



**UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI**

**DIRECCIÓN DE POSGRADOS**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN  
OPCIÓN AL GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER EN  
GESTIÓN DE ENERGÍAS**

**TÍTULO:**

**DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UN AEROGENERADOR DE FLUJO  
TURBULENTO ORIENTADO A UN SUMINISTRO ENERGÉTICO.**

Autor:

SINCHIGUANO Molina, Germánico

Tutor:

PhD. Ing. Vicente Córdova.

LATACUNGA – ECUADOR

Abril - 2017



**UNIVERSIDAD TECNICA DE  
COTOPAXI**  
DIRECCIÓN DE POSGRADO  
Latacunga – Ecuador

---

**APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO**

En calidad de Miembros del Tribunal de Grado aprueban el presente Informe de posgrados de la Universidad Técnica de Cotopaxi; por cuanto, el maestrante: SINCHIGUANO MOLINA GERMÁNICO, con el título de Proyecto de Investigación: DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UN AEROGENERADOR DE FLUJO TURBULENTO ORIENTADO A SUMINISTRO ENERGÉTICO, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Defensa de Proyecto de Investigación.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, abril 07 del 2017.

Para constancia firman:

.....

**PRESIDENTE**

.....

**MIEMBRO**

.....

**MIEMBRO**

.....

**OPONENTE**



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE  
COTOPAXI  
DIRECCIÓN DE POSGRADOS**

**Latacunga – Ecuador**

---

**INFORME DEL AVANCE DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

Latacunga, abril 07 2017

Lic. Msc.

Nelson Chiguano

DIRECTOR DE POSGRADOS U.T.C.

Presente

De mi consideración:

Por medio de la presente, me dirijo a su autoridad, para informar el cumplimiento de la TUTORÍA del PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, correspondiente al desarrollo del Capítulo del Proyecto de Investigación No I del maestrante: Sinchiguano Molina Germánico con el Título: DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UN AEROGENERADOR DE FLUJO TURBULENTO ORIENTADO A UN SUMINISTRO ENERGÉTICO; del Proyecto de Investigación en opción al grado académico de magister en GESTIÓN DE ENERGÍAS.

Particular que informo para los fines pertinentes.

Atentamente,

.....

Ing. Vicente Córdova, Ph.D.

## **RESPONSABILIDAD POR LA AUTORÍA DE LA PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

El proyecto de Investigación de maestría denominado “DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UN AEROGENERADOR DE FLUJO TURBULENTO ORIENTADO A SUMINISTRO ENERGÉTICO”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en las páginas correspondientes, cuya fuente se incorpora en la bibliografía.

Consecuentemente, este trabajo es de mi autoría.

En virtud de la declaración de me responsabilizo del contenido, veracidad, alcance científico del Proyecto de Investigación, en mención.

Latacunga, abril 07 del 2017.

.....  
Ing. Sinchiguano Molina Germánico

C.I.: 0502786056

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios que me dio salud, vida y fortaleza para alcanzar mis metas, a mis padres quienes me han apoyado siempre y a todos quienes colaboraron y aportaron con un granito de arena de manera desinteresadamente para llegar a culminar esta gran etapa. A todos y cada uno de los Masters, ingenieros, tutores y a las personas que con su buena voluntad y conocimientos aportaron de alguna manera para que este proyecto llegue a un feliz término.

## **DEDICATORIA**

Con todo cariño admiración y respeto dedico este trabajo a toda mi familia, de manera especial a mis padres Germánico y Marlene y a mi hermana Edith, quienes con su dedicación, esfuerzo, comprensión y sacrificio hicieron realidad este sueño. A mis abuelitos Luz Ofelia y Julio quienes desde el cielo han extendido su mano y ahora son mi guía, mi fortaleza y mi imagen de superación. A todas aquellas personas que confiaron en mí y estuvieron conmigo en alguna etapa de mi vida formando mi carácter, experiencia y pensamiento.

## INDICE GENERAL

PORTADA.....	i
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO .....	ii
INFORME DEL AVANCE DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN .....	iii
RESPONSABILIDAD POR LA AUTORÍA DE LA PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
DEDICATORIA .....	vi
INDICE GENERAL.....	vii
INDICE DE TABLAS .....	xi
INDICE DE GRÁFICOS .....	xiii
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT .....	xvii
INTRODUCCIÓN .....	1
Situación problemática.....	3
OBJETO DE INVESTIGACIÓN .....	3
Justificación y significación.....	3
Objetivos .....	6
Objetivo General .....	6
Objetivos Específicos.....	6
Hipótesis.....	7
Factibilidad de la investigación.....	7
CAPÍTULO 1 .....	9
MARCO CONTEXTUAL Y TEÓRICO .....	9
1.1 Generalidades de la Energía Renovable.....	9
1.1.1 Introducción .....	9
1.1.2 Desarrollo aplicativo .....	10
1.1.3 Modelo energético sustentable .....	12
1.1.4 Objetivos del nuevo modelo energético .....	13

1.1.5	Ahorro y eficiencia energética .....	15
1.2	Generalidades del Recurso Eólico.....	16
1.2.1	Evaluación del recurso eólico como fuente de energía .....	16
1.2.2	Factores del movimiento horizontal del viento .....	17
1.2.3	La turbulencia y el número de Reynolds.....	20
1.3	Los Aerogeneradores Eólicos.....	21
1.3.1	Introducción .....	21
1.3.2	Clasificación y características de funcionamiento .....	22
1.3.3	Los aerogeneradores de eje vertical .....	24
1.3.4	Componentes estructurales aerogeneradores eje vertical.....	26
1.3.5	Variables libres.....	27
1.4	Fundamentación Legal .....	30
CAPITULO 2 .....		32
MARCO METODOLÓGICO .....		32
2.1	Modalidad de la Investigación .....	32
2.2	Tipo de investigación .....	33
2.3	Metodología investigativa .....	33
2.4	Unidad de Estudio .....	34
2.5	Instrumentación de medida. ....	35
2.5.1.	Parametrización inicial.....	35
2.5.2.	Instrumentación y software de diseño.....	35
2.5.3.	Consideraciones técnicas de medida .....	37
2.6	Operacionalización de Variables.....	39
2.7	Expresiones de cálculo fundamentales para la selección del aerogenerador .....	42
2.8	Procedimientos de la Investigación.....	49
2.9	Procesamiento y Análisis de la información .....	50
2.10	Metodología de Diseño. ....	50
2.10.1.	Requerimientos del sistema.....	51
2.10.2.	Restricciones .....	53
2.10.3.	Objetivos principales del diseño. ....	54

2.11.	Desarrollo conceptual de diseño.....	55
2.11.1.	Alternativas de diseño.....	56
2.11.2.	Soluciones específicas de la estructura.....	64
2.12	Selección de Alternativa de Solución.....	67
CAPITULO 3.....		69
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....		69
3.1	Caracterización del potencial eólico disponible en el Campus CEYPSA, sector Salache, provincia de Cotopaxi .....	69
3.1.1	Parametrización inicial.....	69
3.1.2	Distribución de velocidades.....	71
3.1.3	Distribución de Weibull local.....	76
3.1.4	Rendimiento del Sistema y Potencia Adquirible.....	81
3.1.4.1	Potencia adquirible y eficiencia del aerogenerador.....	81
CAPITULO 4.....		83
PARAMETRIZACIÓN Y DISEÑO.....		83
4.	Definición de los parámetros de diseño de un sistema de aerogeneración orientado al suministro energético para producción agrícola familiar.....	83
4.1.	Necesidades de diseño.....	83
4.2	Características constructivas .....	83
4.3	Análisis de selección de materiales.....	84
4.3.1.	Impresión en 3D.....	84
4.3.2.	Brazos sujetadores de Aluminio.....	85
4.3.2.1	Tubo de aluminio .....	86
4.3.2.2	Base de Acero .....	87
4.4	Modelamiento del perfil aerodinámico para las condiciones del flujo eólico turbulento para condiciones locales.....	87
4.4.1.	Diseño estructural del aerogenerador.....	87
4.4.2.	Especificaciones técnicas del aerogenerador.....	90
4.4.3.	Estudio y simulación de fluidos.....	91

4.5	Pruebas y prototipado del aerogenerador de flujo turbulento en el Campus CEYPSA, sector Salache, Provincia de Cotopaxi.....	100
4.5.1	Construcción del aerogenerador.....	100
4.5.1.1	Construcción y ensamble del perfil NACA 0015 .....	100
4.5.1.2	Ensamble de la NACA.....	101
4.5.1.3	Construcción de los sujetadores.....	102
4.5.1.4	Construcción de la estructura base.....	102
4.5.1.5	Preparación del suelo .....	103
4.5.1.6	Ensamble completo .....	104
4.5.2	Ubicación y estudio de captación eólica final .....	104
4.6	Análisis de factibilidad.....	107
4.6.1	Gastos de diseño y construcción del prototipo.....	107
4.6.2	Gastos de montaje e instalación .....	108
4.6.3	Gastos de personal y de asesoría técnica.....	109
4.6.4	Inversión total.....	110
4.6.5	Evaluación de compatibilidad .....	111
4.7	Conclusiones .....	112
4.8	Recomendaciones.....	113
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	115
	ANEXOS.....	118

## INDICE DE TABLAS

Tabla No. 1.	Ventajas y Desventajas aplicación medidas de carga baterías.....	4
Tabla No. 1.1.	Factores de implicación y cambios positivos energía renovable	10
Tabla No. 1.2.	Estudio comparativo de influencia hacia el desarrollo aplicativo .....	11
Tabla No. 1.3.	Factores de influencia dentro del movimiento horizontal.....	17
Tabla No. 1.4.	Características de funcionamiento de aerogeneradores .....	22
Tabla No. 1.5.	Clasificación y características aerogeneradores de eje vertical ..	24
Tabla No. 1.6.	Sistemas de control aerogeneradores eje vertical.....	28
Tabla No. 2.1.	Especificaciones de instrumentación. ....	36
Tabla No. 2.2.	Influencia del diseño y sensibilidad de medición. ....	38
Tabla No. 2.3	Operacionalización Variable Independiente .....	40
Tabla No. 2.4.	Operacionalización Variable Dependiente.....	41
Tabla No. 2.5.	Pliego de requerimientos del sistema. ....	51
Tabla No. 2.6.	Pliego de restricciones del sistema.....	53
Tabla No. 2.7.	Tabla de requerimiento de ingeniería.....	67
Tabla No. 2.8.	Tabla de selección de alternativas del proyecto planteadas. ....	68
Tabla No. 2.9.	Tabla de selección de alternativas del proyecto planteadas. ....	68
Tabla No. 3.1.	Estudio de incertidumbre de la medición eólica. ....	70
Tabla No. 3.2.	Caracterización inicial de emplazamiento. ....	71
Tabla No. 3.3.	Registro mensual de velocidades. ....	72
Tabla No. 3.4.	Porcentual de ocurrencia de velocidades - mensual.....	76
Tabla No. 3.5.	Validación de mediciones .....	77
Tabla No. 3.6.	Mediciones promedio.....	78
Tabla No. 3.7.	Estudio de incertidumbre de medición de enero – noviembre 2016.....	79
Tabla No. 3.8.	Captación eólica global promedio.....	80
Tabla No. 4.1.	Características del aluminio - brazos de sujeción .....	86
Tabla No. 4.2.	Características de aleación de aluminio - eje vertical .....	86
Tabla No. 4.3.	Propiedades de resistencia aluminio - eje vertical .....	87
Tabla No. 4.4.	Especificaciones técnicas prototipo aerogenerador. ....	90
Tabla No. 4.5.	Estudio de captación eólica final.....	106

Tabla No. 4.6. Estudio de captación eólica final con respecto a la temperatura.....	106
Tabla No. 4.7. Estudio de captación eólica con respecto a la humedad .....	107
Tabla No. 4.8. Gastos de diseño y construcción del prototipo (en USD) .....	108
Tabla No. 4.9. Gastos de montaje e instalación (en USD).....	109
Tabla No. 4.10. Gastos de personal (en USD) .....	110

## INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico No. 1.1. Desarrollo aplicativo de la energía en la generación eléctrica..	11
Gráfico No. 1.2. Rosa de los vientos. ....	17
Gráfico No. 1.3. Concepción flujo laminar y flujo turbulento.....	20
Gráfico No. 1.4. Rotor Savonius.....	26
Gráfico No. 1.5. Modelo de aerogenerador Darrieus.....	27
Gráfico No. 2.1. Diseño específico de elemento de medida. ....	38
Gráfico No. 2.2. Valores de potencia disponible para $v=7$ m/s .....	43
Gráfico No. 2.3. Potencia disponible en función del diámetro de captación.....	44
Gráfico No. 2.4. Esquema de flujo de aire Ley de Betz .....	46
Gráfico No. 2.5. Fuerza de sustentación .....	48
Gráfico No. 2.6. Análisis de fuerzas de sustentación .....	48
Gráfico No. 2.7. Coeficientes de poder en el rotor de aerogeneradores .....	49
Gráfico No. 2.8. Fases de la metodología de diseño.....	50
Gráfico No. 2.9. Coeficientes de sustentación para NACA 0015 ( $Re=0,36*10^6$ y $Re=0,68*10^6$ ). ....	58
Gráfico No. 2.10. Coeficientes de arrastre para NACA 0015 ( $Re=0,36*10^6$ , $Re=0,68*10^6$ y $Re=0,68*10^6$ ). ....	59
Gráfico No. 2.11. Sustentación vs ataque y Sustentación vs arrastre .....	60
Gráfico No. 2.12. Valores experimentales de coeficiente de sustentación y coeficiente de arrastre. NACA 0018.....	61
Gráfico No. 2.13. Sustentación vs ataque y Sustentación vs arrastre .....	62
Gráfico No. 2.14. Valores experimentales de coeficiente de sustentación y coeficiente de arrastre. NACA 0021 .....	63
Gráfico No. 2.15. Estudio comparativo NACA 0015, NACA 0018 y NACA 0021 .....	65
Gráfico No. 2.16. Estudio comparativo NACA 0015, NACA 0018 y NACA 0021 (continuación).....	66
Gráfico No. 3.1 Variabilidad de la captación eólica global año 2015 .....	73
Gráfico No. 3.2 Variabilidad de la captación eólica global año 2016 .....	73
Gráfico No. 3.3 Perfil porcentual de ocurrencia de velocidad por horarios. ....	75
Gráfico No. 4.1. Diseño base de construcción de aerogenerador. ....	83

