.250000	-0.039740	0	-	-	-	-	-	-
0.278860	-0.038450	0	-	-	-	-	-	-
0.308660	-0.037000	0	-	-	-	-	-	-
0.339280	-0.035470	0	-	-	-	-	-	-
0.370590	-0.033900	0	-	-	-	-	-	-
0.402450	-0.032290	0	-	-	-	-	-	-
0.434740	-0.030630	0	-	-	-	-	-	-
0.467300	-0.028910	0	-	-	-	-	-	-
0.500000	-0.027130	0	-	-	-	-	-	-
0.532700	-0.025290	0	-	-	-	-	-	-
0.565260	-0.023400	0	-	-	-	-	-	-
0.597550	-0.021490	0	-	-	-	-	-	-
0.629410	-0.019580	0	-	-	-	-	-	-
0.660720	-0.017720	0	-	-	-	-	-	-
0.691340	-0.015960	0	-	-	-	-	-	-
0.721140	-0.014300	0	-	-	-	-	-	-
0.750000	-0.012770	0	-	-	-	-	-	-
0.777790	-0.011360	0	-	-	-	-	-	-
0.804380	-0.010060	0	-	-	-	-	-	-

Tabla 5-3: (continuación) Coordenadas de los perfiles aerodinámicos

NACA 4415			NACA 4418			NACA 4421		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0.829670	-0.008860	0	-	-	-	-	-	-
0.853550	-0.007750	0	-	-	-	-	-	-
0.875920	-0.006740	0	-	-	-	-	-	-
0.896680	-0.005830	0	-	-	-	-	-	-
0.915730	-0.005020	0	-	-	-	-	-	-
0.933010	-0.004310	0	-	-	-	-	-	-
0.948440	-0.003640	0	-	-	-	-	-	-
0.961940	-0.002970	0	-	-	-	-	-	-
0.973470	-0.002270	0	-	-	-	-	-	-
0.982960	-0.001560	0	-	-	-	-	-	-
0.990390	-0.000920	0	-	-	-	-	-	-
0.995720	-0.000420	0	-	-	-	-	-	-
0.998930	-0.000110	0	-	-	-	-	-	-
1.000000	0.000000	0	-	-	-	-	-	-

Realizado por: Autor, 2018

Fuente: (AIRFOIL TOOLS, 2018)

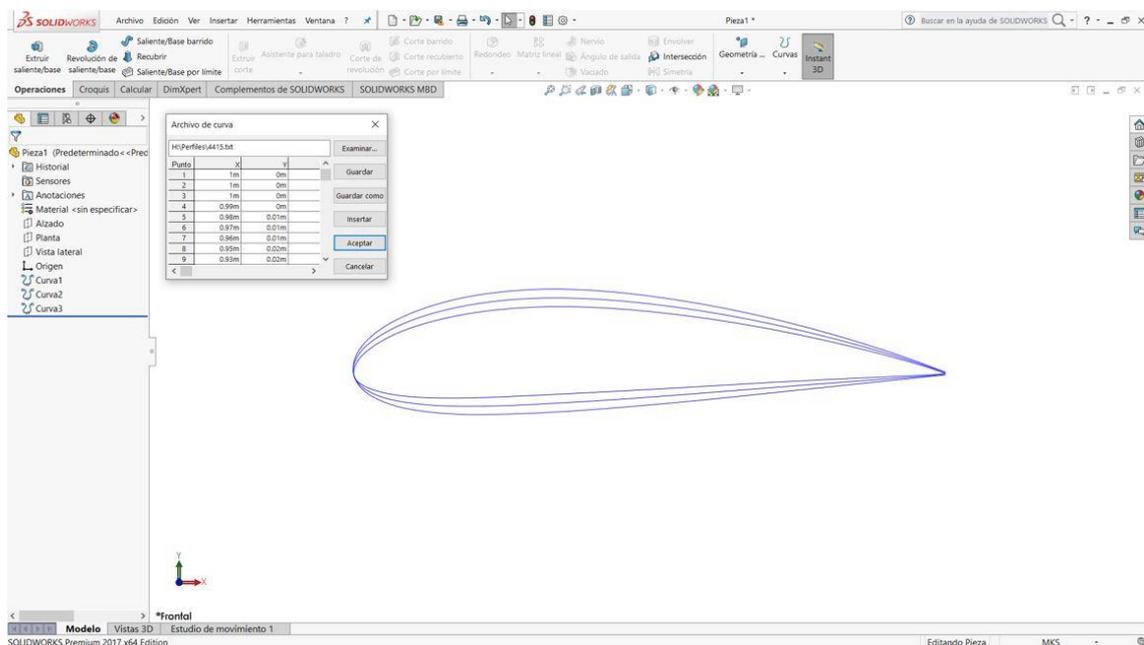


Figura 3-3: Interface de solidworks para la generación de los perfiles

Fuente: (AIRFOIL TOOLS, 2018)

Generados los perfiles aerodinámicos del aspa se procede a escalarlos según el factor de escala geométrico determinado, dando prioridad al tamaño de la cuerda y ángulo de giro. Posterior a esto se debe ubicar cada perfil debidamente escalado en la posición adecuada, el perfil 4415 se ubica en la parte final del aspa, el perfil 4418 en la parte central del aspa mientras que el 4421 se ubica en la base del perfil como se muestra a continuación.

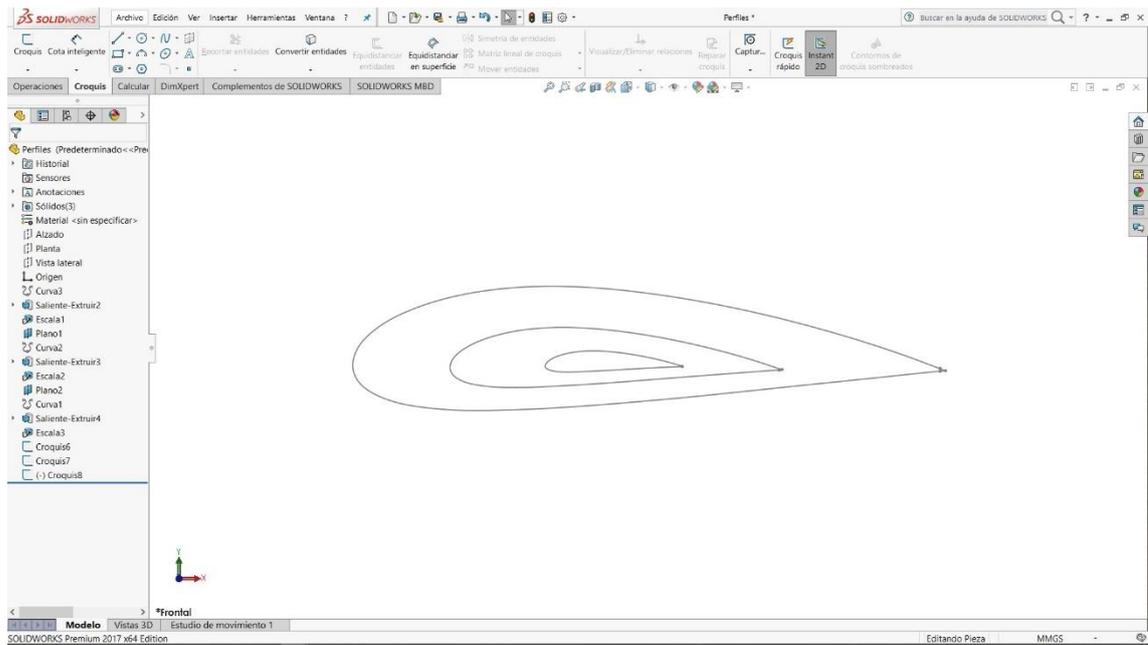


Figura 4-3: Interface de solidworks , vista en alzado de los perfiles

Fuente: Elaboración Propia

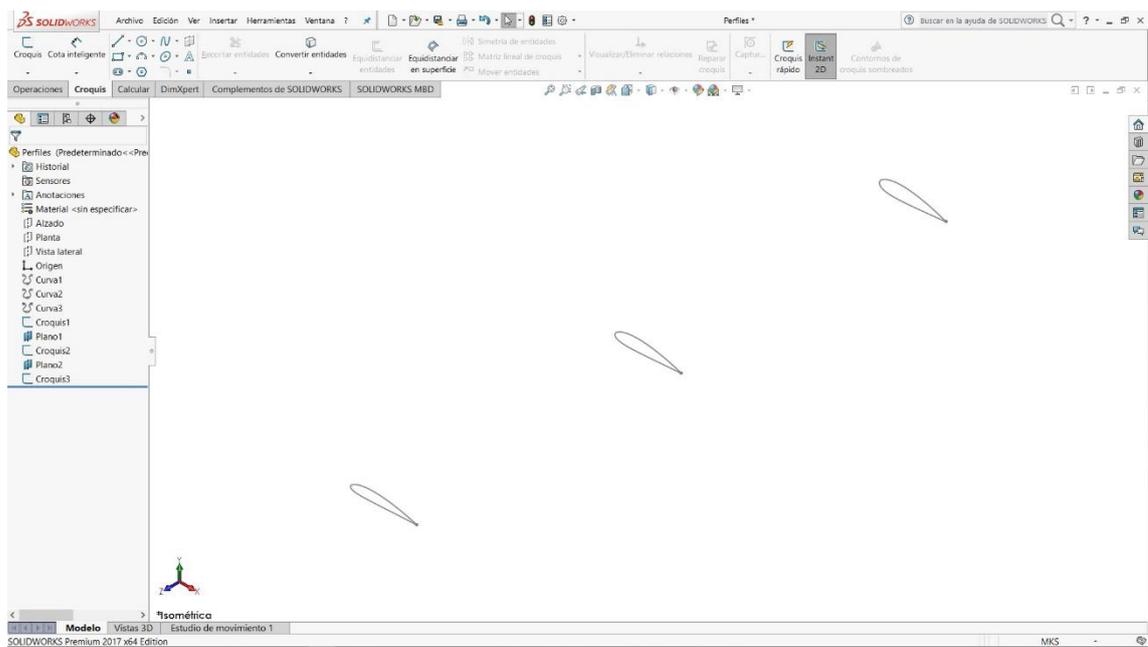


Figura 5-3: Interface de solidworks , vista en isométrico de los perfiles

Fuente: Elaboración Propia

A partir de la isometría generada ya con las secciones escaladas de los perfiles, se procede a generar el sólido en 3D, para ello se emplea la herramienta *recubrir*, se debe seleccionar en primera instancia todas las secciones de los perfiles, posteriormente las líneas o curvas guías como se indica a continuación en las figuras.