Gráfico No. 4.2. Impresora 3D con PLA y ABS. ....	84
Gráfico No. 4.3. Perfiles de Aluminio tipo "T". ....	85
Gráfico No. 4.4. Tubo de aluminio. ....	86
Gráfico No. 4.5. Tubo y correa de acero estructural. ....	87
Gráfico No. 4.6. Vista superior diseño estructural del prototipo ....	88
Gráfico No. 4.7. Vista lateral diseño estructural del prototipo ....	89
Gráfico No. 4.8. Vista tridimensional diseño estructural del prototipo ....	89
Gráfico No. 4.9. Vista completa ambiente de simulación de fluido ....	91
Gráfico No. 4.10. Vista superior primer punto crítico ....	92
Gráfico No. 4.11. Simulación vista lateral primer punto crítico ....	92
Gráfico No. 4.12. Vista superior segundo punto crítico ....	93
Gráfico No. 4.13. Simulación vista lateral segundo punto crítico ....	93
Gráfico No. 4.14 Simulación vista superior tercer punto crítico ....	94
Gráfico No. 4.15. Simulación vista lateral tercer punto crítico ....	94
Gráfico No. 4.16 Simulación vista superior cuarto punto crítico ....	95
Gráfico No. 4.17 Simulación vista lateral cuarto punto crítico. ....	95
Gráfico No. 4.18 Simulación vista superior quinto punto crítico ....	96
Gráfico No. 4.19 Simulación vista lateral quinto punto crítico ....	96
Gráfico No. 4.20 Simulación vista lateral sexto punto crítico ....	97
Gráfico No. 4.21 Simulación vista superior sexto punto crítico ....	97
Gráfico No. 4.22 Simulación vista lateral séptimo punto crítico ....	98
Gráfico No. 4.23 Simulación vista superior séptimo punto crítico. ....	98
Gráfico No. 4.24. Viscosidad dinámica del fluido. ....	99
Gráfico No. 4.25. Calor específico del fluido. ....	99
Gráfico No. 4.26. Conductividad térmica del fluido. ....	100
Gráfico No. 4.27. Software e impresión 3D. ....	101
Gráfico No. 4.28. Ensamble perfil NACA 0015. ....	102
Gráfico No. 4.29. Sujetadores NACA 0015. ....	102
Gráfico No. 4.30 Estructura base. ....	103
Gráfico No. 4.31. Preparación del suelo. ....	103
Gráfico No. 4.32. Preparación del suelo. ....	104
Gráfico No. 4.33. Prototipo de aerogenerador de eje vertical. ....	105

**UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI**  
**UNIDAD DE POSGRADOS**

**MAESTRÍA EN GESTIÓN DE ENERGÍAS**

**TÍTULO:**

**“DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UN AEROGENERADOR DE FLUJO  
TURBULENTO ORIENTADO A SUMINISTRO ENERGÉTICO PARA  
PRODUCCIÓN AGRÍCOLA FAMILIAR”**

**Autor: Ing. Germánico Sinchiguano Molina.**

**Tutor: PhD. Vicente Córdova.**

**RESUMEN**

El diseño y prototipado de un aerogenerador de flujo turbulento se desarrolló con la finalidad de construir una fuente de suministro energético sostenible para producción en áreas remotas, basándose principalmente en el análisis de captación de origen eólico por eje vertical (Windspire) a través de una selección de perfiles aerodinámicos NACA entre: NACA 0015, NACA 0018 y NACA 0021, dando prioridad de construcción a estos perfiles debido a la buena captación del potencial, seleccionando el perfil NACA 0015, por presentar la mayor área de contacto con el viento. Este análisis se lo determinó bajo una simulación realizada en el programa SolidWorks (flow Simulation), en donde se destacaron los puntos críticos del aerogenerador ensamblado, cuando este funciona con carga. Obteniendo como resultado una conducta segura por la captación del viento para darle velocidad (1 m/s y 5 m/s) y potencia al aerogenerador, sin importar la turbulencia del flujo eólico. Es importante resaltar finalmente que los valores de velocidad más comunes arrojados durante el período de tiempo están entre: 3,5 m/s y 4,0 m/s, siendo el punto de referencia en consideraciones de medios de producción y estabilidad del diseño. Como resultado de esta revisión final, se presentan los valores de la medición de rpm obtenidos por el aerogenerador que, dentro del periodo establecido entre las 13:00 y las 18:00, se mantiene con velocidades entre 2.2 m/s y 4.9 m/s, habiendo registrado además valores de rafagosidad momentáneos de 6.8 m/s. Cabe

destacar que el estudio que se le dio al flujo eólico en el sitio del emplazamiento (Campus CEYPSA, sector Salache, ciudad de Latacunga provincia de Cotopaxi), es totalmente satisfactorio a nuestro requerimiento, debido a la alta concentración de viento turbulento, especialmente a tempranas horas de la mañana y en el ocaso del día. Beneficiando de sobremanera al funcionamiento del aerogenerador, aprovechando el viento en cualquier dirección y a cualquier hora de la jornada.

**DESCRIPTORES:** Captación eólica, Flujo Turbulento, Suministro energético, Perfil aerodinámico NACA.

**COTOPAXI TECHNICAL UNIVERSITY**  
**POST DEGREES UNIT**

**ENERGY MANAGMENT MAESTRY**

**TITLE:**

**“DESIGN AND PROTOTYPE OF A TURBULENT FLOW WIND  
TURBINE ORIENTATED TOWARS THE ENERGY SUPPLY FOR  
FAMILIAR AGRICULTURAL PRODUCTION”**

**Author: Ing. Germánico Sinchiguano Molina**

**Tuthor: PhD. Vicente Córdoba**

**ABSTRACT**

The design and prototyping of a turbulent flow wind turbine was developed in order to build a source of sustainable energetic supply for production in remote areas based principally on the analysis of uptake of wind origin by vertical axis (Windspire), through a selection of NACA aerodynamic profiles like: NACA 0015, NACA 0018 and NACA 0021, giving construction priority to these profiles due to a good capture of the potential and selecting the profile NACA 0015, to present the greater area of contact with the wind. This analysis was determined under a simulation carried out in the SolidWorks program (flow simulation), where the critical points of the assembled wind turbine were highlighted, when it operates under load, getting as a result, a safe behavior by the wind pickup to give it speed (1 m / s and 5 m / s) and power to the wind turbine, regardless of the turbulence of the wind flow. It is finally important to point out that the most common speed values during the time period are between 3.5 m / s and 4.0 m / s, being the reference point in considerations of means of production and design stability. As a result of this final review, it presents the values of rpm measurements gotten by the wind turbine, which, within the period between 13:00 and 18:00, are maintained at speeds between 2.2 m / s and 4.9 m / s, having also registered momentary gustiness values of 6.8 m / s.

It is also essential to note that the study that was given to the wind flow in the site of the siting (CEYPSA campus, Salache town, Latacunga city of Cotopaxi province), is totally satisfactory to our request, due to the high concentration of turbulent wind, especially to early hours of the morning and in the twilight of the day, benefiting greatly from the operation of the wind turbine and taking advantage of the wind in any direction and at any time.

**DESCRIPTORS:** Airflow Catchment, Turbulent Flow, Energy Supply, NACA Aerodynamic Profiles.

**Aval del Traductor:** .....

**Ing. Germánico Sinchiguano M.**

**0502786056**

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, más allá de las dificultades que se presentan en el medio productivo agrícola, se han venido desarrollando una serie de oportunidades de inclusión de medios de generación energética a partir de la utilización de fuentes renovables no convencionales, como representan la energía solar fotovoltaica, solar térmica, eólica, geotérmica de baja y mediana entalpía, la biomasa entre otros, aprovechando así cada vez más la producción energética proveniente de la misma naturaleza, siendo su mayor potencial su carácter inagotable.

La energía eólica, transformada en energía mecánica, ha sido históricamente aprovechada, pero su uso para la generación de energía eléctrica es más reciente. Las aplicaciones de mayor escala se dan desde mediados de la década del 70 en respuesta a la crisis del petróleo y a los impactos ambientales derivados del uso de combustibles fósiles. Son pocos los países en vías de desarrollo que han creado políticas para la implementación de la energía eólica, a pesar de sufrir graves problemas de demanda de electricidad, especialmente en el sector rural.

Desde una perspectiva local, en el Ecuador la implementación de sistemas de eficiencia energética dentro del campo laboral y productivo de la agricultura se encuentra en un proceso de madurez reciente. Por esta razón, la introducción de un proyecto científico de eficiencia energética pretende establecer una herramienta de aporte potencial e innovación, apoyado en el diseño y prototipado de un aerogenerador de flujo turbulento. Esto se logra mediante la captación efectiva y sustentable de las cualidades específicas del viento y su naturaleza, en el Campus CEYPSA, sector Salache de la ciudad de Latacunga, provincia de Cotopaxi. La finalidad es lograr una independencia energética para los moradores de la zona inicialmente, pudiendo ser aplicada posteriormente en otros sectores del país.

Es evidente que existe un crecimiento acelerado del uso de la generación distribuida. Sin embargo, la falta de recursos en los sectores aledaños de las ciudades y la falta de gestión de las autoridades, ha hecho que la energía eléctrica no llegue a estos sectores. Por tal razón, las personas de estas zonas recurren a energías alternativas, en especial por la necesidad de la introducción de fuentes renovables de energía.

El diagnóstico sectorial presenta debilidades permanentes ya que el consumo energético general de la zona centro del Ecuador ha dependido principalmente de la introducción en masa de tecnología por parte del Gobierno. Por encontrarse nuestro país en una transición hacia el desarrollo social productivo, no puede abarcar todo el marco territorial. De forma paralela, el crecimiento económico de una región requiere una gran demanda de energía, ya que es necesario construir infraestructuras de todo tipo, lo que exige industria pesada, la cual requiere, a su vez, grandes cantidades de materia prima y, claro está, de energía.

Desde otro punto de vista, en caso de disponer de energía eléctrica convencional, algunas poblaciones rurales no pueden pagar el costo de esta energía (costos de conexión y tarifas eléctricas). Estas personas son subempleadas sin sueldo fijo, o hacen una mala utilización de las subvenciones otorgadas por el gobierno (Bono Solidario). Hay que añadir a este factor el hecho que la luz artificial es de pésima calidad en las noches. Utilizando como opción principal las lámparas de pilas, gasolina, o gas y especialmente el consumo de velas, lo que ha sido causa de incendios y quemaduras en los niños, ocasionando indirectamente el deterioro ambiental por los desechos que estos consumibles producen, especialmente las baterías.

Un aspecto adicional de gran aporte a la problemática existente es el desconocimiento de fuentes alternativas de energía que pueden ser utilizadas en estas zonas y su potencial disponible. La falta de promoción de organismos encargados, conlleva a que se intensifique el uso de combustible fósil para satisfacer

necesidades energéticas básicas, de forma especial en la alimentación, creando ambientes nocivos para la salud de sus habitantes.

### **Situación problemática**

La falta de recursos económicos, la ubicación geográfica del asentamiento, la mala distribución de energía convencional, dan como resultado la ausencia de energía eléctrica en los sectores marginales. Estos son factores importantes que influyen directamente en el desarrollo de la comunidad y son el problema primordial a atacar, tomando en cuenta además que en el sector es de terreno árido lo cual hace que las familias del sector dependan mucho de factores climáticos como la lluvia. Todo esto recae en una baja productividad agrícola del patrimonio de esta área y por ende una baja sostenibilidad del núcleo familiar y un recurrente estado de pobreza, evidenciando la falta de energía eléctrica y la falta de tecnología apropiada para aprovechar el beneficio de la energía que en este caso proporciona el viento para que las familias afectadas puedan tener una autonomía energética.

¿Cómo incide la inaccesibilidad a fuentes de energía sostenibles o convencionales, en los lugares remotos o alejados a la ciudad?

### **OBJETO DE INVESTIGACIÓN:**

El sistema de generación de energía eólica para generación de electricidad y su utilización dentro de sistemas familiares agrícolas con tecnología nacional, es el punto de partida para el desarrollo de este proyecto, conjuntamente con la medida física del fenómeno, y como apoyo científico inicial de propagación de esta tecnología en el campo rural provincial y nacional. Se ha seleccionado el emplazamiento correspondiente al Campus CEYPSA, sector Salache, del cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi.

### **Justificación y significación**

El origen del presente proyecto radica en la falta de energía eléctrica en poblaciones rurales pobres del país, que no tengan la ventaja de acceder a la red eléctrica. Se pretende desarrollar infraestructuras con alternativas energéticas para poder abastecer de la energía necesaria para usos mínimos como luz, radio y televisión, a familias en estas poblaciones.

En estas zonas, muchas casas utilizan baterías eléctricas para tener energía eléctrica, y a menudo se cargan en la ciudad más cercana, lo que a la postre resulta costoso en dinero, tiempo y conveniencia. Los pequeños aerogeneradores son una opción mejor para cargar las baterías. El proyecto se desarrollará con el objetivo de crear conocimientos acerca de la caracterización constructiva, mecánica y eléctrica de este tipo de aerogeneradores, para que, en un futuro se pueda continuar el estudio llegando a fabricar un prototipo, que a su vez permita establecer más información y mejoras sobre su comportamiento in situ.

Al ser implementados medios de carga de baterías con la utilización de los aerogeneradores de baja potencia, o por sustentación, se hace referencia a las ventajas y desventajas tal como lo indica (Pérez Ramírez, 2006), expresas en la tabla No.1.

**Tabla No. 1. Ventajas y Desventajas aplicación medidas de carga baterías**

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La cantidad de energía disponible de las baterías puede aumentar, y no se tendrán que comprar nuevas baterías tan frecuentemente: En una buena localización, y cuidando el manejo de la energía y la batería, la cantidad de energía disponible para usarse por un hogar será mayor cuando la batería se cargue gradualmente que cuando se cargue periódicamente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La importancia del régimen de viento: el factor más importante en el éxito o fracaso de cualquier instalación eólica es la fuerza y naturaleza del viento.</li> <li>• Coste inicial: Para poner el generador y las palas en la trayectoria del viento, el aerogenerador necesita ser colocado en el extremo superior de una torre,</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• La energía eólica no causa daños al ambiente: aunque se utiliza energía en la construcción de un aerogenerador, una vez que está funcionando, no consume combustibles fósiles y por tanto no emite gases de efecto invernadero. El ruido producido a las bajas velocidades de giro es muy pequeño, y menor que el producido por generadores diesel. El impacto sonoro y visual del sistema descrito no ha causado preocupación en ninguna de las instalaciones probadas.</li> <li>• La energía eólica es más barata que sus alternativas: Donde el recurso eólico es bueno, la energía producida mediante aerogeneradores es más barata que utilizando generadores diesel o fotovoltaicos, particularmente si el suministro de combustible está lejos del usuario.</li> <li>• En áreas remotas, el coste de la conexión a la red es tan elevado, que excede mucho de los sistemas que utilizan baterías (solares o eólicas).</li> </ul>	<p>que requiere tiempo preparar y levantar. Finalmente, será necesario alojar las baterías y el circuito de control en un edificio a prueba de la intemperie.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Las demandas de potencia no proveerán exactamente el suministro en un momento dado.</li> <li>• El uso de baterías efectivamente soluciona este problema, y permite al usuario captar energía cuando el viento es ligero o no hay, y guardar energía cuando el viento es fuerte. Así mientras la potencia media que entra en la batería sea la misma que la potencia media que sale durante un periodo de unas pocas horas (o tanto tiempo como permita la capacidad de las baterías) en el hogar no debería acabarse la electricidad, incluso si ellos usan más potencia que la media por un rato.</li> <li>• Esto significa que el generador solo necesita, como media, producir el requerimiento de potencia media más que una potencia de pico.</li> </ul>
--	--

Fuente: (Pérez Ramírez, 2006).

Debido a la justificación y significancia explícita dentro de la presente investigación, se pretende proveer el punto de partida hacia la introducción de sistemas constituidos por el diseño y prototipado de un aerogenerador de flujo turbulento orientado al suministro energético para la producción agrícola familiar, principalmente con la finalidad de la reducción de la dependencia de fuentes eléctricas convencionales, para lo cual se analizarán los aspectos técnicos básicos primordiales, se realizará un estudio de campo, y se fomentará un medio de mejoramiento, utilización y aprovechamiento del ente energético aéreo.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

- Determinar el potencial eólico para generación de electricidad mediante un sistema conversor a través del diseño y el prototipado de un aerogenerador de flujo turbulento, orientado a suministro energético.

### **Objetivos Específicos**

- Caracterizar del potencial eólico disponible en el Campus CEYPSA, sector Salache, provincia de Cotopaxi.
- Definir los parámetros de diseño de un sistema de aerogeneración orientado al suministro energético.
- Modelar el perfil aerodinámico ideal para las condiciones de flujo eólico turbulento de acuerdo a las condiciones climáticas locales.
- Prototipar y probar el aerogenerador de flujo turbulento físicamente en el emplazamiento, y mediante un software de simulación.

## **Hipótesis**

La caracterización del potencial eólico del Campus CEYPSA, sector Salache, del Cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi, permitirá el diseño y prototipado de un sistema de aerogeneración de flujo turbulento orientado al suministro energético para producción agrícola familiar.

## **Factibilidad de la investigación**

Para la factibilidad del estudio propuesto, es necesario indicar que la socialización de este tipo de proyectos no es común para los moradores de este sector. La irregularidad del terreno, la lejanía y la logística para llevar energía eléctrica a esta zona, eleva mucho el valor del kWh y por ende una planilla de energía sumamente cara. Teniendo esto como antecedentes, las perspectivas de esta investigación son favorables ya que se apuesta a una energía alterna y limpia logrando una independencia energética, la cual será aprovechada por un núcleo familiar.

Paralelamente, el desarrollo de este tipo de sistemas, su diseño, prototipado se basa en el alto conocimiento científico, técnico y de conformación física obtenido durante el desarrollo del estudio impartido durante la maestría en gestión de energías impartido por la Universidad Técnica de Cotopaxi UTC, con aspectos de formación académica destacables.

Según lo expuesto por (CONELEC, 2014), en Ecuador, un número significativo de personas pertenecientes al sector rural no están conectadas a la red eléctrica nacional de acuerdo al informe Plan Maestro de electrificación 2009-2020. La cobertura eléctrica a nivel nacional es del 91 % y en el sector rural del 85 %, faltando por servir a 235 mil potenciales usuarios.

La factibilidad se ve representada bajo preceptos que indican que, en estas zonas, muchas casas utilizan baterías eléctricas como energía primaria, y a menudo se

cargan en la ciudad más cercana, lo que a la postre resulta costoso en dinero, tiempo y conveniencia. Los pequeños aerogeneradores son una opción mejor para cargar las baterías.

Finalmente, la factibilidad del presente proyecto se encuentra fundamentado en la posibilidad de solución hacia la problemática identificada de la utilización del bien energético eólico hacia procesos de producción de tipología agrícola de mediano alcance, sin producir contaminación al medio ambiente, protegiendo el medio ambiente, y disminuyendo la dependencia de la sociedad rural hacia la utilización de medios energéticos no renovables.

# CAPÍTULO 1

## MARCO CONTEXTUAL Y TEÓRICO

Se hace referencia a la investigación presentada por (Díaz & Zamora, 2012) titulado “Viento, sol y tecnologías sostenibles para la producción de alimentos agrícolas”, donde tal como lo indican la producción de alimentos agrícolas presenta diferentes barreras desde la necesidad de suelos fértiles, déficit de cantidad de agua, condiciones climáticas adecuadas, rudeza de las condiciones laborales, secado de los productos para su conservación hasta la posibilidad de la fuerza de trabajo disponible. En esta investigación presentada por (Díaz & Zamora, 2012), se parte de propuestas de tecnologías conocidas internacionalmente, como torre solar eólica, el secado solar y el cultivo en invernadero, las dos primeras no tan bien conocidas como el cultivo intensivo y controlado usado tanto en países cálidos como en templados, dichas tecnologías unidas a la existencia de chimeneas abandonadas de los centrales azucareros cubanos y fuerza de trabajo disponible alrededor de la antigua industria, permiten la posibilidad de una segura y estable producción agrícola, incluido el secado de sus productos.

La aplicación de sistemas de energía renovable no convencional, se indica como antecedente principal la investigación realizada por (Fernández, 2013) denominada “Instalación Eólico-Fotovoltaica para suministro eléctrico a un sistema de riego por goteo para uso agrícola” cuya finalidad fue la de poder aplicar medios de energía renovables no convencional, en este caso eólico – solar fotovoltaico, para la implementación en un sistema de riego por goteo, el mismo que es de uso extendido dentro del campo de la producción agrícola.

### **1.1 Generalidades de la Energía Renovable**

#### **1.1.1 Introducción**

Según estudios científicos realizados, el clima de la Tierra se ha mantenido a una temperatura media relativamente estables, situación preferente para la evolución y desarrollo de la existencia a nivel mundial. Sin embargo, tal como lo detalla (SOLVENTA, 2004), en los últimos 50 años, las concentraciones de gases invernadero están creciendo rápidamente como consecuencia de la acción humana. El uso generalizado de los combustibles fósiles, el

debilitamiento de la capa de ozono y la destrucción de las masas forestales están favoreciendo el aumento de la temperatura de la Tierra, provocando cambios drásticos en el clima mundial y haciéndolo cada vez más impredecible, agrega (SOLVENTA, 2004).

Cabe recalcar que, la concienciación generalizada a nivel global ha sido provocada en gran medida a una serie de factores, los mismos que después de la aplicación de medidas correctivas de esta tipología, producen una serie de cambios positivos para el medio productivo energético, tal como se expone en la tabla No. 1.1.

**Tabla No. 1.1. Factores de implicación y cambios positivos energía renovable**

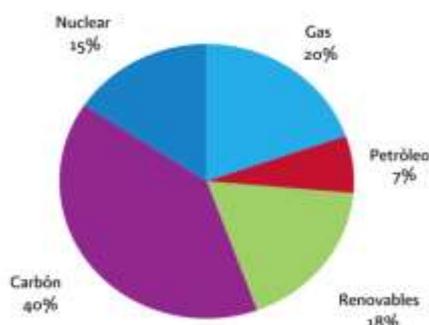
FACTORES DE IMPLICACIÓN	CAMBIOS POSITIVOS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La gran dependencia energética del exterior de los países industrializados.</li> <li>• El agotamiento y encarecimiento de los recursos energéticos fósiles.</li> <li>• Los recientes descubrimientos sobre el origen antropogénico (causado por el hombre) del cambio climático.</li> <li>• Planes político – sociales de introducción de medios energéticos renovables.</li> <li>• Desarrollo de marcos institucionales y de soporte legal a su aplicación.</li> <li>• Aportación económica y abaratamiento de la tecnología.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se reduciría la dependencia energética externa.</li> <li>• Mejoraría la imagen productiva nacional y global energética.</li> <li>• Se favorecería el desarrollo de la industrias local y se generaría empleo.</li> <li>• Se fomentaría la aplicación de medidas de I+D+i.</li> <li>• Aumentan la cantidad y oferta de energía.</li> <li>• Garantizan la sustentabilidad y renovación de los recursos.</li> <li>• Reducen las emisiones atmosféricas de contaminación.</li> <li>• Económicamente viables ya abundantes.</li> </ul>

Fuente: (Schallenberg, et al., 2008), (FINDER, 2011).

### 1.1.2 Desarrollo aplicativo

Haciendo referencia al desarrollo aplicativo administrativo de las energías renovables, dentro de la generalización expuesta por (Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, 2014), las energías renovables a nivel mundial representan el 18%

de la generación eléctrica, (la mayoría de esta participación considera las energías hidráulica y eólica) mientras que, la contribución al suministro térmico de las renovables es de un 24%. La participación de las energías fotovoltaica, solar, eólica y la bioenergía, según la (Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, 2014) ha crecido rápidamente en los últimos años, efecto que se atribuye a las inversiones en investigación y desarrollo que se iniciaron hace más de tres décadas, expuesto dentro del gráfico No. 1.1.



**Gráfico No. 1.1. Desarrollo aplicativo de la energía en la generación eléctrica**

Fuente: (Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, 2014)

La verdadera aplicabilidad de las energías renovables se ve evidenciada a partir del estudio comparativo entre sus beneficios y ventajas, con respecto al modelo propuesto por las energías convencionales, bajo parámetros de diferenciación, ventajas medioambientales, ventajas estratégicas y ventajas socioeconómicas, tal como se desarrolla en la Tabla 1.2.

**Tabla No. 1.2. Estudio comparativo de influencia hacia el desarrollo aplicativo**

FACTOR	ENERGÍAS RENOVABLES	ENERGÍAS CONVENCIONALES
<b>DIFERENCIACIÓN</b>	Son limpias	Contaminan
	Sin residuos	Generan emisiones y residuos
	Inagotables	Son limitadas
	Autóctonas	Dependencia exterior
	Equilibran desajustes interterritoriales	Utilizan tecnología importada
<b>VENTAJAS MEDIOAMBIENTALES</b>	No producen emisiones de CO2 y otros gases contaminantes	Producen CO2 y gases contaminantes fuerte

	No generan residuos de difícil tratamiento	Generan residuos que suponen una amenaza para el medio ambiente
	Son inagotables.	De carácter finito
<b>VENTAJAS ESTRATÉGICAS</b>	Son autóctonas	Existencia en número limitado de países.
	Disminuyen la dependencia exterior.	Importado en alto porcentaje
<b>VENTAJAS SOCIOECONÓMICAS</b>	Crean cinco veces más puestos de trabajo que las convencionales	Crean pocos puestos de trabajo respecto al volumen de negocio
	Contribuyen decisivamente al equilibrio interterritorial	Se sitúan en zonas de alto desarrollo
	Permiten el desarrollo de tecnologías propias	Utilizan en su mayoría tecnología importada

Fuente: (SOLVENTA, 2004)

### 1.1.3 Modelo energético sustentable

Partiendo de la modelación efectiva del desarrollo aplicativo de las energías renovables, además de la evolución errática y los compromisos hacia la protección principal del medio ambiente, el modelo energético sustentable, tal como lo enuncia (Fundación Energías Renovables, 2013), se basa en los siguientes parámetros:

- **Reducción de la dependencia energética por fuentes fósiles.** Es necesario que se tome conciencia de la necesidad y la urgencia en la mejora de los patios de dependencia energética, intensidad energética y emisiones de CO<sub>2</sub>. No reducir la dependencia de los combustibles fósiles, acorde a (Fundación Energías Renovables, 2013), va a dificultar y a retrasar el crecimiento económico y abocará a futuras crisis por sus elevados precios, por las crisis de suministro y por su impacto directo en la deuda.
- **Oportunidades para el cambio de modelo de crecimiento.** Es imprescindible aprovechar la gran oportunidad que se deriva del cambio de modelo de crecimiento económico y de estrategia energética, donde el potencial de desarrollo tecnológico,

de eficiencia, de competitividad, de desarrollo de nuestras exportaciones, de desarrollo regional, de creación de empleo y de impulso a una nueva base industrial para la economía es gigantesco. De la misma manera hay que considerar, tal como lo enuncia la (Fundación Energías Renovables, 2013) como una inmensa oportunidad, la transición de un modelo energético vertical y centralizado a otro basado en la generación distribuida, más democrática y accesible a todos los ciudadanos.