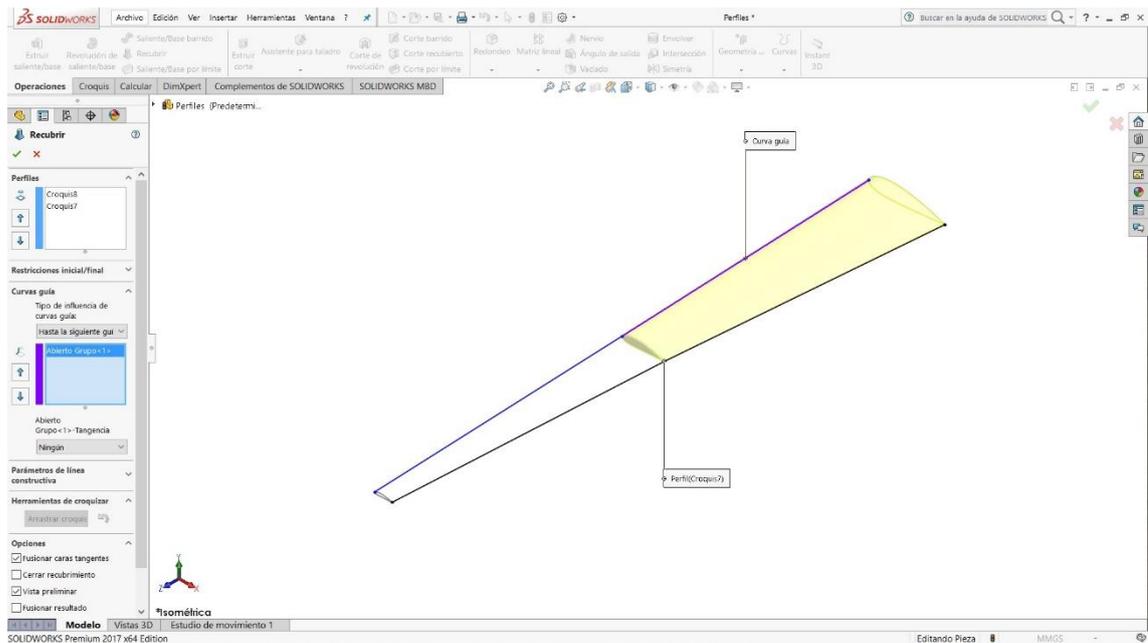


Figura 6-3: Interface de solidworks , recubrimiento de los perfiles

Fuente: Elaboración Propia

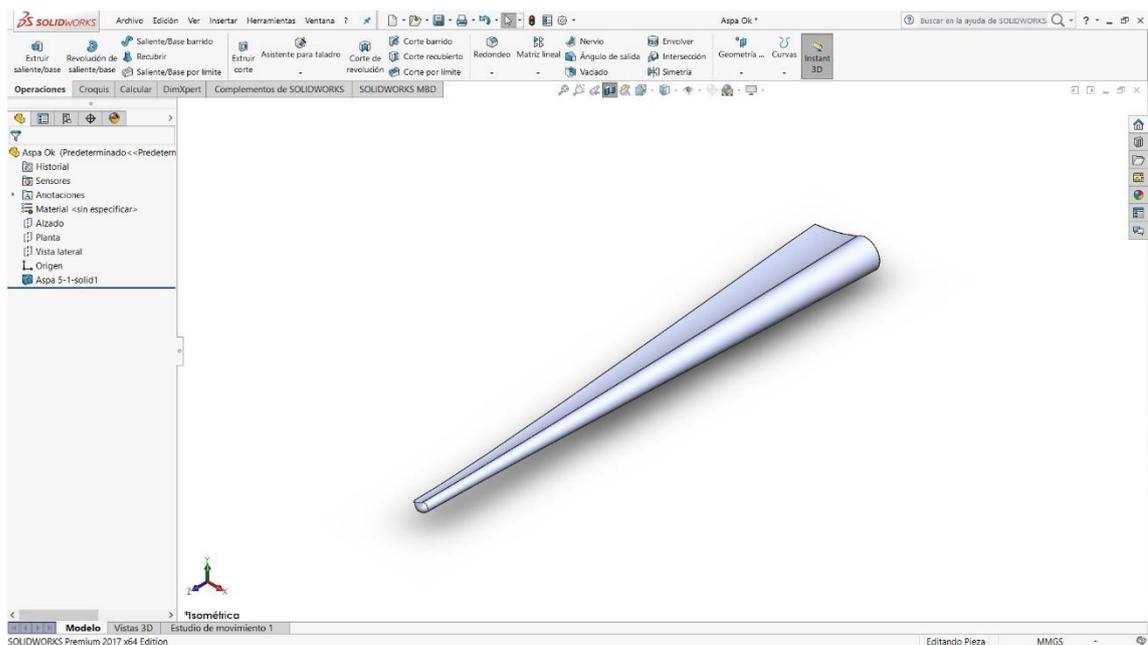


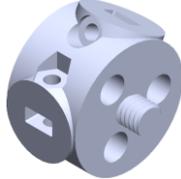
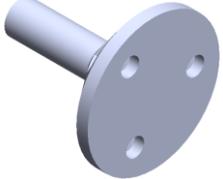
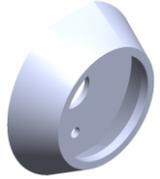
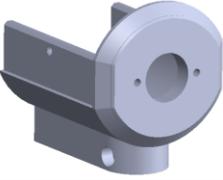
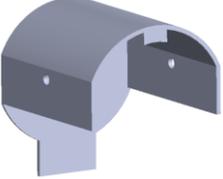
Figura 7-3: Interface de solidworks , vista en isométrico del álabe

Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar en la figura 7-3 la configuración final que tendrá el modelo de aerogenerador, para la modelación geométrica del hub y la góndola se emplea el mismo proceso primero partir del prototipo a emplear el factor de escala geométrico y generar el plano geométrico para finalmente convertirlo en sólido. Se planteó para el modelo realizar una configuración que permita intercambiar modelos de aspas, esto con la finalidad de continuar la investigación al experimentar con distintos perfiles aerodinámicos que permitirán estudiar su comportamiento a estar expuestos

a potenciales eólicos de distintas zonas del Ecuador. La configuración final del modelo se muestra a continuación.

Tabla 6-3: Componentes del modelo de aerogenerador

Orden	Descripción	Imagen
1	Punta	
2	Sujetador de aspas	
3	Aspa	
4	Eje del rotor	
5	Conector entre eje y góndola	
6	Base de la góndola	
7	Cubierta de la góndola	
8	Torre	

Realizado por: Autor,2018

Fuente: Elaboración Propia

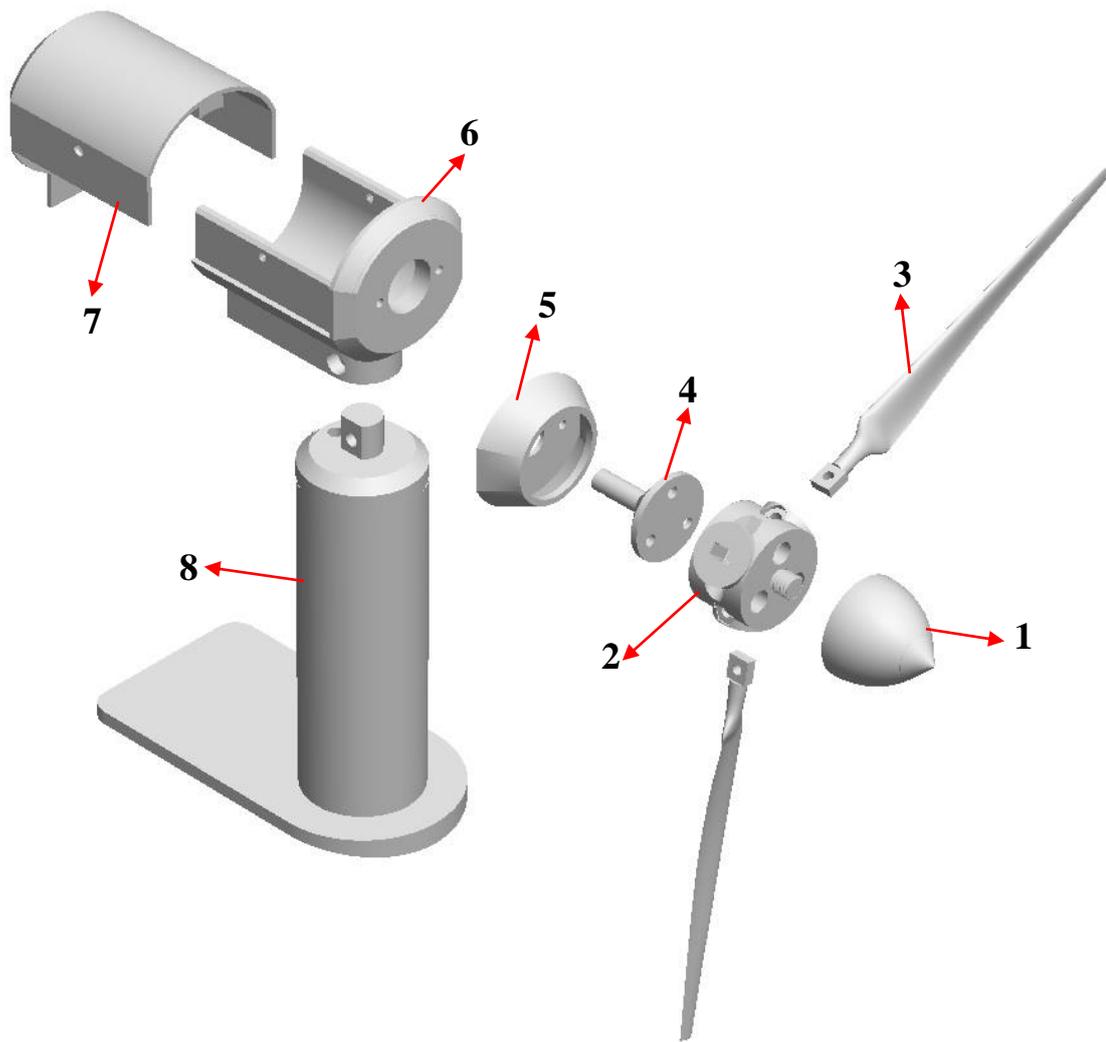


Figura 8-3: Componentes del modelo de aerogenerador

Fuente: Elaboración Propia

3.4.2.2 Simulación en Ansys

Mediante la simulación en el software *Ansys* en el módulo *Fluent* se podrá determinar y analizar el comportamiento del modelo de aerogenerador expuesto a las condiciones de viento que nos brindan las dos estaciones viables para la implementación de un parque eólico, los parámetros a observar mediante la simulación son los siguientes.

- Comportamiento de las líneas de flujo antes y después del rotor eólico, de esta manera se podrá verificar la similitud cinemática.
- Caída de presión al atravesar el rotor eólico.

Para una adecuada simulación se debe cumplir con todas las secuencias de pasos detallados a continuación.

- Modelo geométrico de análisis

Para la simulación a realizar no hace falta estudiar todo el modelo de aerogenerador creado en la sección anterior, ya que se requiere observar el comportamiento de las líneas de flujo antes y después de las aspas, es por ello el componente a emplear será simplemente el rotor eólico. Se debe cargar el modelo en la sección de geometry en el módulo fluent del software Ansys, una vez cargado el modelo, se debe generar la región que lo contendrá, las cuales serán la región del túnel de viento y el área de barrido de las aspas como se muestra en la (figura 9-3).

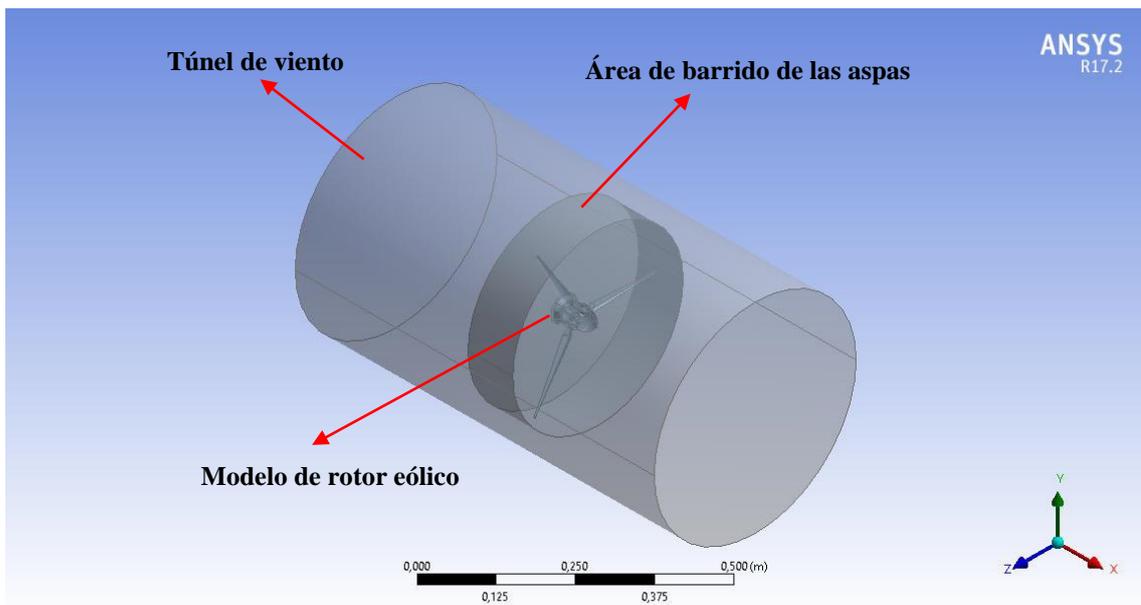


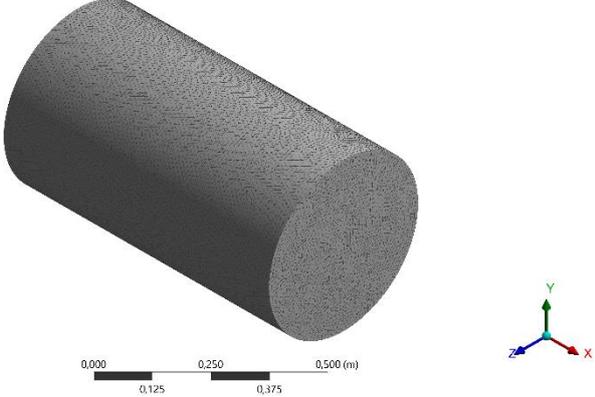
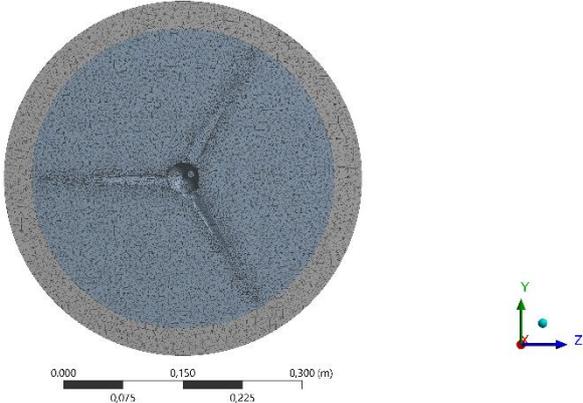
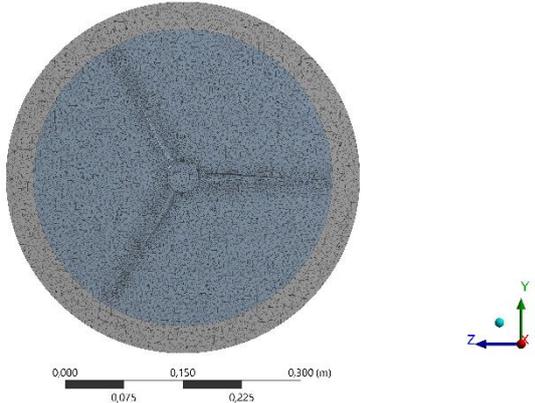
Figura 9-3: Regiones para simulación

Fuente: Elaboración Propia

- Mallado

Una vez definida la geometría y las regiones, se procede a generar la malla, la misma que tiene como función partir en volúmenes finitos el cuerpo a analizar, logrando así obtener resultados con mayor precisión. Para la generación de la malla emplearemos la herramienta de *Icem CFD*, que está integrada al software Ansys.

Tabla 7-3: Proceso de mallado del modelo de aerogenerador

Orden	Descripción	Imagen
1	Mallado del volumen del flujo	
2	Mallado del área de barrido de las aspas	
3	Mallado de las secciones de las aspas que estarán en contacto con el fluido	

Realizado por: Autor, 2018

Fuente: Elaboración Propia

La manera de comprobar si el mallado se encuentra dentro de parámetros razonables es a través de una gráfica que indica la calidad del mallado con la cual se va a simular, dicha gráfica se verifica con los niveles de calidad de la malla, según el tipo de malla aplicado.