- **Cambio de cultura de la energía.** La transición hacia un modelo económico y una estrategia energética sostenibles necesita un cambio en la cultura del uso de la energía desde la actual de mayor consumo posible a otra de ahorro y cero emisiones. La (Fundación Energías Renovables, 2013) pone especial énfasis en que la racionalización en el uso de la energía exige otra educación y forma de pensar y entender el consumo energético.
- **Establecimiento energético urbano y rural.** La potencialidad específica basado bajo los parámetros del ahorro energéticos y el consumo de energías de tipo renovables, en la actualidad es muy amplio, concentrándose por sobre todos los factores en la mayoría de los habitantes, ya que es de conocimiento común en el Ecuador, según lo indican el último censo de población (INEC, 2010), el 60% de la población vive en solamente un 12% del territorio nacional.

#### **1.1.4 Objetivos del nuevo modelo energético**

La energía renovable a nivel global ha sufrido una serie de cambios de objetivos, mientras la matriz energética de producción mantiene una serie de transformaciones que han ocasionado que las metas inicialmente planteada, mantengan un giro estructural definido, con prospección posterior al 2020. Es así que, tal como expone (Studer, 2014), los objetivos del nuevo modelo energético que todo proyecto de inclusión teórica – técnica referente a la introducción de modelos de energía renovable, independiente del área de afección del mismo, están desarrollados a continuación en colaboración con el Instituto Global para la Sostenibilidad, expuesto en el Foro de Energías Renovables para la Competitividad:

1. “Evitar crear una dependencia respecto de un solo combustible, como es el gas, para la generación de electricidad y que no se realicen inversiones de infraestructura a tal punto que se pongan candados estructurales para el desarrollo de opciones futuras que garanticen una efectiva diversificación de las fuentes energéticas para la producción de electricidad.” (Studer, 2014) (p.4).
2. “Contar con una estructura de gobernanza que sea “neutral” y representativa de todos los intereses del sector y que no esté supeditada a decisiones políticas del gobierno en turno, para lo cual deberá hacer transparente toda la información necesaria para tomar sus decisiones.” (Studer, 2014) (p.4).
3. “Proponer la planeación necesaria para construir un sector eléctrico moderno y competitivo, que cuente con una red eléctrica nacional interconectada e inteligente, capaz de almacenar energía, con líneas de distribución en todo el territorio nacional y que permita el respaldo de las energías renovables y el aprovechamiento de las fuentes energéticas locales para abastecer la demanda.” (Studer, 2014) (p.4)
4. “Nivelar el terreno del juego, removiendo los subsidios a las energías fósiles que siguen siendo considerables, y dar a conocer los resultados de la metodología para calcular las externalidades asociadas a la generación de electricidad.” (Studer, 2014) (p.5).
5. “Desarrollar una evaluación de sostenibilidad de los proyectos de energía renovables que incluya de manera integral los impactos sociales, ambientales y económicos sobre las comunidades próximas a los proyectos.” (Studer, 2014) (p.5.)
6. “Impulsar las inversiones en las energías renovables como un motor de innovación, transferencia tecnológica y de crecimiento verde. Además de que los gobiernos locales destinen más recursos al Fondo de Sustentabilidad (en tanto que hoy dos terceras partes del gasto en ciencia y tecnología se concentra en hidrocarburos), sobre todo que genere las condiciones, a través de

mecanismos de mercado, para la participación del sector privado y el surgimiento de asociaciones público-privadas para la investigación y el desarrollo que propicien el uso de energías renovables por parte de empresas, grandes, pequeñas y medianas, para la expansión de los mercados locales y de exportación.”. (Studer, 2014) (p.5).

Si bien es cierto, la implicación de objetivos y cumplimiento de ellos depende en gran medida del marco regulatorio bajo el cual se desarrolla, dentro de un objetivo global definido por la necesidad de electrificación y extensión de la demanda energética, se establecen los siguientes propósitos:

- **Ahorro global de energía.** Alcanzar un ahorro, sobre la demanda expuesta con anterioridad, con carácter vinculante y gracias a la introducción de metodologías de producción y prácticas de desarrollo energético eficientes con marcas establecidas del 30% para el 2020, 40% para el 2030, 45% para el 2040 y 50% para el 2050.
- **Reducción de la intensidad energética (manteniendo la misma estructura económica).** Con propuestas de reducción del 25% del bien energético general para el 2020 y de un 40% final parcial en el 2050.
- **Objetivos sectoriales en la agricultura.** Dentro de la presente área de producción es importante la reducción del 20% de consumos al 2020 y la racionalización operativa y hacia una política agraria conjunta Energía/Agua.

### 1.1.5 Ahorro y eficiencia energética

El ahorro y la eficiencia energética son apartados que se buscan lograr dentro de todos y cada uno de los proyectos técnico teóricos que se pretendan aplicar, por lo que es necesario exponer las ventajas que, acorde a se obtienen de este medio, detalladas de la siguiente manera:

- Además, ahorrar energía tienen otras ventajas adicionales para el medioambiente y la salud humana, porque se disminuye el grado de contaminación del aire, del mar y

de la tierra (respiramos mejor, vivimos en un entorno más limpio y menos contaminado), a la vez que disminuye el riesgo de lluvia ácida, mareas negras y destrucción de bosques y espacios naturales (Schallenberg, et al., 2008).

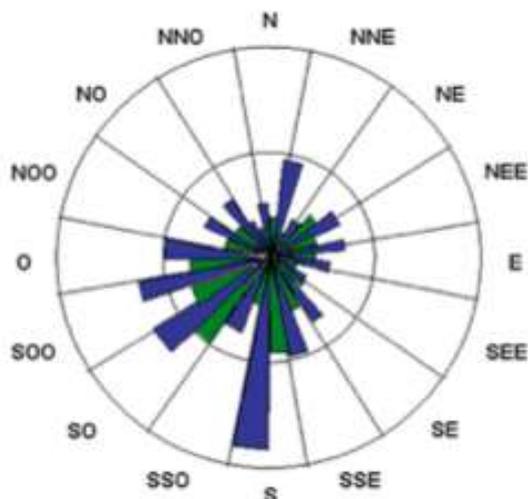
- Las ventajas también son de tipo económicas y nos afectan como consumidores de energía; de esta forma cambiar los hábitos de consumo o sustituir los aparatos eléctricos por otros más eficientes también nos permite ahorrar dinero.

## **1.2 Generalidades del Recurso Eólico**

### **1.2.1 Evaluación del recurso eólico como fuente de energía**

Para evaluar los recursos eólicos de un emplazamiento específico, es indispensable la realización de mediciones de la velocidad y de la dirección del viento dentro de rangos de tiempo aceptables, tomando en cuenta las incertidumbres sobre el elemento de medición. La metodología indicada para la toma de mediciones se realiza de acuerdo a mediciones dentro de rangos de una a dos horas durante varios meses como mínimo seis, para poder controlar la probabilidad del fenómeno eólico.

Una vez realizadas las mediciones del parámetro eólico, acorde a (Agencia Insular de Energía de Tenerife, 2010), dichos resultados se plasman en unos diagramas que permiten conocer la frecuencia y la velocidad media del viento para distintas direcciones: son el diagrama de frecuencia y el de velocidad o rosa de vientos, especificados en el Gráfico No. 1.2. Ambos son complementarios, ya que el primero indica el número de veces que el viento sopla en una dirección determinada, y el segundo da la velocidad media en esa dirección.



**Gráfico No. 1.2. Rosa de los vientos.**

Fuente: (Rudnick Van De Wyngard, 2012)

Otros factores de incidencia dentro del parámetro eólico de participación, a parte de la velocidad y el viento especificados en la rosa de los vientos, son la gradiente de presión, la fuerza de Coriolis y el número de Reynolds para determinación del flujo turbulento.

### 1.2.2 Factores del movimiento horizontal del viento

Como es de conocimiento común, el viento se maneja bajo cuatro factores principales, la fuerza del gradiente de presión, la fuerza de Coriolis, la aceleración centrípeta y la fuerza de rozamiento. A estos principios, (FING, 2012) denota que, tanto la fuerza de Coriolis y la aceleración centrípeta son en rigor ficticios, pero la influencia sobre el efecto natural del aire está presente de forma teórica. De esta forma, los factores del movimiento horizontal anteriormente enunciados, se encuentran desarrollados dentro de la tabla No. 1.3.

**Tabla No. 1.3. Factores de influencia dentro del movimiento horizontal.**

FACTOR	CARACTERÍSTICAS
<b>Fuerza del gradiente de presión</b>	<p>Es la componente horizontal de la fuerza de presión. La componente vertical de dicha fuerza se equilibra con la del espacio, que puede ser debida a causas mecánicas o térmicas, las mismas que controlan los movimientos horizontales de las masas de aire. Se encuentra representada matemáticamente mediante:</p> $Fg = -\frac{1dp}{\rho dn} \quad \text{[Ec. 1.1]}$ <p>donde,</p>

	$\rho =$ densidad del aire y $\frac{Mp}{Mn} =$ gradiente horizontal de presión
<b>Fuerza de Coriolis</b>	<p>La fuerza de Coriolis es una consecuencia del hecho de que el movimiento de las masas de aire sobre la superficie de la tierra está generalmente referido a un sistema de coordenadas móvil (por ejemplo la red de meridiano y paralelos que gira con la tierra). Dentro de ella se aclara que los vientos fluyen de la zona de altas presiones a las de bajas presiones y son desviados siempre por efecto de la rotación terrestre. La fuerza de Coriolis o desviadora (por unidad de masa) se expresa como:</p> $Fc = 2\omega.V.\text{sen}(\text{latitud}) \quad [\text{Ec. 1.2}]$ <p>donde,</p> <p><math>\omega =</math> velocidad angular y <math>V =</math> velocidad radial.</p>
<b>Aceleración Centrípeta</b>	<p>Todos los cuerpos que se mueven siguiendo una trayectoria curva se ven sometidos a una aceleración dirigida hacia su centro de rotación. Esta aceleración (<math>c</math>) matemáticamente se expresa como:</p> $c = -m\frac{V^2}{r} \quad [\text{Ec. 1.3}]$ <p>donde,</p> <p><math>m =</math> masa de aire, <math>V =</math> velocidad masa de aire y <math>r =</math> radio de curvatura.</p>
<b>Fuerza de Rozamiento</b>	<p>Es aquella que, debido a la cercanía del viento sobre la superficie terrestre, ejerce un importante efecto sobre su movimiento. Profundizando en el estudio del viento geostrófico encontramos que en las proximidades de la superficie (por debajo de unos 500 metros en los terrenos llanos) el rozamiento hace que disminuya la velocidad del viento por debajo del valor geostrófico. Como consecuencia el viento sigue una trayectoria en espiral análoga a la desviación que experimentan las corrientes oceánicas al disminuir el efecto de rozamiento con el viento cuando aumenta la profundidad.</p>

Fuente: (FING, 2012)

A los factores de determinación del flujo horizontal anteriormente expuestos, (Escudero, 2008) agrega una serie de condiciones que favorecen la conformación de brisas de viento para la captación del bien eólico, así como la determinación de su concepción y comportamiento tanto en el día como en la tarde, detallados a continuación:

- **Un gradiente térmico de aproximadamente 4 o 5 °C.** Aunque, en general, tal como lo detalla (Escudero, 2008), basta que la temperatura del aire terrestre sea superior en al menos 1°C a la del aire marino se dan las circunstancias que posibilitan las brisas diurnas; por debajo de este valor difícilmente se establecen.
- **Cielos despejados o la nubosidad débil.** La no presencia de nubes favorece el proceso natural de calentamiento de la Tierra durante la presencia del sol, y facilitan en gran medida la pérdida de este calor en procesos nocturnos, razón por la cual cuando los cielos son nubosos este proceso de carga y descarga de energía se mantiene de forma desfavorable para la metodología de captación eólica.
- **Inestabilidad térmica vertical.** Tal como lo explica (Escudero, 2008), cuanto más gradiente térmico vertical existe, más facilidad tendrá el aire caliente para ascender y generar una mayor depresión, por lo tanto, más brisa habrá. Si en las capas altas de la atmósfera hay aire cálido, por más gradiente de temperatura que exista entre la tierra y la atmósfera, no habrá brisa.
- **Ausencia de vientos sinópticos generales.** Si existen gradiente de presión general más fuertes provenientes de depresiones térmicas o polares, las condiciones de viento marcadas por estos prevalecerán sobre las brisas térmicas; aunque como lo especifica (Escudero, 2008), los dos gradientes béricos – el general y el local generador de la brisa se sumarán alterando la dirección e intensidad del viento sinóptico dominante o a la inversa.
- **Planicie sin orografía alta.** Los obstáculos de grandes dimensiones montañosas con una gran altitud representan un freno considerable dentro de la conformación y circulación de brisas en el emplazamiento, caso contrario ocurre con las brisas dentro de valles, ya que esta configuración favorece la estructuración de las mismas.
- **Terreno con alto coeficiente de absorción de calor.** La superficie de terreno con menor cantidad de vegetación y ocupación circundante tiene un coeficiente de absorción del calor mucho mayor que aquellos terrenos donde la presencia de

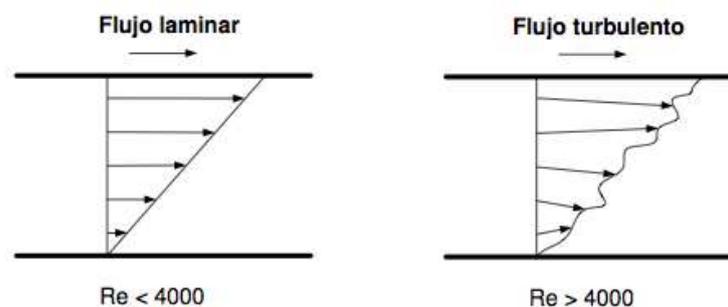
vegetación es mucho más representativa. Bajo este precepto, las masas boscosas representan un debilitamiento efectivo de las brisas de aire conformadas. Por el contrario, tal como concluye (Escudero, 2008), el cemento, piedra, metales y asfalto de las masas urbanas tienen un altísimo coeficiente de absorción del calor lo que incrementa las brisas.

### 1.2.3 La turbulencia y el número de Reynolds

Se llama turbulencia al estado de un flujo que se caracteriza por su naturaleza fluctuante y aparentemente aleatoria, donde tal como lo especifica (Zenit, 2013), la turbulencia es el resultado de la pérdida de estabilidad de un flujo laminar. (Zenit, 2013) define específicamente que:

“Los flujos laminares están caracterizados por el hecho de que las partículas de fluido se mueven en capas o láminas. Las partículas que están en cierta lámina, permanecen en ella. No pueden cambiar de capa.” (p.146).

Dentro de la conformación del flujo turbulento, es necesario aclarar que la dirección de dicho flujo cuando se encuentra dentro del grupo laminar se mantiene de forma estable y regular, mientras que cuando son de tipo turbulento la dirección del flujo es irregular, tal como se indica en el gráfico No. 1.3.



**Gráfico No. 1.3. Concepción flujo laminar y flujo turbulento.**

Fuente: (Zenit, 2013)

El concepto de número de Reynolds se origina por reportes iniciales realizados por **Osborne Reynolds** en 1883. (Canut, Guerra, Guzmán, & Struck, 2008) detallan que, Reynolds observó que el tipo de flujo adquirido por un líquido que fluye dentro de una

tubería depende de la velocidad del líquido, el diámetro de la tubería y de algunas propiedades físicas del fluido.

### **1.3 Los Aerogeneradores Eólicos**

#### **1.3.1 Introducción**

Dentro del mecanismo de transformación y captación de energía más generalizados se encuentran los aerogeneradores eólicos. La (Asea Brown Boveri, 2012) explican que, un aerogenerador o turbina eólica transforma la energía cinética del viento en energía eléctrica sin usar combustible, pasando por el estadio intermedio de conversión a energía mecánica de rotación a través de las palas.

Los aerogeneradores pueden ser de sustentación o de resistencia, diferenciada debido al tipo de fuerza generada por el viento que está siendo utilizada en el momento productivo. A diferencia de la metodología aplicada por tecnologías primitivas representadas por los molinos, los aerogeneradores tienen la particularidad de utilizar pocas palas para lograr una mayor eficiencia de transformación de la energía primaria en el viento.

Desde el punto de vista de la potencia obtenida mediante aerogeneración, las instalaciones eólicas se clasifican inicialmente de la siguiente manera:

- Microeólicas para potencias inferiores a 20kW y por instalaciones destinadas principalmente al suministro doméstico.
- Minieólicas para la obtención de potencias entre 25 y 210 kW destinadas a la producción y venta primaria de electricidad.
- Eólicas de alta potencia, para desarrollos superiores a 210 kW y producidas principalmente por parques eólicos para la generación de energía para la red general eléctrica nacional.

### 1.3.2 Clasificación y características de funcionamiento

En congruencia con el tipo de instalaciones eólicas que se pretende aplicar dentro del diseño final del sistema, existen una serie de características de funcionamiento de los aerogeneradores, las mismas que dependen de su naturaleza de captación con respecto al medio circundante, a parámetros de construcción y a la tipología de aerogeneradores que se va a utilizar, tal como se desglosa en la tabla No. 1.4

**Tabla No. 1.4. Características de funcionamiento de aerogeneradores**

<b>FACTOR</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
<b>Velocidad de arranque</b>	El rotor empieza a girar y el mecanismo de transformación genera una tensión de funcionamiento, que aumenta con la velocidad del viento.
<b>Velocidad de acoplamiento (2 – 4 m/s)</b>	Cuando la tensión es lo suficientemente elevada para la aplicación específica a la que es direccionado el sistema, es en ese entonces cuando se produce la energía requerida para su transformación y se activa todo el circuito.
<b>Velocidad nominal</b>	Es la velocidad a la cual se genera la potencia nominal, la misma que en la mayoría de casos está indicada entre 10 – 14 m/s.
<b>Velocidad de desconexión (20 – 25 m/s)</b>	Es la velocidad del viento por encima de la cual el rotor debe detenerse para evitar daños en la máquina; el sistema de control interviene mediante dispositivos adecuados, activos o pasivos.
<b>Resistencia y durabilidad a aspectos externos</b>	Un aerogenerador debe poder soportar durante toda su vida útil la peor tormenta que pueda darse en el emplazamiento donde está instalado, es decir si el aerogenerador va a utilizarse durante una vida útil de 20 años, se considerará como ráfaga máxima la que se repite de media cada 50 años, basado en estudios meteorológicos.
<b>Soporte a la temperatura</b>	El diseño del aerogenerador también deberá prever su funcionamiento a temperaturas ambientales que van desde -10°C a +40°C en condiciones normales y de -20°C a +50°C en condiciones ambientales extremas.

	(IEC EN 61400-1) <sup>1</sup> , donde las temperaturas son especificadas de acuerdo a análisis específico del emplazamiento
<b>Diseño estructural</b>	<p>Las principales opciones de diseño y construcción de un aerogenerador incluyen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El número de palas (de forma habitual dos o tres).</li> <li>• La posición del rotor (barlovento o sotavento).</li> <li>• Material de construcción, método y normativa de construcción y tipo de perfil de las palas.</li> <li>• Diseño del buje (rígido, basculante o abisagrado).</li> <li>• Control de la potencia mecánica mediante control aerodinámico (control de la condición de pérdida aerodinámica) o mediante palas de ángulo de ataque variable (control del ángulo de paso).</li> <li>• Rotor de velocidad fija o variable.</li> <li>• Orientación libre o mediante control activo.</li> <li>• Mecanismo de transformación de la energía.</li> </ul>

Fuente: (Asea Brown Boveri, 2012)

Tomando en cuenta las características y la aplicabilidad de los aerogeneradores dentro de la industria, así como la tecnología de construcción, los aerogeneradores pueden dividirse en dos grandes familias:

- Aerogeneradores de eje vertical (VAWT por sus siglas en inglés).
- Aerogeneradores de eje horizontal (HAWT por sus siglas en inglés).

A su vez, los aerogeneradores de eje vertical, cuya aplicación en la actualidad es minoritaria con un 5% de aceptación dentro de la industria, se subdividen en:

- Aerogeneradores de tipo Savonius;
- Aerogeneradores de tipo Darrieus;
- Aerogeneradores híbridos Darrieus – Savonius.

<sup>1</sup> La norma IEC EN 61400-1 define además otra clase de aerogeneradores, de tipo S, que deberán adoptarse cuando el diseño o el ingeniero de análisis de emplazamientos consideren condiciones especiales, sea del viento u otras condiciones externas, o cuando se requiera una seguridad especial.

Por otro lado, los aerogeneradores de eje horizontal, cuya utilización y comprensión de la tecnología es de mayor extensión y maduración técnica teórica, se subdividen en:

- Aerogeneradores a Barlovento (upwind).
- Aerogeneradores a Sotavento (downwind).

Para efectos de análisis de la información teórica bibliográfica del presente estudio, se centrará el direccionamiento de la investigación hacia la comprensión de los aerogeneradores de eje vertical (VAWT), cuya aplicación es la adecuada para cumplir los objetivos propuestos, tanto metodológicos como de diseño.

### 1.3.3 Los aerogeneradores de eje vertical

Según (Antezana, 2004), estos aerogeneradores tienen la ventaja de adaptarse a cualquier dirección de viento y por ello se les llama **penémonos** (todos los vientos). No requieren de dispositivos de dirección, ya que la captación del viento bajo esta metodología no involucra diferencias bajo este aspecto, además que la base de su funcionamiento proviene de la diferencia de coeficiente de arrastre entre las dos mitades de la sección opuesta al viento.

Como se indicó anteriormente, los aerogeneradores de eje vertical se subdividen en del tipo Savonius, Darrieus y una conjunción híbrida Darrieus – Savonius, cuyas características se detallan en la tabla No. 1.5.

**Tabla No. 1.5. Clasificación y características aerogeneradores de eje vertical**

TIPO	CARACTERÍSTICAS
<p><b>Aerogenerador del tipo Savonius</b></p> 	<p>Es el modelo más simple de aerogenerador y consta de dos (o cuatro) chapas verticales, sin perfil de ala y curvadas en forma de semicilindro. También se denomina "aerogenerador de resistencia" ya que el par motor sobre el eje está generado por la diferencia de resistencia (fricción) que las superficies verticales dispuestas simétricamente respecto al eje ofrecen al viento. Sus principales características son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aerogenerador “lento”; de poca eficiencia.</li> </ul>

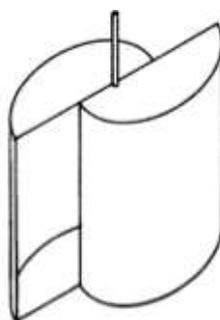
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilizable con vientos de poca intensidad y en un rango limitado;</li> <li>• Necesidad de un control de velocidad adecuado para mantener la eficiencia dentro de unos valores aceptables;</li> <li>• Imposibilidad de reducir la superficie aerodinámica en caso de velocidad superior a la nominal debido a sus palas fijas;</li> <li>• Necesidad de un dispositivo mecánico para el paro del aerogenerador;</li> <li>• Necesidad de una estructura robusta que resista los vientos extremos (debido a la elevada superficie expuesta de las palas);</li> </ul>
<p><b>Aerogenerador del tipo Darrieus</b></p> 	<p>Son aerogeneradores de eje vertical también llamados de “sustentación” ya que las superficies expuestas al viento presentan un perfil de ala capaz de generar una distribución de la presión a lo largo de la pala y, por tanto, un par en el eje de rotación. Con respecto a los aerogeneradores Savonius, esta tipología proporciona una mayor eficiencia al tener menos pérdidas por fricción. El único inconveniente que presentan son su incapacidad para iniciar el movimiento de forma independiente, por lo que se necesita un dispositivo auxiliar que cumpla esta función. Sus principales características son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aerogenerador "rápido"; con eficiencia menor que los aerogeneradores de eje horizontal, debido también a que una gran parte de la superficie de las palas gira en las proximidades del eje a poca velocidad;</li> <li>• Adaptación a los cambios de dirección del viento; eficiente para vientos con una notable componente vertical de la velocidad (emplazamientos con pen- dientes o instalaciones en el tejado de edificios, "efecto esquina");</li> <li>• Utilizable con vientos de poca intensidad y en un rango limitado; con necesidad de un control de velocidad adecuado para mantener la eficiencia dentro de unos valores aceptables.</li> <li>• Necesidad de un dispositivo mecánico para el paro del aerogenerador; y de una estructura no especialmente robusta</li> </ul>

	para resistir los vientos extremos (debido a la poca superficie de las palas expuesta al viento en comparación con el aerogenerador Savonius).
<p><b>Aerogenerador híbrido Darrieus – Savonius</b></p> 	En el aerogenerador híbrido Darrieus – Savonius, el par de arranque lo aporta el aerogenerador coaxial Savonius situado en el interior del aerogenerador Darrieus, con lo que se logra de forma parcial mantener las ventajas de ambos diseños dentro de un solo sistema de captación eólica.

Fuente: (Asea Brown Boveri, 2012)

### 1.3.4 Componentes estructurales aerogeneradores eje vertical

Iniciando por la conformación estructural de aerogenerador de eje vertical más simple se procede a la denominación del modelo de rotor tipo Savonius. Tal como lo señala (Antezana, 2004), el rotor Savonius consiste en cilindro hueco partido por la mitad, en el cual sus dos mitades han sido desplazadas para convertirlas en una S (Gráfico No. 1.4); las partes cóncavas de la S captan el viento, mientras que los reversos presentan una menor resistencia al viento, por lo que girarán en el sentido que menos resistencia ofrezcan. Este sistema tiene el inconveniente de presentar una sobre presión en el interior de las zonas cóncavas al no poder salir el aire, perjudicando el rendimiento; el sistema queda mejorado separando ambas palas y dejando un hueco entre ambas para que se exista un flujo de aire.



**Gráfico No. 1.4. Rotor Savonius**

Fuente: (Antezana, 2004)

Acotando la información sobre el otro diseño patentado para este tipo de aerogeneradores de eje vertical, haciendo referencia a lo explicado por (Antezana, 2004), el rotor Darrieus consta de unas finas palas con forma de ala de avión asimétricas, las mismas que se encuentran unidas al eje solo por los dos extremos, con una curva especial diseñada para un máximo rendimiento entre las dos uniones del eje, su diseño se verifica en el Gráfico No. 1.5.



**Gráfico No. 1.5. Modelo de aerogenerador Darrieus**

Fuente: (Antezana, 2004)

### **1.3.5 Variables libres**

Estructuralmente el aerogenerador no necesita sistema de orientación, lo que representa una ventaja ya que permite su instalación en cualquier terreno sin la necesidad de elaboración de enormes torres, siendo un ahorro económico considerable. Los alerones y su diseño son más simples y económicos.