Tabla 8-3: Niveles de calidad de la malla

Inadecuado	Malo	Suficiente	Buena	Muy Buena	Sobresaliente
0-0,001	0,001-0,15	0,15-0,20	0,20-0,70	0,70-0,95	0,95-1

Realizado por: Autor,2018

Fuente: (BUSTAMANTE SÁNCHEZ, 2014)

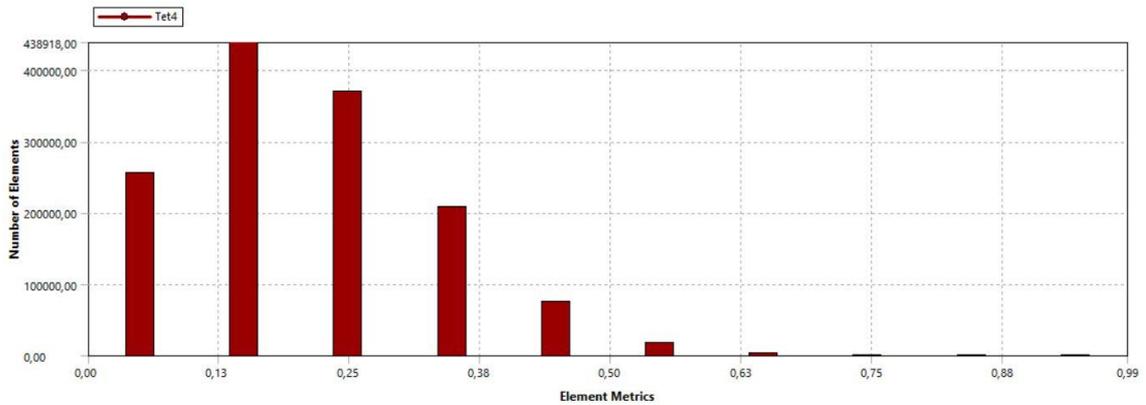


Gráfico 1-3: Calidad de la malla

Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar en el gráfico anterior que la malla cae dentro de parámetros aceptables para realizar la simulación.

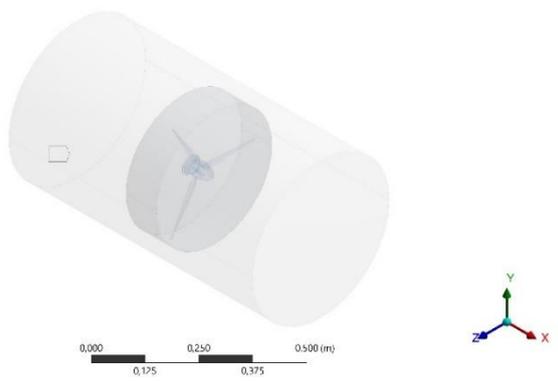
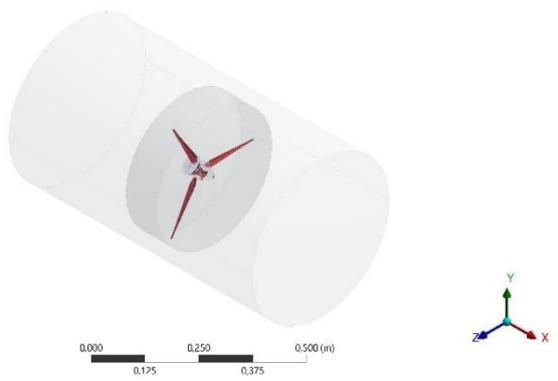
- Condiciones de contorno

Para el análisis CFD de los modelos, las condiciones de contorno no son más que la configuración de la sección que contiene el modelo a analizar, en este apartado es donde se define los dominios como la entrada, salida, caras en contacto, se define también que el elemento actuante durante la simulación será un fluido.

Tabla 9-3: Condiciones de contorno

Orden	Descripción	Imagen
1	Ingreso (Inlet)	

Tabla 9-3: (continuación) Condiciones de contorno

Orden	Descripción	Imagen
2	Salida (outlet)	
3	Rotor eólico (aspas)	

Realizado por: Autor, 2018

Fuente: Elaboración Propia

Definidas todas las condiciones de contorno del modelo a analizar, se procede a definir todas las propiedades del fluido, velocidad del viento, velocidad de giro del rotor y método de solución empleado, tema que se explica en la siguiente sección.

- Configuración de parámetros para la simulación

Ingresando al apartado de setup de Ansys se debe definir todos los parámetros que se requiere ingresar en cada sección (figura 10-3).

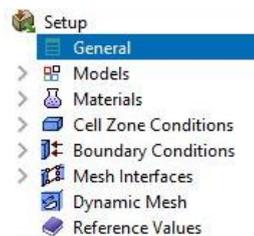


Figura 10-3: Secciones de configuración de setup

Fuente: Software Ansys – Módulo Fluent

General. - En esta sección se define el tipo de solución que va a tener la simulación, para este caso se define un tipo de solución basado en la presión ya que es más eficiente para alcanzar la convergencia rápidamente debido a que resuelve las ecuaciones de conservación de masa y momento de forma simultánea, una desventaja que presenta este tipo de solución es que emplea considerablemente los recursos de la PC, en esta sección también se definirá el eje y la dimensión con la que actuará la fuerza de gravedad. (BUSTAMANTE SÁNCHEZ, 2014)

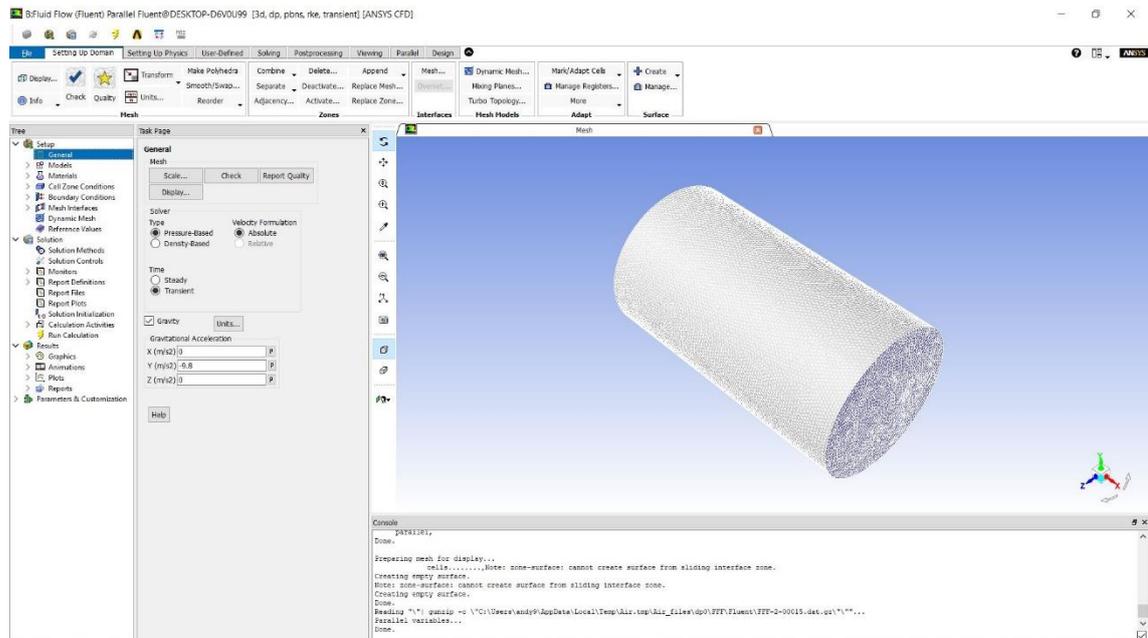


Figura 11-3: Secciones de configuración - general

Fuente: Software Ansys – Módulo Fluent

Modelo de solución. - Existen varios modelos de solución dentro del módulo fluent de Ansys, los cuales se deben seleccionar de acuerdo a los fenómenos físicos que estén presentes en la simulación, para este caso se optó por usar el modelo de viscosidad diferente a laminar, y a través de este el modelo de *K-epsilon realizable* que nos dice que incorpora una formulación nueva de la viscosidad turbulenta y además presenta mejoras en la ecuación que gobierna la disipación de la energía. Este modelo también indica mejores resultados en problemas que impliquen flujos con rotación y capas límites con gradiente de presión adverso con respecto al modelo simple.

Además, es recomendado para casos estándar, ya que es apropiados para flujos con deformación rápida, moderados torbellinos, vértices moderados y flujo de transición local.

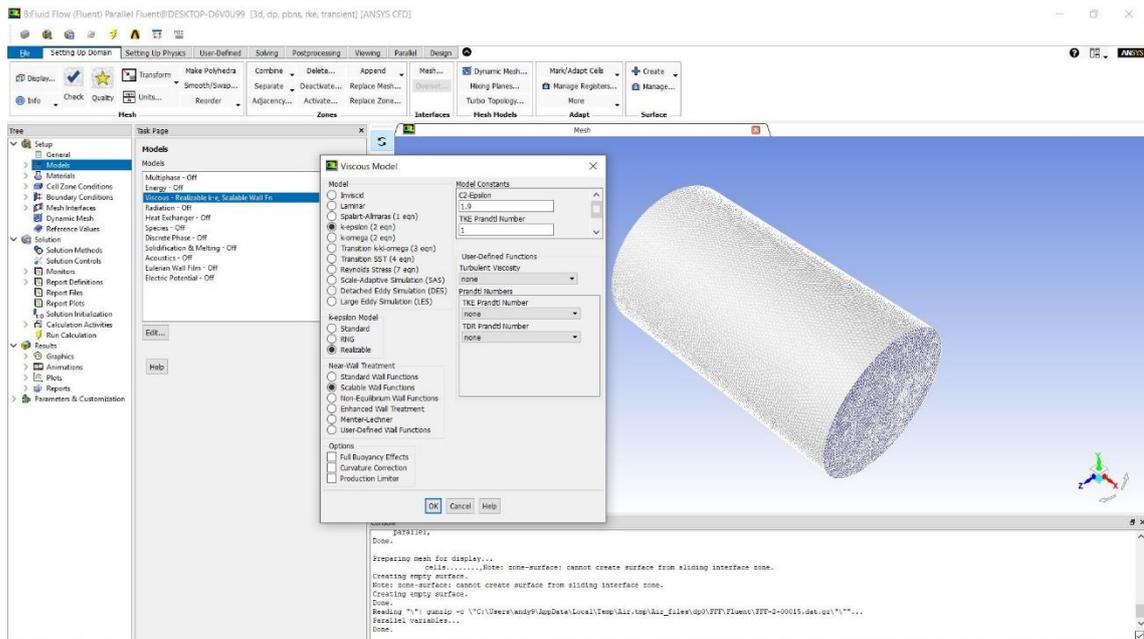


Figura 12-3: Secciones de configuración - modelo de solución

Fuente: Software Ansys – Módulo Fluent

Materiales. - En este apartado se define el material que estará actuando en la simulación, como en este caso se trata de una simulación de un rotor eólico se define al aire como material principal, ingresando los valores de densidad y la viscosidad del aire que actuará durante la simulación, para este caso se deberá ingresar los valores que rigen en la provincia de Chimborazo.

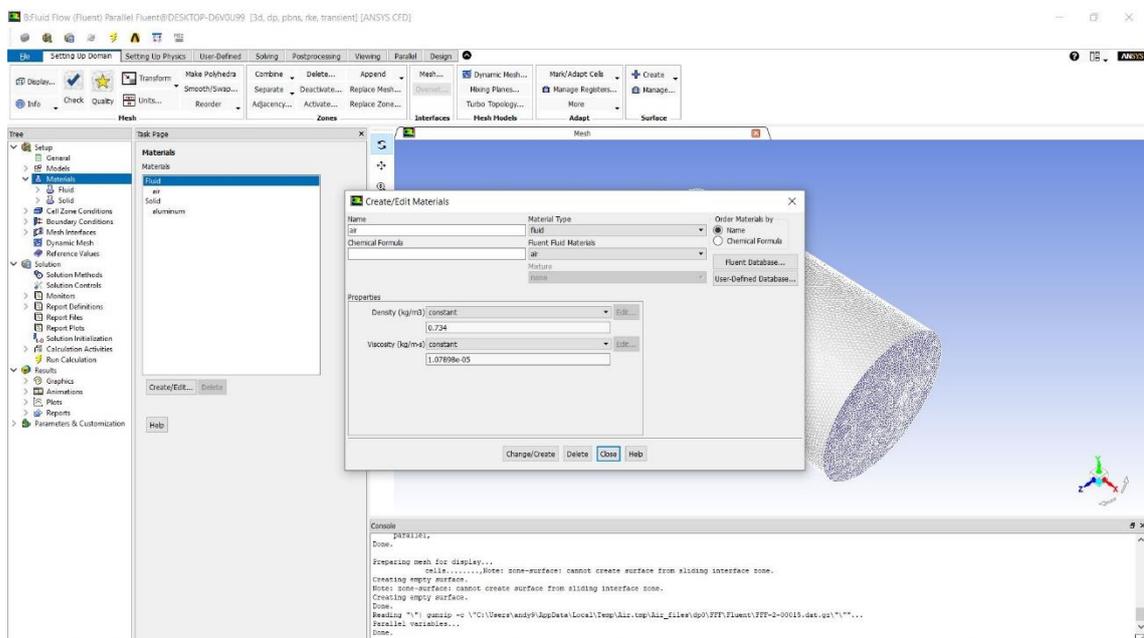


Figura 13-3: Secciones de configuración - materiales

Fuente: Software Ansys – Módulo Fluent

Condiciones de zona. – Se definirá principalmente que es un análisis multimarco de referencia, ya que tenemos al túnel de viento y el área de barrido de las aspas, primeramente se define que el

túnel de viento permanecerá estático durante la simulación, mientras que las aspas se encuentran rotando respecto al eje X con una velocidad de 600 rpm con respecto al túnel de viento, definiremos también que se emplea una mesh motion la misma que se encuentra en estado transitorio ya que se analizará su comportamiento respecto al tiempo, todos los parámetros seteados se muestra a continuación en la siguiente figura.