De forma estructural, a diferencia de los aerogeneradores de eje horizontal, por las características del viento, los aerogeneradores de eje vertical deben constar de sistemas de control de velocidad, sistemas de control aerodinámico, sistemas de control mecánico y si fuera el caso, sistemas de control eléctrico, tal como se especifica en la tabla No. 1.6

**Tabla No. 1.6. Sistemas de control aerogeneradores eje vertical**

SISTEMA	CARACTERÍSTICAS
<b>Sistema de control de velocidad</b>	<p>Para lograr velocidad constante en el eje del generador se utilizan diversas soluciones que van desde la intervención mecánica en la relación de amplificación de RPM (caja de cambio) hasta la alteración del comportamiento aerodinámico del aerogenerador frente al viento (variación del ángulo de ataque de las aspas y diseño de pérdida aerodinámica de las aspas).</p> <p>Los más modernos aerogeneradores tienen sistemas de control mixtos que involucran la variación del ángulo de ataque de las aspas y adicionalmente sistemas de control sobre los parámetros eléctricos del generador. La idea es que los métodos utilizados para controlar los aerogeneradores, tiendan a aumentar al máximo la eficiencia y sobre todo que logren un control total y efectivo de la operación del aerogenerador y su seguridad.</p>
<b>Sistemas de control aerodinámico</b>	<p>El primer sistema de control aerodinámico utilizado es el que se aplicó en el Gedser y se denominó de "pérdida aerodinámica". Esencialmente se diseña el aspa de tal manera que al girar a una velocidad demasiado elevada se genera una discontinuidad en su aerodinámica que provoca una inmediata pérdida de velocidad debido a la turbulencia creada. En su momento fue un método bastante innovador y confiable ya que su funcionamiento radicaba en la forma de sus aspas y era independiente del operador.</p>
<b>Sistemas de control mecánico</b>	<p>El más usual de estos sistemas consiste en la clásica caja de cambio mecánica (gear box). Esta tiene la tarea de amplificar las revoluciones del rotor del aerogenerador para obtener las revoluciones necesarias en el eje del generador y así producir electricidad. Esta caja puede ser compleja y tener la posibilidad de cambiar la relación de amplificación con lo cual se logra operar en distintas condiciones de viento. De todas maneras esta manipulación logra cambios discretos por lo que normalmente tiene que trabajar en conjunto a otro sistema de regulación.</p>
<b>Sistemas de control eléctrico</b>	<p>Las más notorias y variadas mejoras en la regulación de velocidad están ciertamente en la operación de las máquinas encargadas de la generación eléctrica. Para aquellos generadores que otorgan su energía a una red continua se podrá contar con el control de la corriente de campo (si se trata de alternadores de rotor bobinado y con rectificación).</p>

Fuente: (Antezana, 2004)

Uno de los aspectos fundamentales a tomar en cuenta dentro de los requerimientos del diseño son aquellos que involucran a las cualidades físicas y de resistencia estructurales de los materiales. A continuación, se especifican una serie de materiales típicos y de mayor eficiencia utilizados para la construcción de los captadores de recursos eólicos en configuraciones de eje vertical tipo Savonius:

- **Aleaciones de acero y de aluminio.** Materiales que tienen problemas de peso y de fatiga del metal, respectivamente, pero de uso prolongado y extendido dentro de diseño muy pequeños.
- **Fibra de vidrio reforzada con resina poliéster.** Utilizado en la mayoría de palas y captadores modernos en diseño de mediana y gran envergadura.
- **Fibra de vidrio reforzada con resina epoxy (“GRP”).** En forma de láminas pre compresas impregnadas por metodologías de última tecnología. Las principales ventajas a obtener son una mayor ligereza, mayor flexibilidad, menor deformación ante exposición a muy bajas temperaturas, y una alta resistencia a la absorción del agua.
- **Fibra de carbono o arámidas (Kevlar 29 o Kevlar 49).** Este material se obtiene por procesamiento mediante disposición de planchas por tiras de material que después de su producción obtiene unas excelentes propiedades mecánicas. Así mismo se genera una alta resistencia específica, palas muy ligeras, pero en la actualidad por la tecnología recién introducida es de costo muy elevado.
- **Configuración mixta de vidrio y fibra de carbono.** Esta configuración mantiene la propiedad eficiente del vidrio con la resistencia de la fibra de carbono en el aspecto mecánico.
- **Materiales compuestos (composites).** De madera, madera – epoxy, o de madera – fibra – epoxy, siendo de aún inmaduro ingreso en la elaboración de palas y captadores, representa el futuro a seguir dentro de los próximos años.

- **PLA – ABS.** Polímeros especiales y biodegradables ideal para piezas mecánicas, soportan temperaturas de 230-260°C, se pueden utilizar para mecanizar, pulir, lijar, limar, agujerear, pintar, pegar etc. con extrema facilidad, y el acabado sigue siendo bueno. Además, es extremadamente resistente y posee un poco de flexibilidad. Todo esto hace que sea el material perfecto para aplicaciones industriales.

#### **1.4 Fundamentación Legal**

La fundamentación legal del presente proyecto de investigación conjuntamente con la Constitución de la República, el Plan del Buen Vivir 2013 – 2017 y la ley de Desarrollo Agrario, señalan lo siguiente:

#### **CONSTITUCIÓN DE LA REPÚBLICA DEL ECUADOR**

“**Artículo 15.-** El Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto. La soberanía energética no se alcanzará en detrimento de la soberanía alimentaria, ni afectará el derecho al agua.”

“**Artículo 413.-** El Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables, diversificadas, de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho al agua”.

#### **PLAN DEL BUEN VIVIR 2013 - 2017**

“**Objetivo 7.7.-** Promover la eficiencia y una mayor participación de energías renovables sostenibles como medida de prevención de la contaminación ambiental.

- a. Implementar tecnologías, infraestructuras y esquemas tarifarios, para promover el ahorro y la eficiencia energética en los diferentes sectores de la economía.
- b. Promover investigaciones para el uso y la generación de energías alternativas renovables, bajo parámetros de sustentabilidad en su aprovechamiento.

- c. Reducir gradualmente el uso de combustibles fósiles en el transporte y sustituir los vehículos convencionales, fomentando la movilidad sustentable.
- d. Elaborar un inventario de fuentes y demanda de energías renovables y no renovables, así como de sus emisiones, incorporando alternativas tecnológicas.

## **LEY DE DESARROLLO AGRARIO**

**“Art. 3 POLÍTICAS AGRARIAS.** - El fomento, desarrollo y protección del sector agrario se efectuará mediante el establecimiento de las siguientes políticas:

- a. De capacitación integral al indígena, al montubio, al afroecuatoriano y al campesino en general, para que mejore sus conocimientos relativos a la aplicación de los mecanismos de preparación del suelo, de cultivo, cosecha, comercialización, procesamiento y en general, de aprovechamiento de recursos agrícolas;
- h. De estímulo a las inversiones y promoción a la transferencia de recursos financieros destinados al establecimiento y al fortalecimiento de las unidades de producción en todas las áreas de la actividad agraria especificadas en el artículo 1;”

**“Art. 4 CAPACITACIÓN.**- El Ministerio de Agricultura y Ganadería deberá arbitrar las medidas para que en la infraestructura física existente en las áreas rurales del país, y en las del Ministerio de Educación y Culturas, se desarrollen cursos prácticos para indígenas, montubios, afroecuatorianos y campesinos en general, relativos a la preparación del suelo, selección de semillas, cultivo, fumigación, cosecha, preservación o almacenamiento y comercialización de productos e insumos agrícolas, en orden a mejorar sus niveles de rendimiento en cantidad y calidad.”

## CAPITULO 2

### MARCO METODOLÓGICO

#### 2.1 Modalidad de la Investigación

La investigación estructural mantiene su aplicación efectiva hacia el carácter de comprensión técnica, teórica y aplicada del desarrollo del diseño y prototipado de un aerogenerador de flujo turbulento orientado al suministro energético para la producción agrícola familiar, con relevancia adicional e influencia de tipología económica, ecológica, de eficiencia energética, cargas y comportamiento mecánico de los componentes de los que se encuentra constituido, así como la generación determinada para el fin propuesto. De esta forma, y bajo apoyo y sustento de las premisas anteriormente señaladas, las modalidades de la investigación se presentan a continuación:

- **Investigación Bibliográfica.** Se recopiló información acerca de cómo se puede aprovechar el flujo eólico al máximo, y así determinar las variables que pueden influir en el potencial que tiene el sector sur occidental de Latacunga. Además, se desarrolló una hoja de datos cuya función principal será la de proveer de información detallada del comportamiento del viento, sin olvidar los instrumentos que se utilizaron para la recopilación de la información.
- **Análisis de campo.** Esta investigación fue desarrollada en el Campus CEYPSA, sector Salache perteneciente al Cantón Latacunga de la Provincia de Cotopaxi. Este sector es caracterizado por tener elevaciones y depresiones continuas, un terreno irregular y seco, lo que hace que exista un flujo eólico irregular a distintas horas del día en distintos meses del año.
- **Obtención Experimental de información.** Se utilizó un proceso adecuado para determinar el nivel de flujo de aire en la zona sur occidental de la ciudad de Latacunga. Esta información de mucha ayuda en el diseño de un aerogenerador con perfiles de sustentación que aprovechen al máximo el flujo eólico del sector. Este diseño de aerogenerador, debe ser ideal para aprovechar las corrientes de viento por pequeñas que estas sean.

## 2.2 Tipo de investigación

Dentro del tipo de investigación definida, una vez seleccionada las modalidades que se utilizó en cada una de las etapas de su desarrollo, en primera instancia se aplica la búsqueda exhaustiva de información de tipo bibliográfica, artículos y publicaciones científicas, y demás fuentes de información disponibles. Con la base teórica científica se sustentó la Operacionalización de las variables dependiente e independiente, cumplimentando además los conocimientos teóricos con los datos obtenidos por medición y por simulación del sistema en software especializado.

En el presente trabajo el tipo de investigación empleada fue la investigación descriptiva, donde se identificaron las características que determinan la potencia del flujo eólico, y se detalló en la medida del emplazamiento seleccionado una serie de características. Dentro de estas se mencionan: velocidad, temperatura, humedad, potencialidad, y dirección, etc.

## 2.3 Metodología investigativa

La metodología usada para la obtención eficiente de la información, tanto técnica, como de tipo teórica, serán en conjunto una serie de medidas del tipo analítico - sintéticas, las mismas que permiten al investigador partir de un conjunto de partes específicas, que son estudiadas de forma local y establecer una verdadera función en el sistema completo. De esta forma, y en conjunción con la aplicación de las modalidades y el tipo de la investigación, la metodología está conformada por las siguientes fases de realización:

- **Establecimiento de las variables y la formulación de la hipótesis**, observando la problemática inicial, sus propiedades dentro del emplazamiento, el alcance del mismo y la manera inicial de cómo se pretendería solucionarla.
- **Conformación del marco teórico y revisión de los antecedentes investigativos** referentes al tema, a partir de medios bibliográficos anteriormente señalados.
- **Realización de una investigación de campo y obtención de información** mediante uso instrumentación específica para cada parámetro cuyas características sean necesarias su comprensión.

- **La información recolectada requiere de un análisis profundo**, mediante clasificación, separación, selección por importancia, disgregación de la participación de incertidumbres y validación de información.
- Instaurada la comprensión total del fenómeno dentro del emplazamiento, se procede a la **selección de la metodología de diseño más adecuada para la solución del problema**, haciendo un compromiso entre eficiencia energética y costes de implementación.
- **Finalmente se conforma un marco propositivo** que indique los aspectos de influencia socio económicos que se obtienen de la inclusión del sistema en los predios seleccionados y estudiados, así como la compatibilidad con el entorno circundante.

## 2.4 Unidad de Estudio

El emplazamiento seleccionado para la obtención de información y comprensión del fenómeno eólico como tal, corresponde al Campus CEYPSA, sector Salache, cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi. Está ubicada al sur occidente de la cabecera cantonal, a una distancia de 10 km. de la capital provincial, con una altura media estimada de 2730,00 m.s.n.m.

La topología del sector, es del tipo montañoso e irregular, donde la configuración del suelo conserva pendientes parcialmente pronunciadas, con inclinaciones que pueden alcanzar el 12%. Sus suelos son de tipo arcilloso y arenoso, razón por la cual en los alrededores a la parroquia es eminentemente agrícola.

Posee clima frío influencia por las corrientes provenientes del aire del páramo que llegan con origen en el volcán Cotopaxi, con temperaturas promedio de entre 10°C y 15°C. Cabe recalcar que en el invierno comprendido entre octubre y febrero son tiempos de regularidad constante en la naturaleza del viento, mientras que la etapa restante del año, con mayor prevalencia en el mes de Julio y el verano existen una serie de fuertes vientos con dirección de este a oeste.

## **2.5 Instrumentación de medida.**

### **2.5.1. Parametrización inicial.**

El marco paramétrico de medición correcta dentro del emplazamiento, sigue los siguientes criterios:

- Periodicidad en la medida de propiedades y características del viento mediante instrumentación específica, de acuerdo a criterios del investigador, validación de la información por excepción de incertidumbres en el proceso de obtención de datos, y verificación por medio de software de simulación.
- Validación de la información medida por emplazamiento bajo métodos de comprobación y reducción de incertidumbre, además de bases de datos eólicas realizadas por instituciones privadas y públicas de carácter meteorológico adjuntas.
- Comparación de rendimiento por predisposición de dirección y sentido del viento, así como por presencia de rafagosidad del mismo y cantidad de turbulencia presentada.
- Estimación de la curva de potencia entregada por el diseño de aerogenerador seleccionado bajo criterios ponderados de ingeniería.
- Nivel de aportación hacia el suministro energético para la producción agrícola familiar, índices de gestión operativos, y requerimientos específicos del conjunto de captación.
- Ubicación Geográfica final, formas y medios de instalación y previsión de formas y metodologías de mantenimiento.
- Compatibilidad con el entorno circundante y el impacto medioambiental de su potencial energético.

### **2.5.2. Instrumentación y software de diseño.**

La instrumentación requerida para la obtención del análisis de frecuencia de vientos, dirección y nivel de rafagosidad dentro del emplazamiento ubicado en el Campus CEYPSA, sector Salache fue:

- Termómetros (medición de temperatura).
- Conjunto Barómetro - Manómetro (medición de presiones).
- Anemómetros (medición velocidad media del viento).
- Veleta de viento (medición de dirección del viento).
- Data Logger (almacenamiento de información).
- Bases de datos obtenidas por el MEER.
- Software SolidWorks para diseño estructural del aerogenerador.

En la tabla No. 2.1 se detalla cada uno de los instrumentos a usar, su descripción física y las especificaciones de cada uno de ellos, de forma individual así como sus funciones dentro del conjunto instrumentado.

**Tabla No. 2.1. Especificaciones de instrumentación.**

Instrumento	Descripción	Especificaciones
Termómetros		El termómetro de máximas y mínimas es utilizado en meteorología para saber la temperatura más alta y la más baja del día, y consiste en dos instrumentos montados en un solo aparato. También existen termómetros individuales de máxima o de mínima para usos especiales o de laboratorio.
Conjunto Barómetro Manómetro		El barómetro/medidor de presión absoluta es adecuado para las condiciones de campo o de laboratorio más exigentes. Puede medir presión absoluta, presión barométrica (corregida a nivel del mar) o altitud respecto al nivel del mar o corregida para un mapa o marcador de medición.