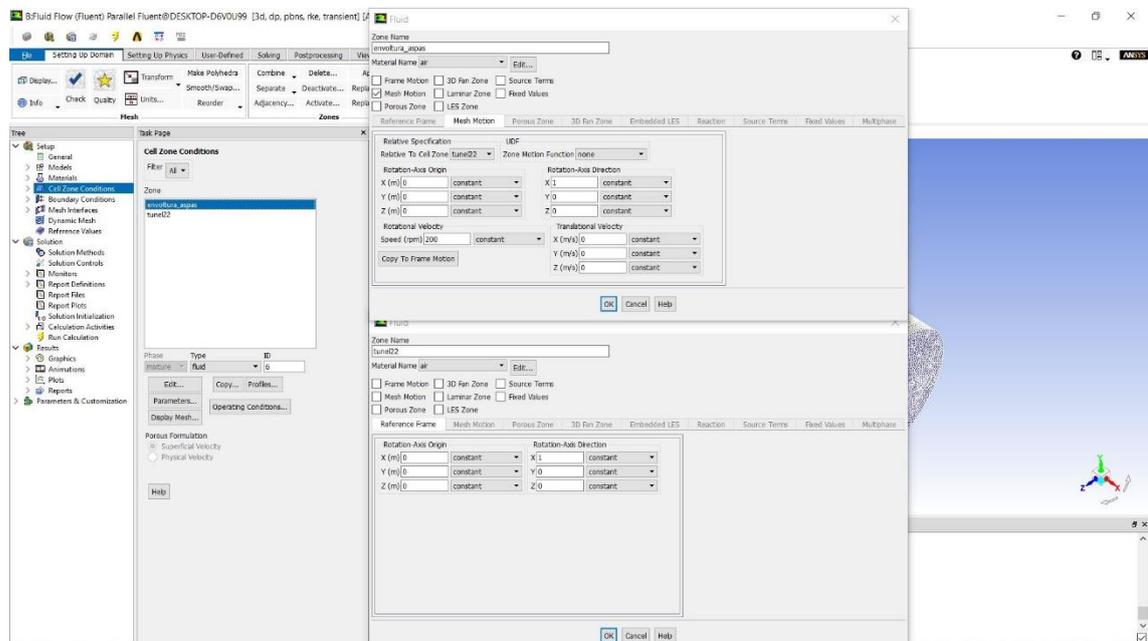


Figura 14-3: Secciones de configuración – condiciones de zona

Fuente: Software Ansys – Módulo Fluent

Condiciones de borde. – Como se indicó en la sección de condiciones de contorno el ingreso, salida y caras que estarán en contacto con el fluido, en este apartado se definirá la presión y velocidad que tendrá el mismo durante el análisis, en este caso al ingreso tendremos una velocidad de 4.5 m/s y una presión manométrica igual a 0 psi. Se debe indicar también cual será la presión que tendrá el fluido a la salida, el software considera por defecto que el resto de zonas son paredes y nos permite ingresar el coeficiente e rozamiento que estas poseen.

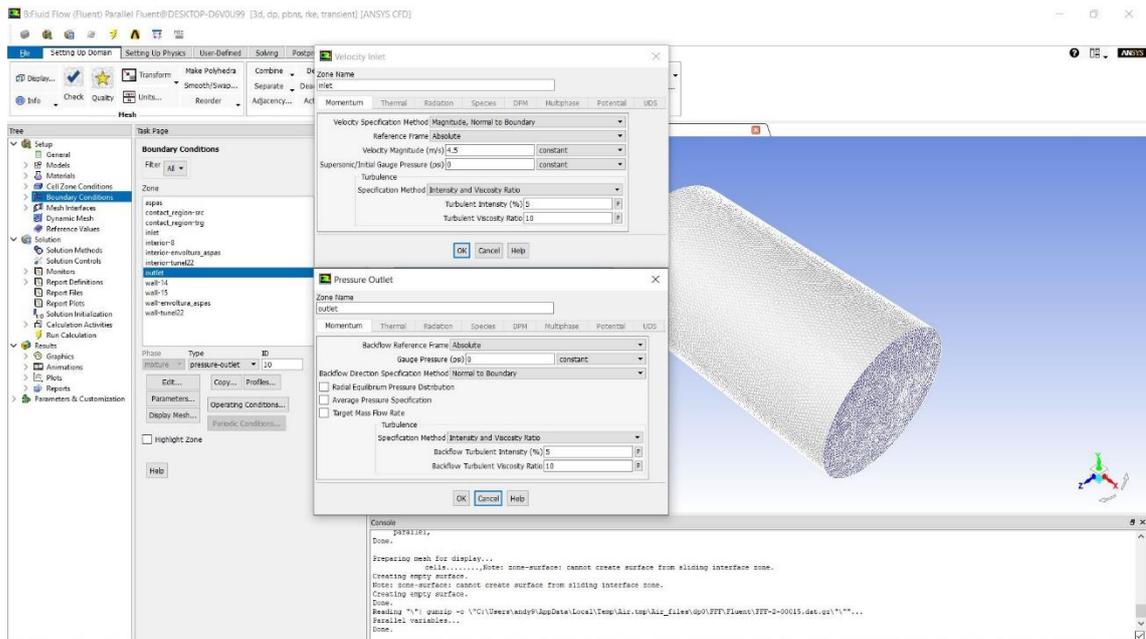


Figura 15-3: Secciones de configuración – condiciones de borde

Fuente: Software Ansys – Módulo Fluent

Método de solución. – El método de solución empleado es el *coupled* o *acoplado*, este método emplea modelos matemáticos de ecuaciones de segundo orden, logrando así resolver de forma simultánea la ecuación de continuidad y de momento para alcanzar una convergencia de la simulación de manera más eficiente y rápida.

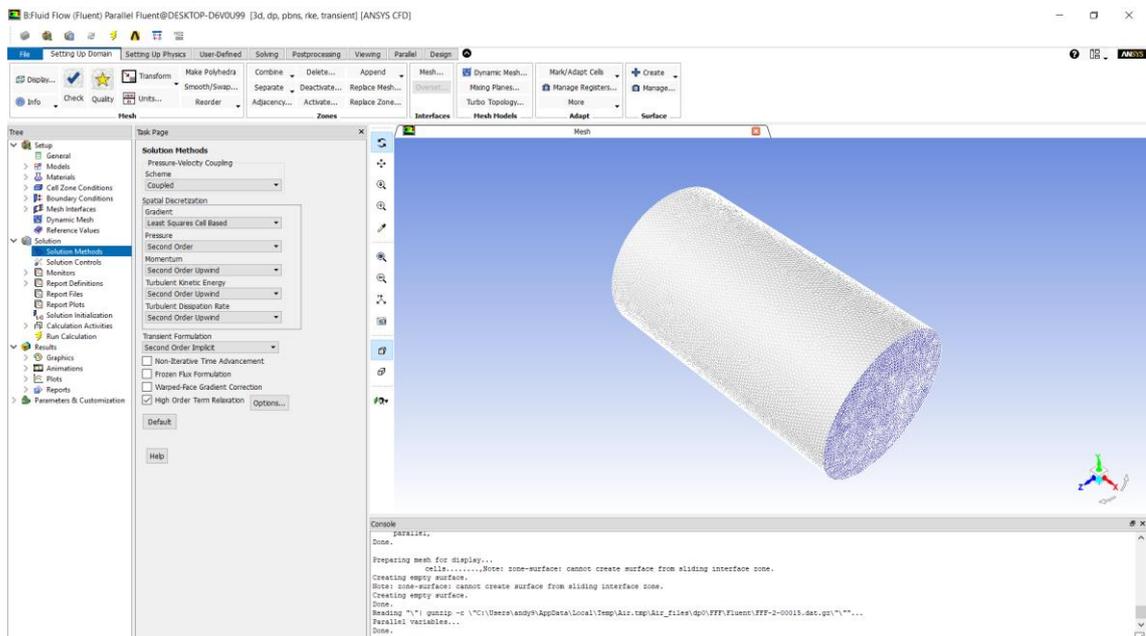


Figura 16-3: Secciones de configuración – método de solución

Fuente: Software Ansys – Módulo Fluent

- Resultados de la simulación

En este apartado se analizará los resultados obtenidos de la simulación del modelo de aerogenerador, partiendo desde la forma que tendrán las líneas de flujo antes y después del rotor eólico, caídas de presión, vectores de velocidad en las aspas.

Líneas de flujo. – Una condición para cumplir con la ley de semejanza geométrica, es que las líneas de flujo deben ser iguales tanto en el modelo como en el prototipo, no debe existir algún tipo de singularidad que pueda causar tensión superficial, mediante la simulación podemos observar en la siguiente figura las líneas de flujo que se presenta desde el ingreso, a través de las aspas y a la salida del túnel, verificando de forma visual que no existe ningún tipo de singularidad por lo que nos lleva a confirmar que existe una semejanza cinemática.

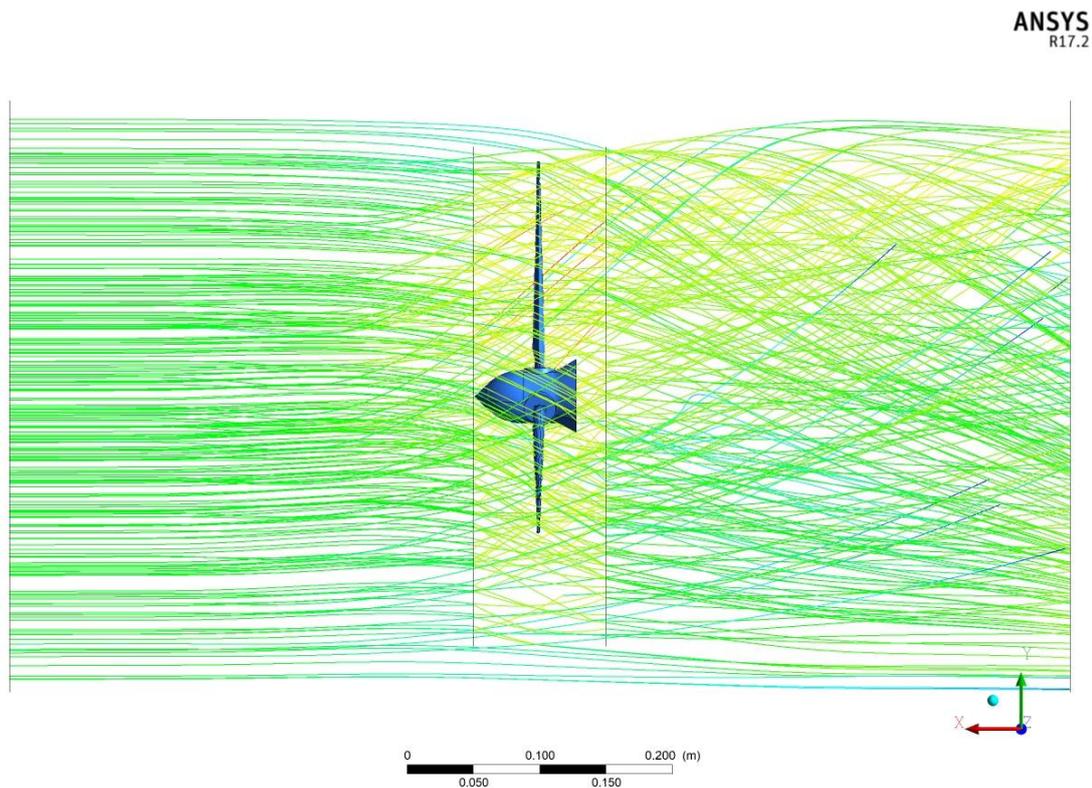


Figura 17-3: Líneas de flujo

Fuente: Software Ansys – Módulo Fluent

La figura 18-3 muestra de mejor manera que se cumple la similitud cinemática ya que no presenta singularidades al atravesar las aspas del modelo de aerogenerador.

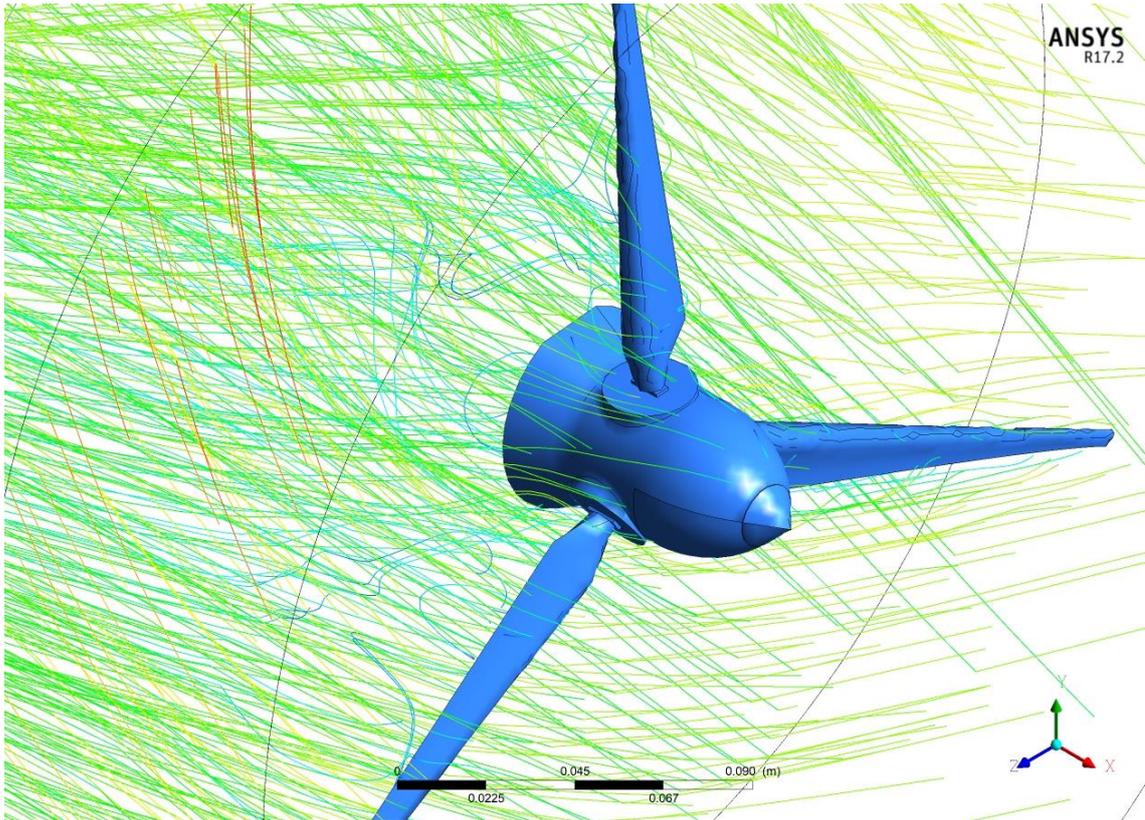


Figura 18-3: Líneas de flujo en el rotor eólico

Fuente: Software Ansys – Módulo Fluent

Caída de presión. – De igual forma mediante la simulación se puede obtener la caída de presión a lo largo del eje X que tiene nuestro modelo al estar expuesto a la velocidad del viento dada, permitiendo de esta manera obtener las fuerzas de arrastre y sustentación que posteriormente nos generaran un torque permitiendo así que el rotor gire y por medio de su conexión con el generador produzca energía eléctrica. Las figuras mostradas a continuación indican como los perfiles NACA actúan permitiendo una caída de presión.

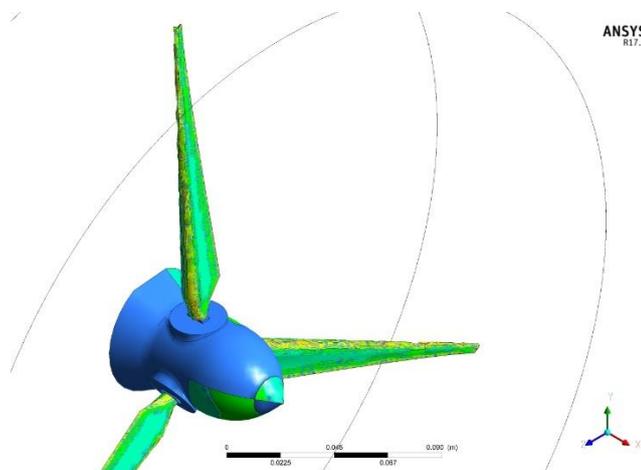


Figura 19-3: Caída de presión en las aspas

Fuente: Software Ansys – Módulo Fluent

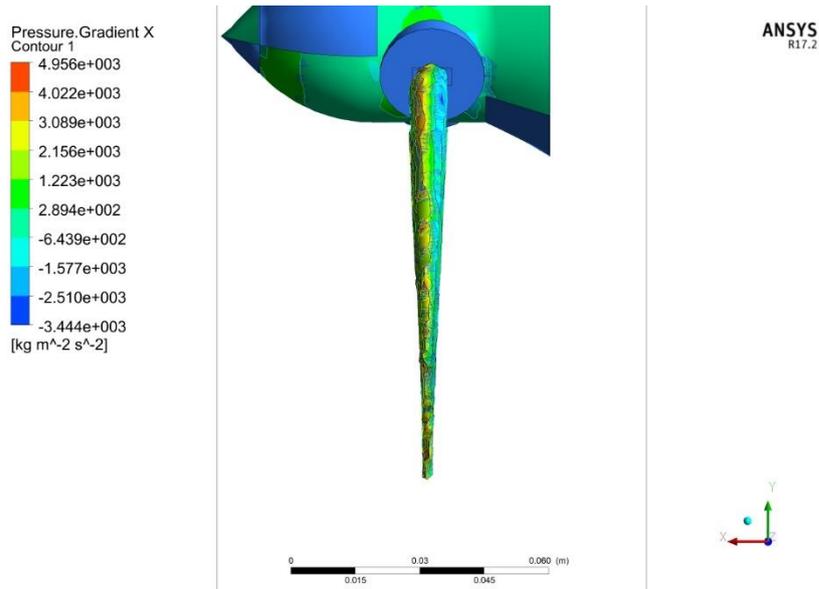


Figura 20-3: Caída de presión en la dirección del viento

Fuente: Software Ansys – Módulo Fluent

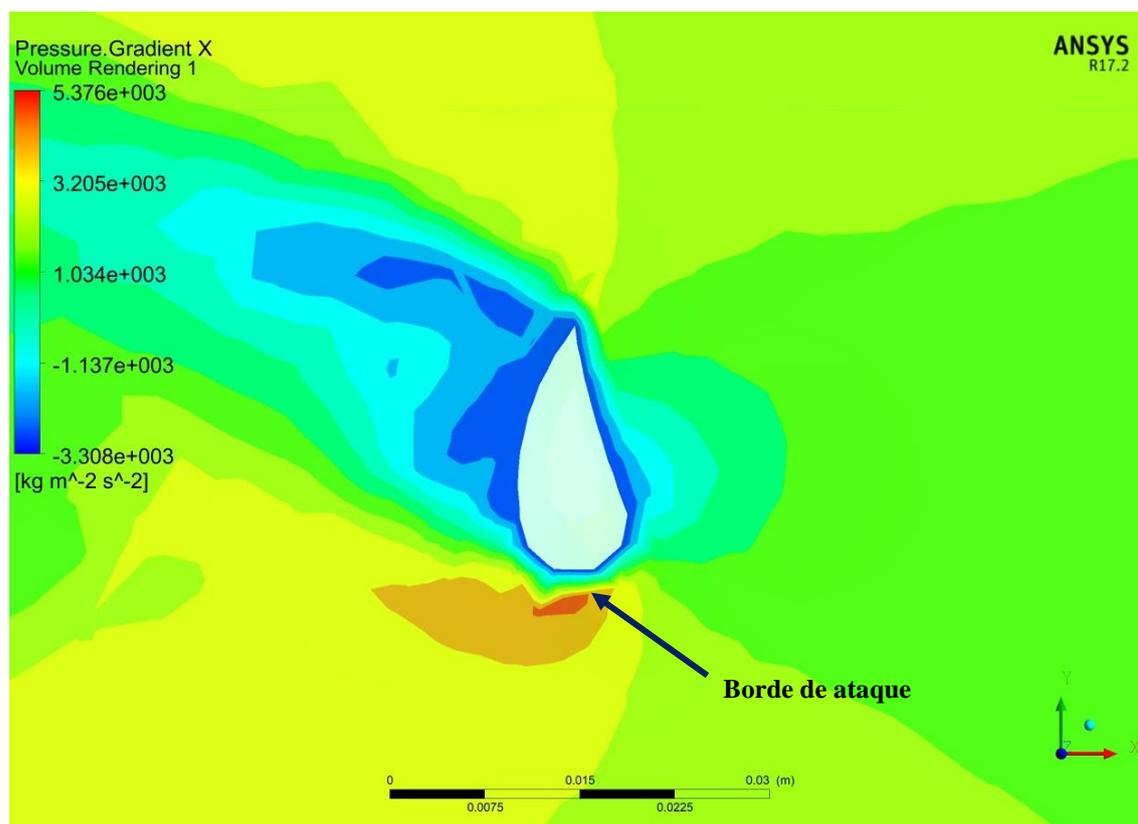


Figura 21-3: Caída de presión en el perfil aerodinámico

Fuente: Software Ansys – Módulo Fluent

En la figura 21-3 se puede observar el punto de presión relativa en el borde de ataque del perfil, el cual va disminuyendo según se va aumentando la velocidad, dada esta afirmación se puede afirmar que mediante el cumplimiento de semejanza geométrica se está cumpliendo de manera directa la semejanza dinámica.

3.4.3 Técnica de construcción del modelo

Una vez obtenida la forma final del modelo de aerogenerador y verificado su funcionalidad mediante la simulación, se empieza el proceso de construcción el mismo que se lo llevara a cabo empleando la técnica de fabricación por adición y por medio de ella la impresión 3D, la cual nos permite crear modelos empleando la superposición de capas sucesivas de material.

- Impresora 3D

La impresora 3D nos permite reproducir piezas en tres dimensiones, las cuales deben ser diseñadas con la ayuda de softwares informáticos. Consta de un mecanismo capaz de moverse en tres direcciones, consigo lleva un inyector de plástico el cual va ubicando capas para formar el sólido deseado. (DE CASTRO, 2014)

- Proceso constructivo

A partir de los modelados de las piezas que conformaran todo el conjunto del modelo de aerogenerador, creadas en el software de diseño Solidworks, procedemos a exportarlas en formato .stl el cual es empleado por la mayoría de impresoras 3D.

Exportados todos los componentes en formato .stl, se los procesa con el software que emplea la impresora 3D, en este caso será el *Simplify3D*, por medio de este software se podrá setear todos los parámetros de impresión que tienen como finalidad dar un acabado de calidad a la pieza fabricada, estos parámetros se muestran a continuación.

Tabla 10-3: Parámetros de impresión 3D

Orden	Parámetro	Set point
1	Temperatura de fundición del material	205 – 210 [°C]
2	Velocidad de impresión	60 – 90 [mm/s]
3	Porcentaje de Relleno	90 %
4	Temperatura de la cama	45 [°C]

Realizado por: Autor, 2018

Fuente: Elaboración Propia

Una vez seteados todos los parámetros antes mencionados se procede a generar el código de impresión, el material empleado para la fabricación del modelo es ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno) con un acabado superficial pulido, a continuación, se muestra una tabla con el proceso evolutivo de la construcción del modelo de aerogenerador.

Tabla 11-3: Proceso constructivo del modelo de aerogenerador.

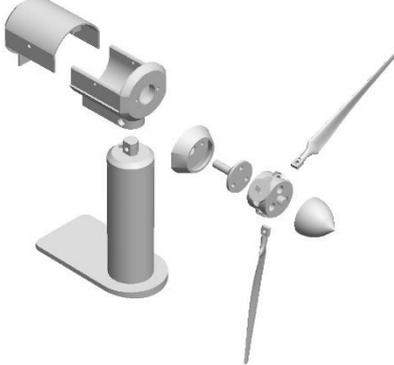
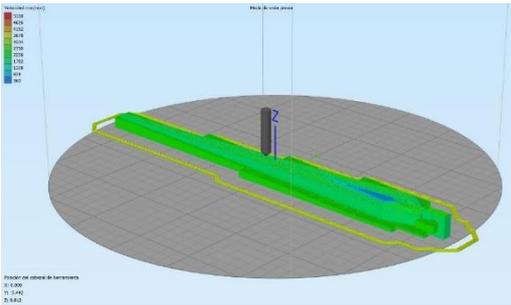
Etapa	Descripción	Gráfico
1	Modelado del modelo de aerogenerador cumpliendo con el factor de escala correspondiente.	
2	Generación del código formato .g para la posterior impresión 3D.	
3	Calibración de los parámetros de impresión (temperatura, velocidad de flujo y velocidad de impresión)	
4	Impresión de la cubierta de la góndola.	
5	Impresión de la base de la góndola.	

Tabla 11-3: (continuación) Proceso constructivo del modelo de aerogenerador.

Etapa	Descripción	Gráfico
6	Impresión de la base portadora de las aspas.	
7	Impresión del soporte de la góndola.	
8	Impresión de las aspas del aerogenerador	
9	Ensamblaje del modelo de aerogenerador.	

Realizado por: Autor,2018

Fuente: Elaboración Propia

3.4.3.1 *Recopilación de datos*

La técnica empleada para la recopilación de datos durante el proceso de experimentación fue la observación experimental, esta técnica permite recopilar datos en condiciones relativamente controladas por el investigador, es decir por medio de esta técnica se puede manipular las variables de estudio.

3.4.4 Instrumentos

3.4.4.1 Instrumentos de medición, control y adquisición de datos

Durante la experimentación se empleó variedad de instrumentos con la finalidad de facilitar la adquisición de datos, y a su vez un mejor control del túnel de viento; dichos instrumentos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 12-3: Instrumentos electrónicos empleados.

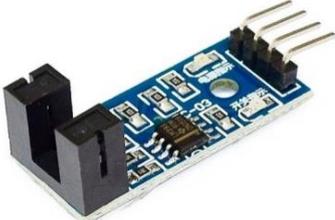
Descripción	Gráfico	Características
Tarjeta de adquisición de datos (Arduino – Pro micro)		<ul style="list-style-type: none"> - Microcontrolador: ATmega32U4 - Voltaje de Operación: 5V DC (nivel lógico) - Voltaje de Entrada: 7V - 12V DC - Pines I/O Digitales: 12 (5 PWM) - Pines Analógicos: 4 (10 bits) - Corriente DC por Pin I/O: 40 mA - Memoria FLASH: 32KB (2KB usados por el Bootloader) - Memoria SRAM: 2.5KB - Memoria EEPROM: 1KB - Frecuencia de Reloj: 16 MHz - Dimensiones: 32.02 mm x 17.78 mm
Módulo variador de velocidad del ventilador		<ul style="list-style-type: none"> - Potencia de trabajo: 150 W máx. - Voltaje de operación: 127V.
Sensor de velocidad del viento – Anemómetro de 3 tazas		<ul style="list-style-type: none"> - Salida de pulso, salida PNP - Estilo del sensor: tres tazas - Voltaje: 0-5 V - Fuente de alimentación: 12-24 V - Rango de medición: 0-30 m/s o 0-60 m/s - Resolución: 0.1 m/s - Max. Potencia: tipo de pulso Max \leq 200 MW - Tensión máx. 300 MW - Corriente max \leq 700mw - Velocidad del viento de arranque: 0.4 ~ 0.8 m/s - Distancia de transmisión: $>$ 1000 m
Sensor óptico de velocidad		<ul style="list-style-type: none"> - Voltaje de Operación: 3.3V - 5V DC - - Salidas: Analógica y Digital - Sensor: MOCH22A - Tipo de emisor: Fotodiodo IR - Tipo de detector: fototransistor - Comparador: LM393

Tabla 12-3: (continuación) Instrumentos electrónicos empleados.