Anemómetro		Instrumento utilizado para medir la velocidad del viento (fuerza del viento). Los anemómetros miden la velocidad instantánea del viento, pero las ráfagas de viento desvirtúan la medida, de manera que la medida más acertada es el valor medio de medidas que se tomen a intervalos de tiempo de acuerdo al emplazamiento.
Veleta de Viento		Para determinar la dirección del viento, la veleta gira y apunta la dirección desde la que viene el viento y generalmente tiene dos partes o extremos: uno que tiene un forma de flecha y que voltea hacia el viento y otro extremo que es más ancho para que atrape la brisa. Para usar una veleta, se debe saber dónde están los puntos cardinales.
Data Logger		Son registradores de datos y han evolucionado con el avance de la informática. Pueden clasificarse de acuerdo a la forma de transmitir los datos (en campo o por transferencia de datos remotas). Es electrónico y compatible con los sensores.
Bases de Datos MEER		Además cotejaremos nuestra información con las bases de datos expuestas por estudios realizados por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER), como el mapa eólico nacional.

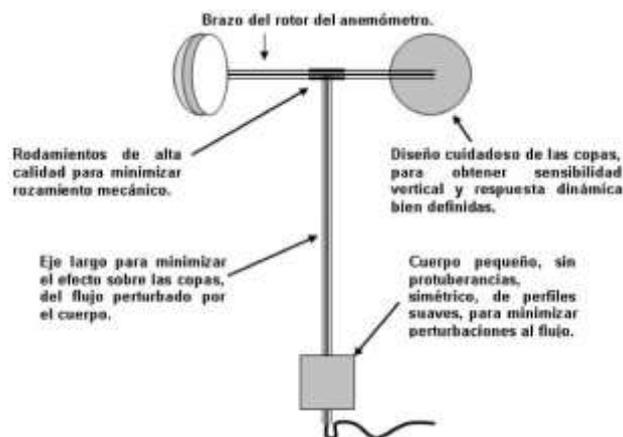
Fuente: [Normawind, 2007], [MEER, 2014].

### 2.5.3. Consideraciones técnicas de medida

La medida más importante dentro de la caracterización de propiedades del potencial eólico en el emplazamiento para el Campus CEYPSA, sector Salache, cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi, es la velocidad del viento. Debido a la presencia de rafagosidad que

afecta a los sistemas de captación, se requiere tomar ciertas precauciones que garanticen la fiabilidad en la medición, y la reducción de la incertidumbre y agentes externos de afección.

Como primer factor de influencia, tal como aporta (Mattio & Tilca, 2009), es necesario verificar el instrumento de medición, en especial el anemómetro, el mismo que tal como se señala en el Gráfico No. 2.1. debe tener unas cualidades específicas para este tipo de captación de datos.



**Gráfico No. 2.1. Diseño específico de elemento de medida.**

Fuente: (Mattio & Tilca, 2009)

Pero de manera conjunta con un excelente diseño de la instrumentación, así como la estructuración de ajuste y los materiales de los cuales se encuentra compuesto, existe otra serie de parámetros que variarían en menor o mayor medida la sensibilidad del instrumento a la medición, tal como se apunta en la Tabla No. 2.2.

**Tabla No. 2.2. Influencia del diseño y sensibilidad de medición.**

Parámetro de diseño	Sensibilidad a componente vertical del viento	Linealidad en la calibración	Respuesta Dinámica
<b>Geometría del rotor (forma de copas, relación radio de las copas y del rotor)</b>	Muy importante. No hay conocimiento detallado para optimización	Alguna influencia	Depende balance entre fuerzas aerodinámicas e inerciales.
<b>Tamaño del rotor</b>	Sin influencia	A mayor tamaño, mejor linealidad (menor fricción)	A mayor tamaño de rotor, mayor inercia y menor respuesta
<b>Longitud del eje</b>	Importante. A mayor longitud	Sin influencia	No importante

	menos distorsión de flujo por el cuerpo		
<b>Geometría del Cuerpo</b>	Forma y Tamaño afectan magnitud de distorsión del flujo rotor	Sin influencia	No importante
<b>Protuberancias</b>	Leve influencia	Sin influencia	Probable influencia de segundo orden
<b>Mecanismo de generación de señal</b>	Sin influencia	Leve	5.0%

Fuente: (Mattio & Tilca, 2009)

## 2.6 Operacionalización de Variables

Tal como lo indica la definición de variable, son aquellos factores que constituyen el núcleo del problema, siendo identificados, explicados y analizados mediante la Operacionalización de las mismas, conjuntamente con la fundamentación teórica específica. Cabe apuntar en este punto que las variables de la presente investigación fueron tomadas a partir de las siguientes preguntas directrices para la solución del problema:

- ¿De qué manera se pueden aprovechar las características eólicas dentro del emplazamiento del Campus CEYPSA, sector Salache?
- ¿Cuál sería la mejor metodología de captación eólica bajo parámetros NACA?
- ¿Qué tipo de captador eólico sería indicado para las características del viento, temperatura y rugosidad del terreno específico del emplazamiento?
- ¿Cuál sería la factibilidad de diseño, fabricación e implementación del sistema seleccionado?

De esta forma la Operacionalización de las variables queda expuesta tal como se indica en las tablas No. 2.3. y No. 2.4.

## VARIABLE INDEPENDIENTE

Características del potencial eólico.

**Tabla No. 2.3 Operacionalización Variable Independiente**

Concepto	Categoría	Indicadores	Item	Técnicas	Instrumentos
Representa todas las cualidades cualitativas y cuantitativas del viento y la producción energética a partir de este bien. Además, es un proceso limpio que usa el flujo eólico como fuente principal de energía, siendo este el objeto del presente estudio.	Portadores energéticos (aire)	Velocidad del viento que circula.	m/s	Medición	Anemómetro
		Temperatura.	°C	Medición	Flujómetro
		Contenido de Humedad.	%	Medición	Flujómetro
		Dirección del viento		Cálculos	Ecuaciones

Fuente: El autor

## VARIABLE DEPENDIENTE

Aprovechamiento de la potencia eólica.

**Tabla No. 2.4. Operacionalización Variable Dependiente**

<b>Concepto</b>	<b>Categoría</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Ítem</b>	<b>Técnicas</b>	<b>Instrumentos</b>
Es la determinación de la cantidad de aire mínima que se necesita para lograr que la turbina eólica genere una fuerte cantidad de energía que podrá ser aprovechada.	Potencial eólico	Velocidad	m/s	Cálculos	Ecuaciones

Fuente: El autor.

## 2.7 Expresiones de cálculo fundamentales para la selección del aerogenerador

### a. El número de Reynolds

Este número describe una cifra adimensional que relaciona directamente propiedades físicas del fluido analizado, la velocidad con la que circula y las características geométricas del ducto por donde circula. La expresión matemática que la define viene dada por la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{u} \quad [\text{Ec. 1.4}]$$

Donde,  $Re$  = densidad del aire,  $D$  = Diámetro del ducto,  $v$  = Velocidad promedio del líquido o fluido,  $\rho$  = densidad del líquido y  $u$  = viscosidad del líquido.

### b. La potencia eólica

La producción de potencia mediante la aerogeneración, a través de la captación del bien eólico, depende de la interacción entre el mecanismo de obtención mecánica y el viento, transformando la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación, y para producción eléctrica mediante generadores. (Asea Brown Boveri, 2012) plantea inicialmente la obtención de la potencia eólica a partir de la energía cinética  $E_c$  de una masa de aire que se mueve a una velocidad  $v$ , cuya expresión matemática viene dada por:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2 \quad [\text{Ec. 1.5}]$$

De la ecuación [Ec. 1.5] se desprende que la potencia específica disponible  $P_{disp}$  de una masa de aire de caudal  $q = \frac{dm}{dt}$  es:

$$P_{disp} = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \cdot q \cdot v_1^2 \quad [\text{Ec. 1.6}]$$

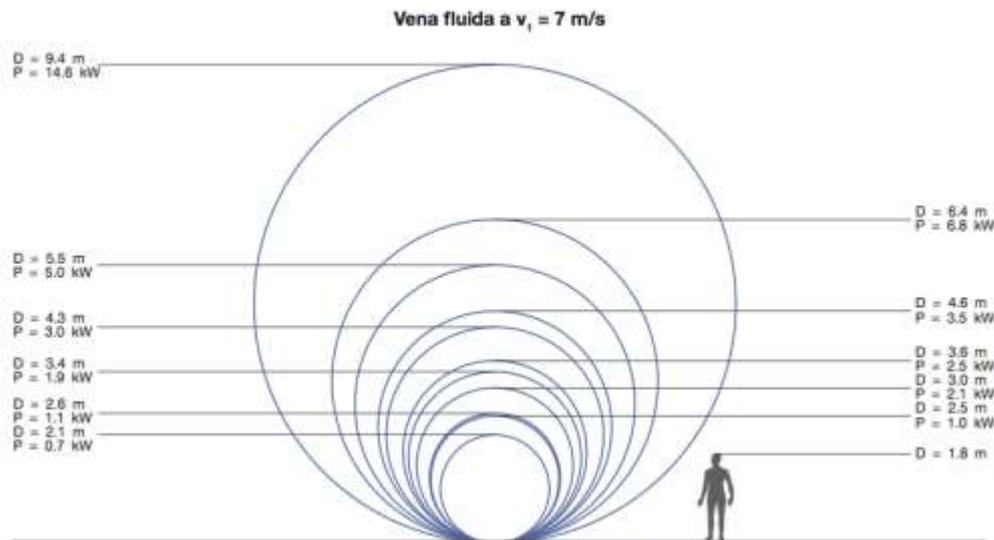
De lo cual se desprende la fórmula del caudal denominada ecuación de continuidad:

$$q = \frac{dm}{dt} = \dot{m} = \rho \cdot A \cdot v_1 \quad [\text{Ec. 1.7}]$$

De la ecuación [Ec. 1.7] reemplazándola en la [Ec. 1.6] se obtiene la ecuación final de la potencia específica, en relación a la densidad del aire y la sección del tubo de flujo considerado:

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \quad [\text{Ec. 1.8}]$$

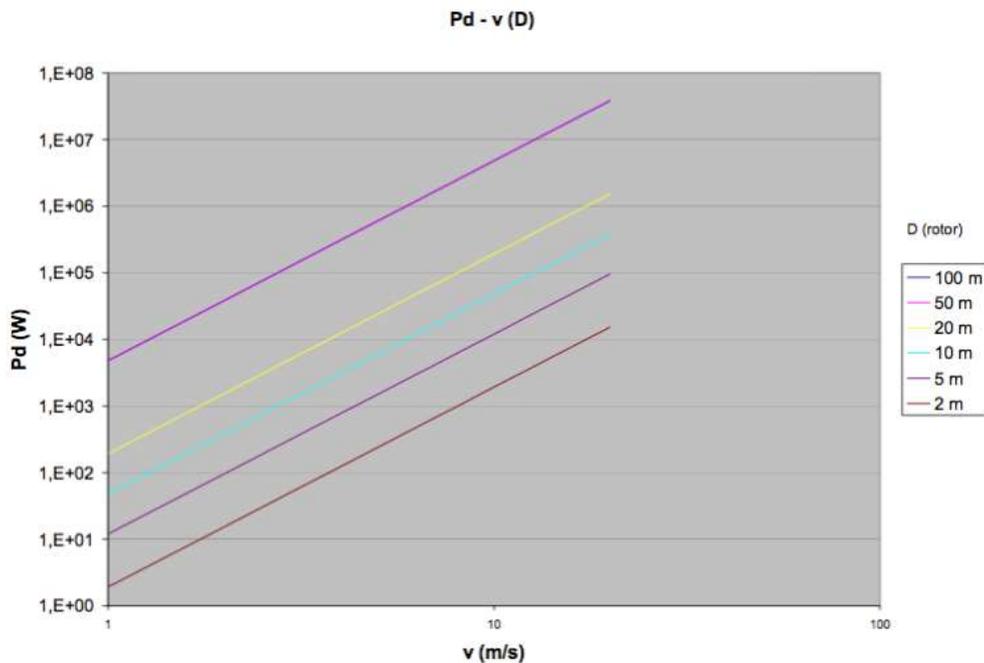
De acuerdo a lo expuesto por (Asea Brown Boveri, 2012), la potencia disponible varía con el cubo de la velocidad del viento  $V$ , por lo que tal como lo ejemplifica, a partir de esta teoría y con información de vena fluida específica de diagnóstico inicial, es posible calcular diferentes valores de potencia disponible, expuesto en el gráfico No. 2.2.



**Gráfico No. 2.2. Valores de potencia disponible para v=7 m/s**

Fuente: (Asea Brown Boveri, 2012)

De forma gráfica en relación a la potencia disponible con respecto al diámetro de la máquina, independiente de su posición de captación horizontal o vertical, (Mur Amada, 2012) expresa a continuación la variación de dicha potencia en base a una densidad del aire para este ejemplo de  $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$  (Gráfico No. 2.3)



**Gráfico No. 2.3. Potencia disponible en función del diámetro de captación**  
Fuente: (Mur Amada, 2012)

De lo expuesto por (Mur Amada, 2012), se despliega que a medida que aumenta el diámetro del rotor enfrentando el aire, y a medida que aumenta la velocidad, la potencia disponible en el viento aumenta. Si bien es cierto que partir de las deducciones anteriores, de forma teórica se desprende la potencia eólica disponible, para utilización de este parámetro dentro del campo factible de la institución de proyectos eólicos, aparece la conformación de la terminología técnica denominada “potencia eólica aprovechable”.

El cumplimiento de la ecuación de la conservación de la masa ocasiona que no toda la potencia disponible del aire pueda ser utilizada, siendo afectada por las pérdidas mecánicas en la transmisión y la eficiencia mecánica del sistema de transformación de la energía cinética en energía mecánica. De lo definido anteriormente, se puede representar la ecuación de la potencia disponible de la siguiente manera:

$$P_{apr} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot C_p \quad [\text{Ec. 1.9}]$$

donde  $C_p$  es el valor del coeficiente de potencia, cuyo número máximo fue determinado por Betz y nunca puede alcanzar el 100% respecto a la potencia incidente.