Descripción	Gráfico	Características
Motorreductor Pololu		<ul style="list-style-type: none"> - Relación de transmisión: 9.96: 1 - Velocidad de ejecución libre @ 6V-1300 rpm - Corriente gratuita 6V: 40 mA - Corriente de parada 6V: 360 mA - Par de parada a 6V: 2 oz - Tipo de motor: 0.36A puesto a 6V
Fuente de Alimentación		<ul style="list-style-type: none"> - Modelo: DR-60-24 - Voltaje de ingreso: 100-124 VAC - Corriente de ingreso: 1.8 A - Voltaje de salida: 24 VDC - Corriente de salida: 2.5 A

Realizado por: Autor,2018

Fuente: Elaboración Propia

3.4.4.2 *Softwares requeridos*

Tabla 13-3: Software empleados.

Orden	Nombre
1	NI LabView
2	Solidworks
3	Arduino
4	QBlade
5	Ansys

Realizado por: Autor,2018

Fuente: Elaboración Propia

3.4.4.3 *Procesamiento de datos*

Los datos adquiridos durante la fase de experimentación se los alojo en una hoja de registro de datos (ANEXO B) en la cual se registró la fecha en la que se realiza las pruebas, la velocidad del viento, la velocidad de giro del rotor eólico y la cantidad de energía eléctrica generada, posterior a esto se generó las curvas características deseadas.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

En este capítulo se indicarán de una manera comparativa los resultados de la capacidad de generación eléctrica, obtenidos durante las pruebas experimentales del modelo de aerogenerador expuesto a las diferentes velocidades de viento que nos dan en los dos posibles puntos donde es factible implementar un parque eólico, dichos resultados además se compararan con las curvas de capacidad de generación de energía eléctrica del prototipo de aerogenerador proporcionado por el fabricante, finalmente se comparan dichos resultados entre los dos puntos posibles para la implementación de un parque eólico.

4.1 Resultados obtenidos.

4.1.1 *Evaluación de la capacidad de generación de energía eléctrica en Atillo*

En la tabla 6-3 se muestran los valores de la capacidad de generación eléctrica y velocidad del viento, estos resultados se obtuvieron al someter el modelo de rotor eólico a velocidades del viento promedios en la estación de Atillo.

Tabla 1-4: Potencia eléctrica y velocidad del viento - Estación Atillo.

Potencia [W]	Velocidad del viento [m/s]
0	4
0,01	4,6
0,02	4,65
0,02	4,71
0,03	4,78
0,08	4,87
0,09	4,97
0,1	5,09
0,12	5,23
0,15	5,37
0,17	5,52
0,18	5,68
0,21	5,83
0,24	6,1
0,52	6,21

Realizado por: Autor,2018

Fuente: Elaboración Propia

Se observa que la velocidad máxima que alcanza el rotor eólico es de 6,21 [m/s] dicha velocidad nos proporciona una generación eléctrica máxima de 0.52 [W].

Al procesar dichos datos se observa en el gráfico 1-4, la variación de la capacidad de generación de energía eléctrica en función de la velocidad del viento según los valores obtenidos durante la experimentación.

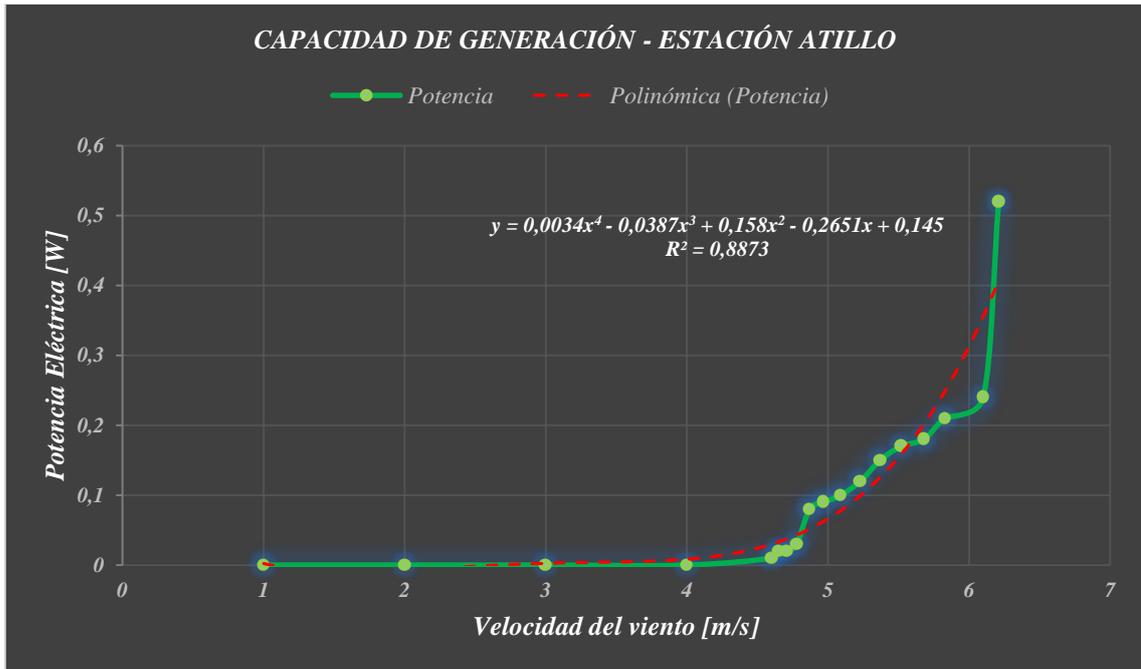


Gráfico 1-4: Capacidad de generación – Estación Atillo

Fuente: Elaboración Propia

El gráfico nos indica que la generación eléctrica empieza a producirse a una velocidad del viento igual a 4.6 [m/s] y alcanza un nivel máximo de generación a los 6.21 [m/s]. Este valor máximo de generación eléctrica lo reemplazamos en la ecuación 41, obteniendo como resultado la capacidad de generación de energía eléctrica del prototipo de 0.7 [W], que viene a ser similar a la obtenida mediante la experimentación.

Po otra parte el gráfico 2-4 nos muestra el torque generado en función de la velocidad de giro del rotor.

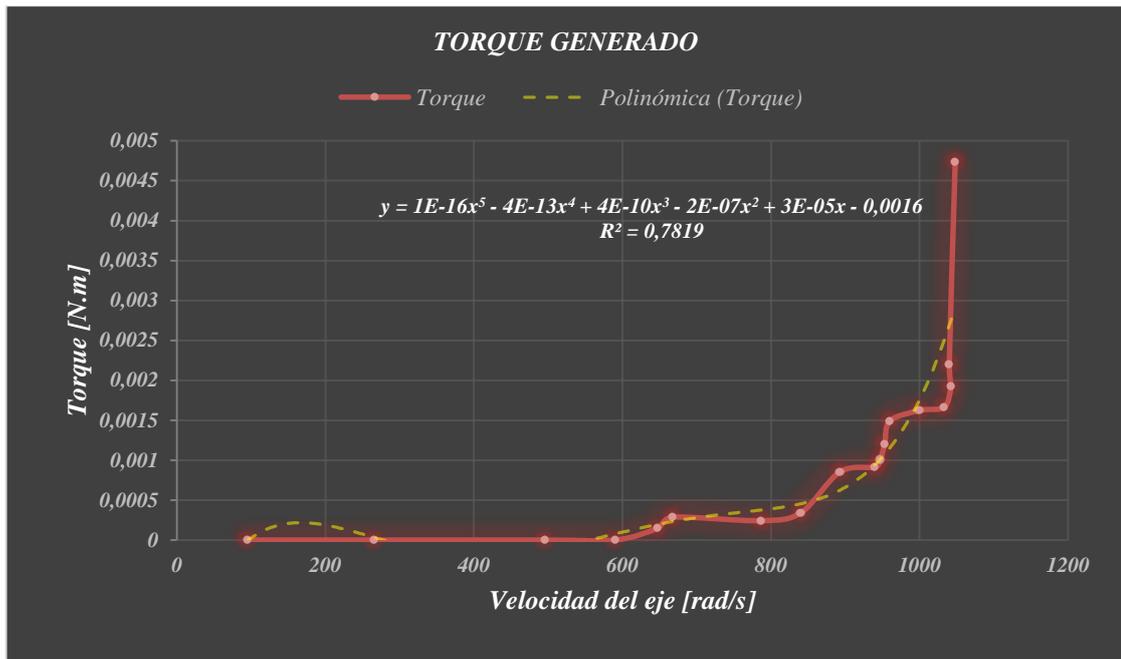


Gráfico 2-4: Torque generado – Estación Atillo

Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar en el gráfico que el torque aumenta a la par con la velocidad de giro del rotor eólico, permitiendo de esta manera aumentar la capacidad de generación eléctrica, como se muestra en el gráfico 3-4.

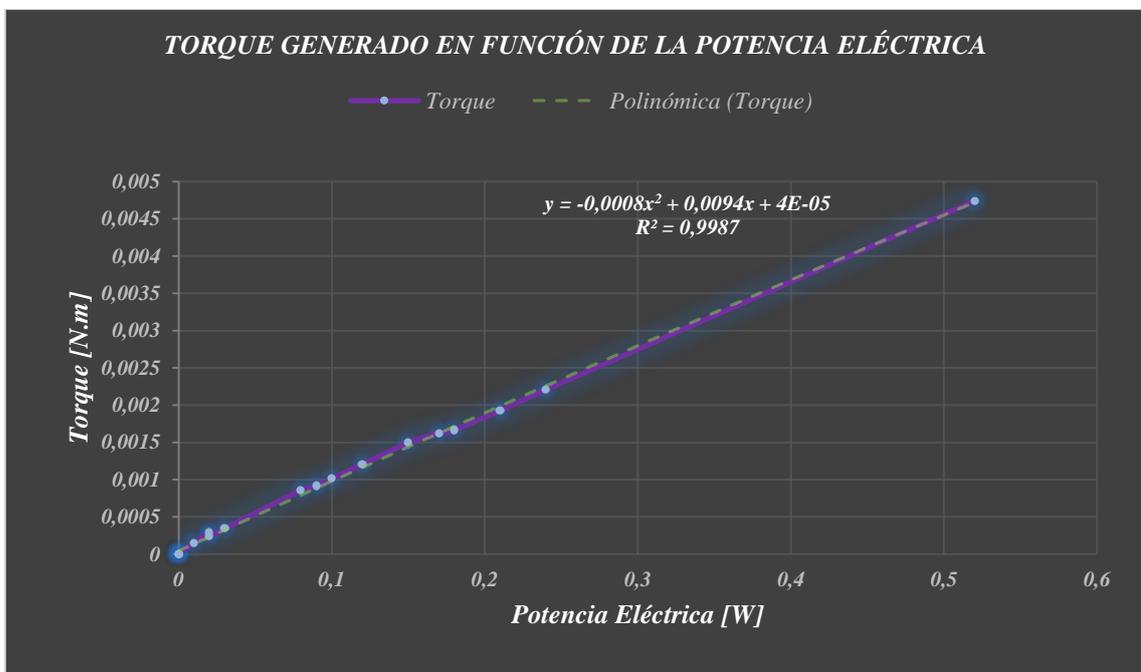


Gráfico 3-4: Torque generado en función de la potencia eléctrica – Estación Atillo

Fuente: Elaboración Propia

4.1.2 Evaluación de la capacidad de generación de energía eléctrica en Urbina

En la tabla 8 se puede observar los valores máximos y mínimos de la capacidad de generación eléctrica, velocidad del viento y velocidad de giro del rotor, estos resultados se obtuvieron al someter el modelo de rotor eólico a velocidades del viento promedios en la estación de Urbina.

Tabla 2-4: Potencia eléctrica y velocidad del viento - Estación Urbina

Potencia [W]	Velocidad del viento [m/s]
0	2,97
0	3,49
0	4,33
0	4,42
0	4,54
0,01	4,6
0,02	4,71
0,03	4,78
0,05	4,87
0,06	4,97
0,08	5,09
0,12	5,23
0,1	5,37
0,14	5,52
0,17	5,68
0,18	5,83
0,19	5,97
0,22	6,1
0,23	6,21
0,43	6,29
0,46	6,35
0,54	6,38
0,6	6,39
0,73	6,4
0,75	6,44
0,8	6,83
0,85	6,99
1,08	7,02
1,24	7,38
1,26	7,73
1,24	7,85
1,25	7,92

Realizado por: Autor, 2018

Fuente: Elaboración Propia

Se observa que la velocidad máxima que alcanza el rotor eólico es de 7.92 [m/s] dicha velocidad nos proporciona una generación eléctrica máxima de 1.25 [W].

Al procesar dichos datos se observa en el gráfico 4-4, la variación de la capacidad de generación de energía eléctrica en función de la velocidad del viento según los valores obtenidos durante la experimentación.

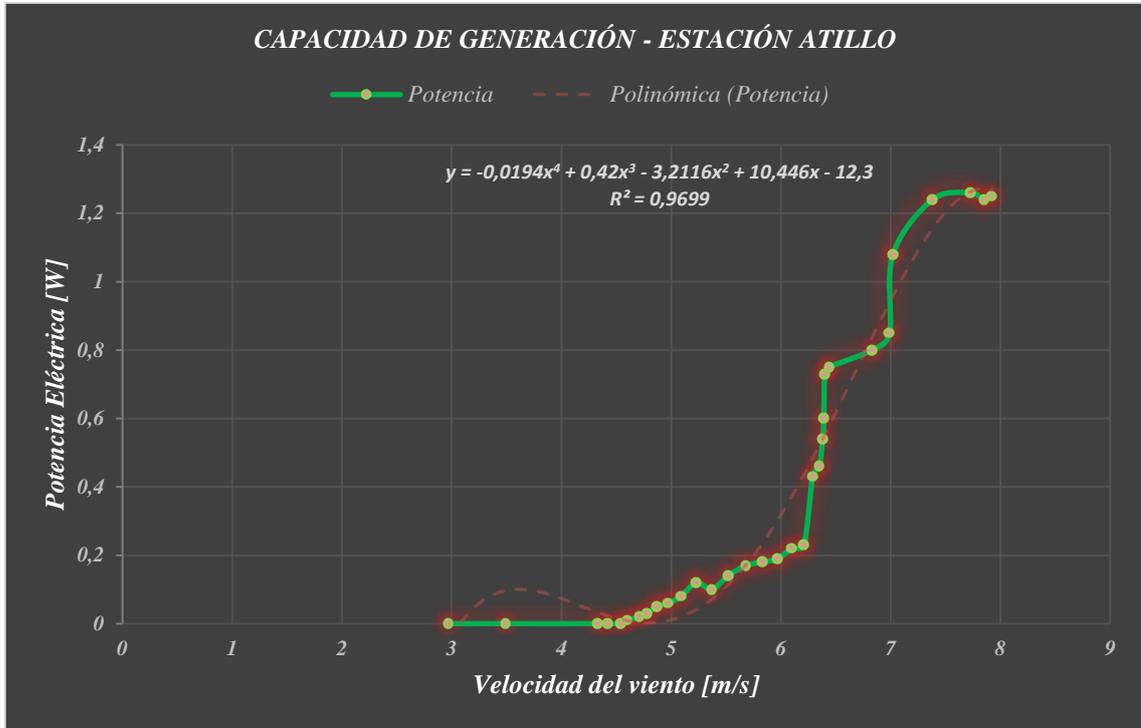


Gráfico 4-4: Capacidad de generación – Estación Urbina

Fuente: Elaboración Propia

El gráfico nos indica que la generación eléctrica empieza a producirse a una velocidad del viento igual a 4.6 [m/s] y alcanza un nivel máximo de generación a los 7.38 [m/s]. Este valor máximo de generación eléctrica lo reemplazamos en la ecuación 41, obteniendo como resultado la capacidad de generación de energía eléctrica del prototipo de 1.4 [W], que viene a ser similar a la obtenida mediante la experimentación.

Po otra parte el gráfico 2-4 nos muestra el torque generado en función de la velocidad de giro del rotor.

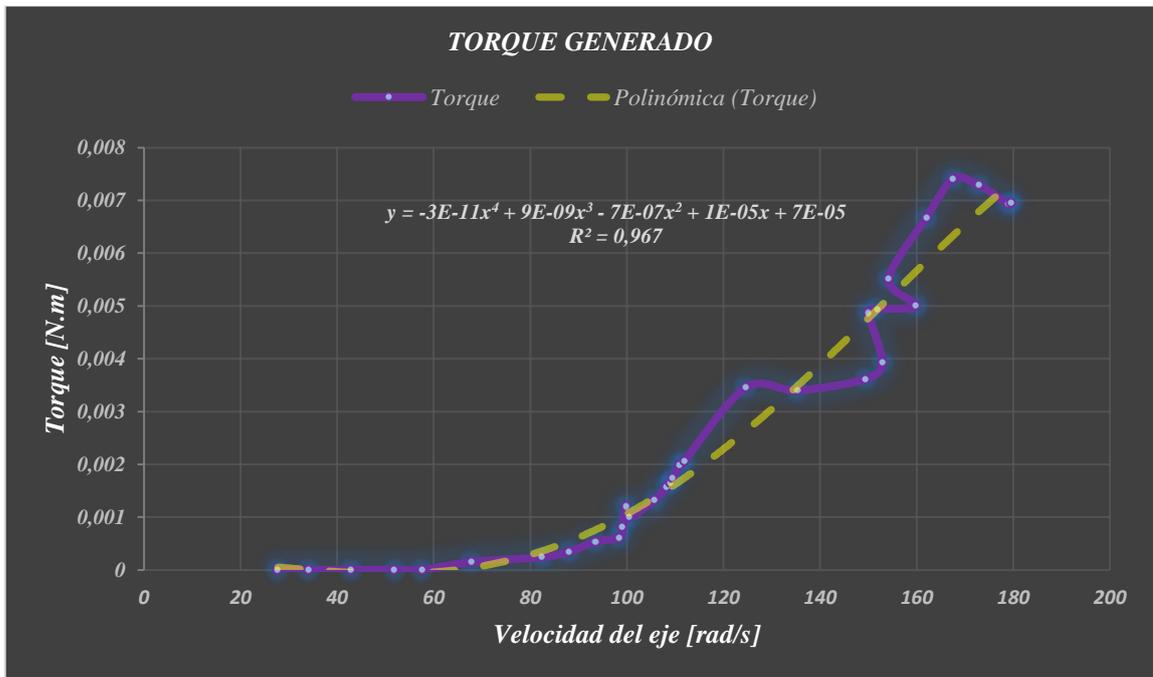


Gráfico 5-4: Torque generado – Estación Urbina

Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar en el gráfico que el torque aumenta a la par con la velocidad de giro del rotor eólico, permitiendo de esta manera aumentar la capacidad de generación eléctrica, como se muestra en el gráfico 6-4.

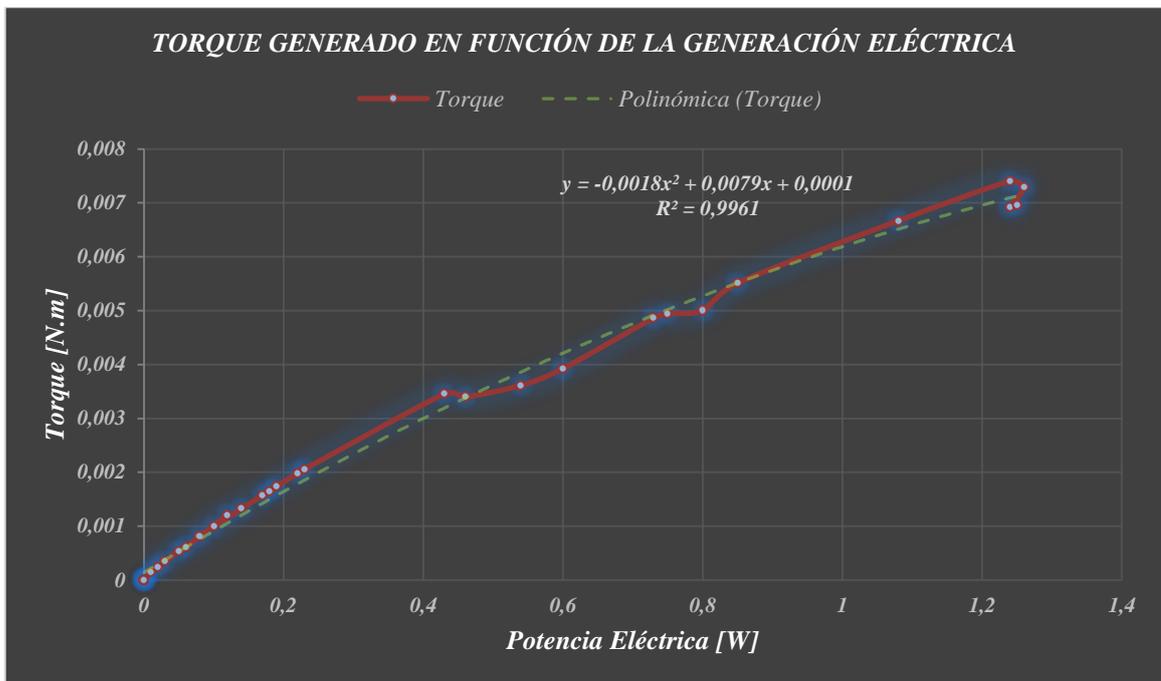


Gráfico 6-4: Torque generado en función de la potencia eléctrica – Estación Urbina

Fuente: Elaboración Propia

4.1.3 Comparación de resultados entre Atillo y Urbina

Los siguientes gráficos muestran una comparación de los resultados de la capacidad de generación eléctrica de los dos puntos viables para la implementación de un parque eólico.

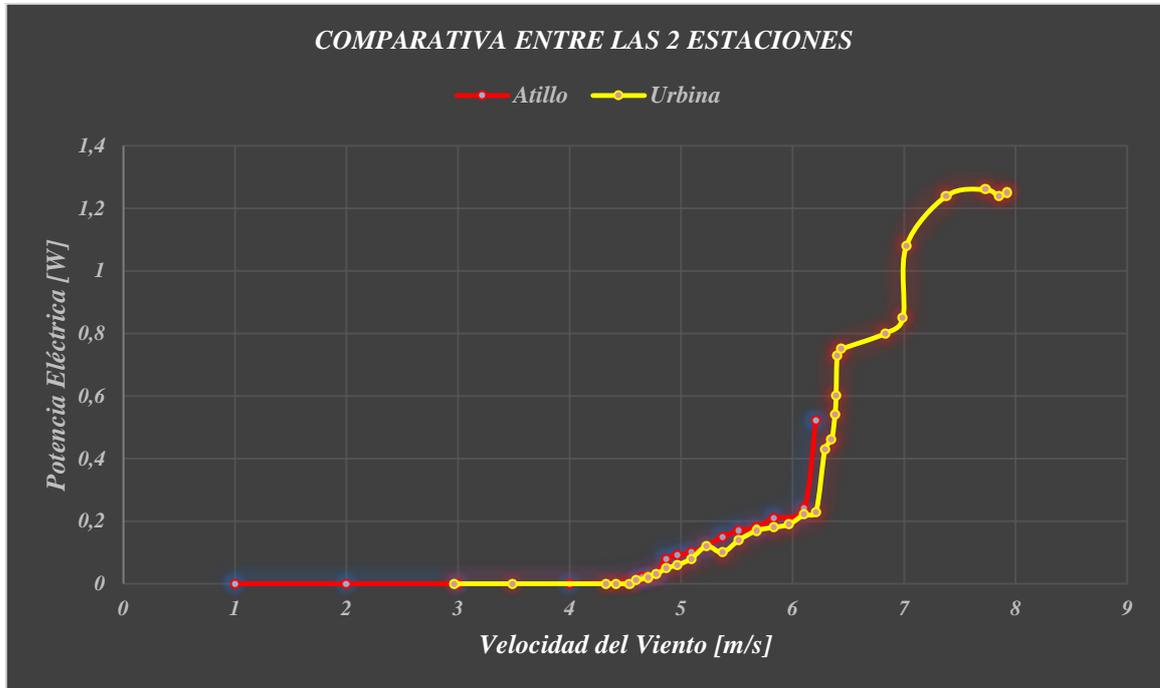


Gráfico 7-4: Comparación de curvas de potencia eléctrica entre las 2 estaciones

Fuente: Elaboración Propia

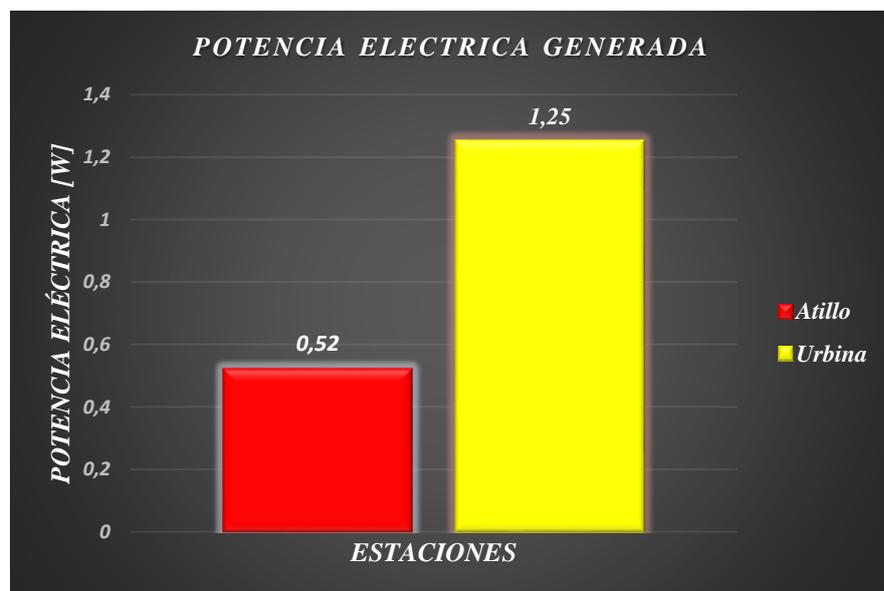


Gráfico 8-4: Capacidad de generación de las 2 estaciones

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Mediante el estudio bibliográfico se determinó los mejores métodos y técnicas para realizar experimentaciones entre modelos y prototipos.

El factor de escalamiento geométrico resulto ser un parámetro muy importante para la experimentación, ya que por medio de esta se pudo obtener la geometría final del modelo de rotor eólico.

Las velocidades del viento con cual se realizaron las experimentaciones de las dos estaciones a evaluar se las determino por medio de la ley de semejanza cinemática en la cual intervino de manera directa el número de Reynolds.

Empleando el teorema de π de Vaschy-Buckingham se determinó los números adimensional que dominan el fenómeno y por medio de estos se llegó a la ecuación final que nos permitió determinar la capacidad de generación eléctrica del prototipo.

El factor de similitud dinámica se logró determinar al igualar las fuerzas de arrastre entre el modelo y prototipo, en esta fuerza intervino de manera directa el coeficiente de arrastre el cual si se mantiene constante entre el modelo y el prototipo se dice que se tiene una similitud completa.

Para la generación de los perfiles aerodinámicos se empleó en software QBlade el mismo que nos permitió obtener las gráficas de los perfiles naca 4415, 4418, 4421, así como también los valores de los coeficientes de arrastre de los mismos, los cuales están en función del número de Reynolds.

La generación del modelo de rotor eólico se lo realizo en el software Solidworks permitiéndonos observar sus partes y un funcionamiento previo, ya que este software tiene un entorno de visualización 3D.

Para la construcción del modelo de rotor eólico se empleó el proceso de impresión 3D, empleando como material principal el ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno) con un acabado superficial

pulido, dicho acabado permitió que las líneas de flujo no generen contracorrientes que podrían alterar los resultados finales.

Se implementó al túnel de viento sensores de velocidad del viento, medidor de rpm, sensores de voltaje, controlador de velocidad del ventilador, así como también una tarjeta de adquisición de datos logrando de esta manera obtener y adquirir resultados con mayor precisión y confiabilidad.

Después de haberse realizados las pruebas necesarias y mediante un procesamiento de datos adecuado se determinó que la estación de Urbina es la más idónea para la implementación de un parque eólico ya que nos brindara una capacidad de generación eléctrica de 1.25 [W] y al llevarlo al prototipo de aerogenerador marca SENVION modelo MM82 nos da una generación aproximada de 1500 – 1750 [KW].

5.2 Recomendaciones

De acuerdo a los resultados obtenidos se recomienda socializar dichos resultados con las autoridades competentes y buscar implementar el parque eólico en Urbina, ya que el mismo contribuirá al cambio de la matriz energética del Ecuador, el sector turístico, así como también a reducir la contaminación ambiental.

Para obtener resultados con un nivel de precisión más alto se recomienda realizar modificaciones en la geometría del túnel de viento, así como también en su sistema de distribución del viento.

Se recomienda continuar con la investigación de diferentes puntos que podrían proporcionar un potencial eólico aprovechable y mediante la generación de distintos modelos de rotor eólico determinar si es viable o no la implementación de parques eólicos.

Se sugiere también ampliar el campo de investigación entre modelos y prototipos no solo respecto a la energía eólica sino también en otros campos como la turbomaquinaria y diseño mecánico, logrando de esta manera obtener información de su comportamiento al estar expuesto a distintas condiciones.

BIBLIOGRAFÍA

ACADEMIA EUROPEA DE CIENCIAS Y ARTES. *Presente y futuro de las diversas tecnologías.* [En línea] 2005. [Consulta: 11 de Junio de 2017.] Disponible en: http://www.academia-europea.org/pdf/energia_presente_y_futuro_de_las_diversas_tecnologias.pdf.

ACADEMIC. *Perfil alar.* [En línea] 2010. [Consulta: 2 de Julio de 2017.] Disponible en: <http://www.esacademic.com/dic.nsf/eswiki/922761>.

AFICIONADOS A LA MECÁNICA. *Sensores en el automovil.* [En línea] 2014. [Consulta: 7 de Julio de 2018.] Disponible en: <http://www.aficionadosalamecanica.net/sensores.htm>.

AIRFOIL TOOLS. *Airfoil Tools.* [En línea] 31 de Mayo de 2018. [Consulta: 31 de Mayo de 2018.] Disponible en: <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>.

ANTA ÁLVAREZ, Jose. *Análisis dimensional y semejanza. Desarrollo de modelos a escala.* [En línea] (tesis) (Maestría) Universidad de Coruña Enero de 2008. [Consulta: 6 de Julio de 2018.] Disponible en: ftp://ceres.udc.es/Master_en_Ingenieria_d_el_Agua/master%20antiguo_antes%20del%202012/Primer_Curso/Tecnicas_Experimentales_en_Hidraulica/Hidrometria/Temas/Tema_3.pdf.

ARDUINO. *Arduino uno.* [En línea] 2017. [Consulta: 7 de Julio de 2018.] Disponible en: <http://www.arduino.org/products/boards/arduino-uno>.

ASOCIACIÓN EMPRESARIAL EÓLICA. *La eólica en el mundo.* [En línea] 2017. [Consulta: 11 de Junio de 2017.] Disponible en: <https://www.aeolica.org/es/sobre-la-eolica/la-eolica-en-el-mundo/>.

BUSTAMANTE SÁNCHEZ, Sergio. *Modelación y simulación aerodinámica del rotor de aerogenerador de 1.5 MW caracterizado en las zonas de implantación de energía eólica de Cantabria.* [En línea] (tesis) (Ingeniería) Universidad de Cantabria Septiembre de 2014. [Consulta: 6 de Junio de 2018.] Disponible en: <http://hdl.handle.net/10902/5345>.

CELEC EP. GENSUR. [En línea] Corporación Eléctrica del Ecuador, 2013. [Consulta: 14 de Junio de 2018.] Disponible en: <https://www.celec.gob.ec/gensur/index.php/84-central-eolica-villonaco-la-de-mayor-produccion-por-turbina-en-el-mundo>.

CONTRERAS, Víctor. *Perfiles Aerodinámicos.* [En línea] (tesis) (Diseñador Industrial) Pontificia Universidad Católica de Valparaíso Enero de 2011. [Consulta: 3 de Julio de 2017.] Disponible en: http://wiki.ead.pucv.cl/index.php/V%C3%ADctor_Contreras:_T%C3%ADtulo_I.

DE BATTISTA, Hernán. *Control de la calidad de potencia en sistemas de conversión de energía eólica.* [En línea] (tesis) (Ingeniería) Universidad Nacional de La Plata Septiembre de 2000. [Consulta: 3 de Julio de 2017.] Disponible en: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/1355/Documento_completo.pdf?sequence=29.

DE CASTRO, Miguel Suau. *Diseño y construcción de una mini-turbina eólica.* [En línea] (tesis) (Ingeniería) Universidad Politécnica de Madrid Enero de 2014. [Consulta: 6 de Junio de 2018.] Disponible en: http://oa.upm.es/36428/1/PFG_Miguel_Suau_Castro.pdf.

DIAGNOSYS. 2017. *National instruments labview.* [En línea] 2017. [Consulta: 7 de Julio de 2018.] Disponible en: <http://www.diagnosys.com/es/products/test-programming-tools/ni-labview>.

EKIDOM. *Historia de la energía eólica.* [En línea] Ekidom S.L., 2010. [Consulta: 19 de Junio de 2018.] Disponible en: <http://www.ekidom.com/historia-de-la-energia-eolica>.

ESPINOZA ROMÁN, Héctor. *Elaboración de un modelo CFD de un generador eólico y validación experimental.* [En línea] (tesis) (Ingeniería) Escuela Superior Politécnica del Litoral Abril de 2008. [Consulta: 18 de Junio de 2018.] Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Hector_Espinoza2/publication/46246990_Elaboracion_de_un_modelo_CFD_de_un_generador_eolico_y_Validacion_Experimental/links/00b49528e12917e334000000/Elaboracion-de-un-modelo-CFD-de-un-generador-eolico-y-Val.

FERNÁNDEZ DÍEZ , Pedro. *Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética.* [En línea] Universidad de Cantabria de 2000. [Consulta: 28 de Junio de 2017.] Disponible en: http://data.torre-solar.es/thesis/2000_Pedro_Fernandez_Diez-energia_eolica-135p.pdf.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. *Global wind statistics 2016.* [En línea] 2017. [Consulta: 11 de Junio de 2017.] Disponible en: http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2016_EN_WEB.pdf.

GOBIERNO DE LA REPÚBLICA DEL ECUADOR. *Atlas eólico del Ecuador.* [En línea] Junio de 2016. [Consulta: 15 de Mayo de 2018.] disponible en: <https://www.energia.gob.ec/ministerio-de-electricidad-y-energia-renovable-presento-el-primer-atlas-eolico-del-ecuador/>.

GONZÁLEZ-LONGATT, Francisco. *Perfiles aerodinámicos empleados en turbinas de viento.* [En línea] (Investigación) Enero de 2007. [Consulta: 2 de Julio de 2017.] Disponible en: <http://fglongatt.org/OLD/Reportes/RPT2007-01.pdf>.

GRATEROL, Anibal y MAYORAL, Gerald. *Diseño de un aerogenerador de eje horizontal de 1 KW de potencia.* [En línea] (tesis) (Ingeniería) Universidad Simón Bolívar Diciembre de 2006. [Consulta: 21 de Junio de 2017.] Disponible en: <http://159.90.80.5/tesis/000132124.pdf>.

GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. *Análisis y diseño de experimentos.* Mexico : McGraw-Hill, 2008.

HUEBLA SOCAG, Hugo. *Estudio de factibilidad para generación eólica en el sector de Totorillas-Provincia de Chimborazo.* [En línea] (tesis) (Ingeniería) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Noviembre de 2013. [Consulta: 15 de Mayo de 2018.] Disponible en: http://dspace.espace.edu.ec/bitstream/123456789/2890/1/108T00_53.pdf.

INER. *Plan Nacional del Buen Vivir.* Quito : Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables, 2015.

INFOBAE. *Los países con mayor producción de energía eólica.* [En línea] 12 de Marzo de 2016. [Consulta: 11 de Junio de 2017.] Disponible en: <http://www.infobae.com/2016/03/13/1796528-los-paises-mayor-produccion-energia-eolica/>.

IPCC. *Fuentes de energías renovables y mitigación del cambio climático. Informe especial sobre fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático.* [En línea] 2011. [Consulta: 11 de Junio de 2017.] Disponible en: https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/srren_report_es.pdf.

LÓPEZ, Roberto. Blogrobertolopez. *Energía eólica, ventajas y desventajas*. [En línea] 6 de Abril de 2016. [Consulta: 18 de Junio de 2017.] Disponible en: <http://blogeducativorobertolopez.blogspot.com/2016/04/energia-eolica-ventajas-y-desventajas.html>.

MICSE. *Resumen balance energético 2016*. Quito : Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2016.

NÚÑEZ SILVA, Jorge y RAMIREZ VALAREZO, Alonso. *Estudio de viabilidad técnica de parques eólicos en la provincia de Chimborazo*. [En línea] (tesis) (Ingeniería) Escuela Superior Politécnica de CHimborazo Mayo de 2017. [Consulta: 18 de Junio de 2017.] Disponible en: http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/6722/1/15T006_61.pdf.

OLLAGUE ARMIJOS, Hans y CRESPO AZANZA, Hugo. *Estudio y evaluación de los parámetros de operación del proyecto eólico Villonaco de la provincia de Loja-Ecuador*. [En línea] (tesis) (Ingeniería) Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca Febrero de 2014. [Consulta: 11 de Junio de 2017.] Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/6284/1/UPS-CT002841.pdf>.

OPEX ENERGY. *Eólica. Aerogenerador tipo monopala orientado a barlovento*. [En línea] 2013. [Consulta: 18 de Junio de 2017.] Disponible en: http://opex-energy.com/eolica/tipos_aerogeneradores.html.

PROYECTO EÓLICO SAN CRISTÓBAL. *Elecgalapagos*. [En línea] Marzo de 2013. [Consulta: 14 de Junio de 2018.] disponible en: <https://www.iner.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/05/11-Luis-Vintimilla-EOLICSA1.pdf>.

RAMIRO LEO, José Gabriel. *Principios de energía eólica, Aerogeneradores*. [En línea] (Investigación) Pontificia Universidad Católica de Argentina Julio de 2014. [Consulta: 18 de Junio de 2017.] Disponible en: http://www2.uca.es/grup-invest/instrument_electro/Ramiro/docencia_archivos/ConceptoEolico.pdf.

Ramón. Wikispaces. *Energía Eólica*. [En línea] 6 de Octubre de 2014. [Consulta: 10 de Junio de 2017.] Disponible en: <http://fuentesdeenergia-velez.wikispaces.com/Energ%C3%A1+Da+E%C3%B3lica>.

REpower. *SENVION wind energy solutions.* [En línea] 24 de Marzo de 2011. [Consulta: 20 de Marzo de 2018.] Disponible en: <http://planning.allerdale.gov.uk/portal/servlets/AttachmentShowServlet?ImageName=248346.PD-2.5-WT.WT.01-B-C-EN>.

RUA. *Sistemas de adquisición y procesamiento de datos.* [En línea] Universidad de Alicante de 2008. [Consulta: 7 de Julio de 2018.] Disponible en: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/19119/1/Sistemas%20de%20adquisici%C3%B3n%20y%20Procesamiento%20de%20datos.pdf>.

SALAZAR VILLANUEVA, Iván. *Análisis dinámico de las palas (Ehecamani) de un aerogenerador en un tunel de viento.* [En línea] 28 de (tesis) (Ingeniería) Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Octubre de 2010. [Consulta: 18 de Junio de 2017.] Disponible en: <http://kimerius.com/app/download/5785826531/Analisis+din%C3%A1mico+de+laspalas+%28ehcamani%29+de+un+aerogenerador+en+un+tunel+de+viento.pdf>.

SARMIENTO RIVERA, Juan y VALAREZO BORRERO, José. *Influencia de la operación del parque eólico Villonaco en la calidad de energía eléctrica de la empresa eléctrica regional del sur S.A.* [En línea] Escuela Superior Politécnica Salesiana sede Cuenca Octubre de 2014. [Consulta: 14 de Junio de 2018.] Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7101/1/UPS-CT003874.pdf>.

SCHUPBACH, Daniel, y otros. *Desarrollo de un rotor eólico experimental a escala y su ensayo en un túnel de viento.* Buenos Aires : CONICET.

SLIDESHARE. *Sistemas de generación distribuido.* [En línea] 19 de Marzo de 2016. [Consulta: 3 de Julio de 2017.] Disponible en: <https://pt.slideshare.net/fglongatt/capitulo-26-sistemas-elicos-sistemas-de-generacion-distribuida?nomobile=true>.

TAMBURRINO, Aldo. *Teoría de modelos.* [En línea] (Investigación) Universidad de Chile Febrero de 2013. [Consulta: 6 de Julio de 2018.] Disponible en: https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2013/2/CI3101/1/material_docente/bajar?id_material=819379.

UNAM. Universidad Nacional Autónoma de Mexico. *La energía eléctrica en México y el mundo.* [En línea] 2011. [Consulta: 11 de Junio de 2017.] Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/277/4/A4.pdf>.

VILLARRUBIA, Miguel. 2004. *Energía Eólica.* Barcelona : Ceac, 2004.