### c. El límite de Betz

La potencia específica disponible a partir del recurso eólico, tomando en cuenta la eficiencia mecánica y las pérdidas que pueden producirse dentro de la aerogeneración, viene establecido por efecto de la teoría unidimensional y la ley de Betz. Acorde a lo indicado por (Asea Brown Boveri, 2012), Betz indica que:

“Cuanto mayor sea la energía cinética que la turbina consiga extraer del viento, menor será la velocidad de este a la salida. Como consecuencia el viento se desacelera, de manera que la velocidad aguas abajo del aerogenerador estará comprendida entre cero y el valor que tiene aguas arriba (en ambos casos límite, la potencia extraída es nula).” (p. 29)

La teoría de Betz se basa en las siguientes hipótesis de Investigación:

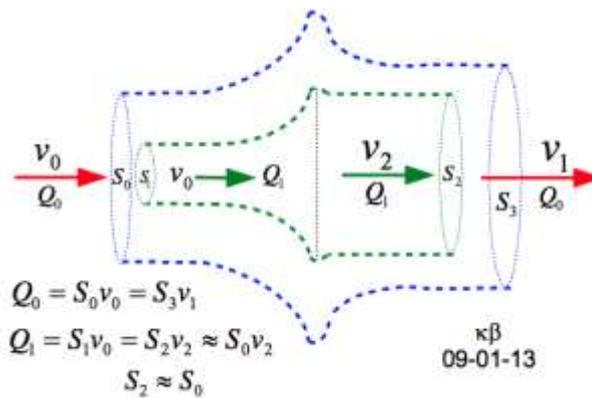
- El conjunto de las palas del aerogenerador equivale a un "disco poroso" de espesor nulo – disco actuador con un número infinito de palas.
- La masa de aire que fluye a través del disco permanece separada de la masa que lo rodea – tubo de flujo.
- La masa de aire fluye solo en dirección longitudinal.
- La deceleración del aire en el disco actuador se distribuye uniformemente en toda la sección del disco;
- En las secciones suficientemente lejanas aguas arriba y aguas abajo la presión es igual a la atmosférica;
- Aparte del aerogenerador, el flujo eólico no encuentra obstáculos ni antes ni después;
- El viento es estacionario y su intensidad permanece constante con la altura;
- No se producen efectos rotativos sobre la masa de aire;
- Se desprecia la compresibilidad del aire, es decir, la densidad se considera constante.

De forma paralela a las hipótesis de Investigación expuestas anteriormente, (Borrel, 2013) de forma teórica aclara que la Ley de Betz establece que la energía que se puede extraer del viento mediante un aerogenerador de tipo axial, y sin canalización del aire, está limitada al

59,3% de la energía cinética del aire que le incide de frente a través de una superficie  $S_0$  equivalente al área batida por las palas de la turbina.<sup>2</sup>

De la Ley de Betz, se obtiene que el caudal de aire que pasa por la turbina es proporcional a la media de la velocidad entre antes y después de pasar por las palas:  $\bar{v} = \frac{1}{2}(v_0 + v_1)$ , determinada en la siguiente ecuación matemática:

$$Q = S_0 \cdot \bar{v} = \frac{1}{2} \cdot S_0 \cdot (v_0 + v_1) = \frac{S_0 \cdot v_0}{2} \cdot \left(1 + \frac{v_1}{v_0}\right) \quad [\text{Ec. 1.10}]$$



**Gráfico No. 2.4. Esquema de flujo de aire Ley de Betz**

Fuente: (Borrel, 2013)

#### **d. Generación de energía en aerogeneradores de eje vertical**

El viento posee una energía la cual se busca extraer mediante la aplicación de los aerogeneradores, pero a diferencia de aquellos de eje horizontal, en los de eje vertical la generación de energía se obtiene de dos formas específicas, mediante el arrastre y mediante la sustentación.

Iniciando por la metodología de obtención más fácil, mediante el arrastre tal como lo explica (Chávez, 2010), cuando el viento se impacta en una superficie A con una velocidad

<sup>2</sup> Es un tipo de limitación semejante al teorema de Carnot que establece que el rendimiento que se puede obtener de un combustible en un motor de combustión será siempre inferior o igual a  $\frac{T_0 - T_1}{T_0}$ . Por tanto el rendimiento térmico nunca puede llegar a ser del 100%, salvo en el hipotético caso de que instaláramos la máquina en un lugar del universo donde la temperatura ambiente fuera de 0 K. De modo semejante si a sotavento de una turbina el aire se licuara por enfriamiento, el rendimiento podría ser del 100%.

$v_v$  se obtiene una potencia P, la cual puede ser calculada mediante la siguiente expresión matemática:

$$Q = D \cdot v_v \quad [\text{Ec. 1.11}]$$

Este fenómeno de arrastre puede ser observado en los veleros y en las VAWT del tipo Savonius. Además de la velocidad  $v_v$ , la velocidad relativa  $v_r = (v_w - v)$  que impacta efectivamente el área de arrastre es decisiva, así que tal como se apunta en la [Ec. 1.12], usando el coeficiente común de arrastre aerodinámico  $C_D$ , el arrastre aerodinámico D se expresa de la siguiente manera.

$$D = C_D \frac{\rho}{2} (v_v - v_r)^2 \cdot A \quad [\text{Ec. 1.12}]$$

Por sustitución de la ecuación [Ec. 1.12] en la [Ec 1.11], se obtiene la ecuación final para el cálculo de la potencia resultante:

$$P = \frac{\rho}{2} \cdot C_D (v_v - v_r)^2 \cdot A \cdot v_r \quad [\text{Ec. 1.13}]$$

De esta ecuación, mediante comprobación de la potencia contenida en un flujo libre de aire, se obtiene que el valor máximo del coeficiente de potencia se alcanza cuando  $v_r/v_w = 1/3$ . Por lo tanto el valor máximo del coeficiente de potencia será aproximadamente 0.2 tal como agrega (Chávez, 2010), el mismo que representa un tercio del coeficiente ideal de potencia por el límite de Betz (Gráfico No. 2.5).

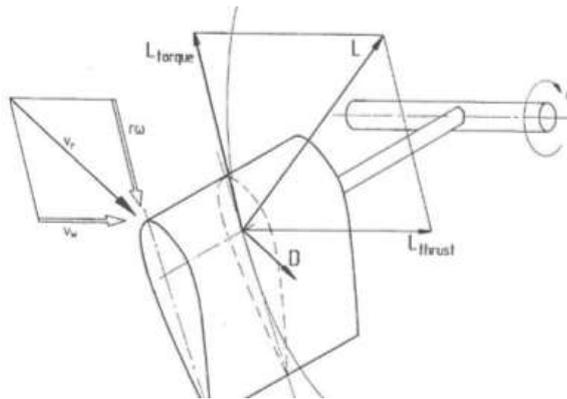


### Gráfico No. 2.5. Fuerza de sustentación

Fuente: (Chávez, 2010)

Lo que se logra con la aplicación de la fuerza de sustentación es que aumente de forma considerable el coeficiente de potencia  $C_p$  que el aerogenerador puede alcanzar, pues usan la fuerza de sustentación junto a la velocidad angular del rotor y la velocidad, donde como concluye (Chávez, 2010), estas dos últimas generan el ángulo aerodinámico de ataque  $\alpha$ .

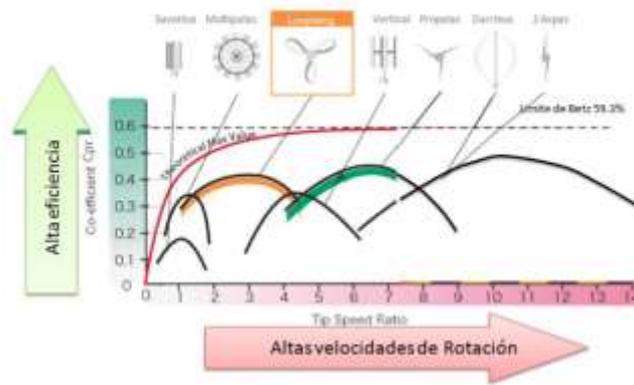
Dicha fuerza de sustentación puede ser descompuesta en un componente en la misma dirección del viento conocido como arrastre  $D$ , y otro componente perpendicular conocido como sustentación, la misma que a su vez puede ser descompuesta en sustentación de empuje, la cual es la responsable del empuje del rotor, y la sustentación de torque, en dirección al eje de giro del rotor, finaliza (Chávez, 2010), visualizándose la descomposición en el gráfico 2.6.



### Gráfico No. 2.6. Análisis de fuerzas de sustentación

Fuente: (Chávez, 2010)

Otros autores han indicado que el coeficiente de potencia del rotor en la mayoría de los casos se encuentra en valores dentro del rango 0.4 – 0.42, lo que mediante estudio comparativo con aerogeneradores de eje horizontal nos da un TSR menor, tal como se evidencia en el Gráfico 2.7.



**Gráfico No. 2.7. Coeficientes de poder en el rotor de aerogeneradores**

Fuente: (Chávez, 2010)

## 2.8 Procedimientos de la Investigación.

Para una mejor comprensión del fenómeno y su caracterización dentro del emplazamiento mencionado, es necesario comprender el siguiente procedimiento:

- Visualización, disgregación y definición del problema de investigación.
- Recolección bibliográfica, artículos científicos y demás información técnica que conformen el marco teórico de comprensión inicial.
- Determinación y selección de la mejor metodología a seguir, además de identificar los conjuntos de medida indicados para la realización del estudio de campo dentro del emplazamiento.
- Validación de la instrumentación utilizada, con utilización de procesos para la reducción de la influencia de la incertidumbre y efectos externos.
- Registro continuo de la información obtenida, clasificándola en válida y no válida para propósitos finales de comprensión del recurso eólico.
- Validación de resultados, diseño final y prototipado del aerogenerador eólico, incluyendo la aplicación orientada hacia el suministro de producción agrícola familiar.
- Conformación de un marco propositivo que provea la solución efectiva, adhiriendo la aceptación del diseño y validación del prototipo final.
- Realización del informe final de resultados y presentación de la memoria escrita, en la que se presentarán todas la información teórica, las mediciones y la validación del

diseño y prototipado de una aerogenerador de flujo turbulento orientado a un suministro energético para producción agrícola familiar.

## 2.9 Procesamiento y Análisis de la información

Para el procesamiento y análisis de la información se utilizó el instrumento DATA LOGGER, el cual emite un registro detenido de la variación de la captación eólica en aspectos importantes como la velocidad del viento, su dirección, su sentido, además de aspectos influyentes como la temperatura ambiental, la humedad existente, la rugosidad del terreno, precipitaciones registradas.

## 2.10 Metodología de Diseño.

Para dar cumplimiento a los objetivos principales que se buscaron dentro de la investigación, se define una metodología propia y única del diseño, la misma que incluye dentro de su elaboración tres etapas principales, el análisis, la síntesis de Investigación y la evaluación del diseño, tal como se señala dentro del gráfico No. 2.8.



**Gráfico No. 2.8. Fases de la metodología de diseño.**

Fuente: El autor

El gráfico No. 2.8, muestra un orden para la comprensión clara del fenómeno a ser parametrizado para beneficio y solución de la problemática. Se establecen una serie de metas que se pretenden cumplir con el diseño, un marco teórico y de fundamentación técnica, el correcto marco metodológico y de diseño, el pliego de requerimientos de la máquinas, las

restricciones que presenta la misma para finalmente proceder con el desarrollo conceptual estructural y prototipado del equipo.

Cabe señalar que, como paso primordial anterior al diseño físico del sistema, se cumplió con la identificación del plano de requerimientos y restricciones del equipo que se pretender diseñar, tomando en cuenta a todo momento el desarrollo conceptual de la máquina.

### 2.10.1. Requerimientos del sistema.

Un aerogenerador de flujo turbulento, independiente de la aplicación final a la que se le dará dentro de un sistema, debe obedecer a una serie de requerimientos del sistema, los mismos que se detallaron dentro de 3 grupos especiales, aspectos generales, aspectos específicos estructurales y aspectos de construcción y materiales, tal como se detalla a continuación en la tabla No. 2.5.

**Tabla No. 2.5. Pliego de requerimientos del sistema.**

<b>ASPECTOS GENERALES DE DISEÑO</b>	
<b>Criterios de fiabilidad estructural</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fiabilidad a esfuerzos estáticos.</li> <li>• Resistencia a la actuación de fuerza centrífuga.</li> <li>• Configuración de rotor en bandera.</li> <li>• Comportamiento frente a rafagosidad.</li> <li>• Protección ante vientos huracanados.</li> </ul>
<b>Integridad frente a cargas de fatiga</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comportamiento frente a cargas dinámicas debido a giro de palas y captadores.</li> <li>• Transitorias por maniobras de orientación.</li> <li>• Mecanismos de regulación de paso pala.</li> <li>• Control y sistema de reducción de esfuerzos ante turbulencias.</li> <li>• Disminución del efecto estela.</li> </ul>
<b>Deformaciones y vibraciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Control de deformación estructural en servicio.</li> <li>• Protección ante deformación en reposo y permanencia estática.</li> <li>• Disminución de vibraciones y nodos modales destructivos.</li> <li>• Resistencia a deflexiones máximas.</li> <li>• Detección y aseguramiento de frecuencias de resonancia.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Soporte a la minimización del desgaste y la corrosión.</li> </ul>
<b>ASPECTOS ESPECÍFICOS ESTRUCTURALES</b>	
<b>Criterios de fabricación de aspas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño aerodinámico adecuado bajo normativa de construcción NACA.</li> <li>• Resistencia a cargas durante la vida útil.</li> <li>• Soportar efectos de condiciones climáticas normales y severas.</li> <li>• Minimización de la afección por agentes externos adjuntos (polvo, insectos, suciedad, etc.).</li> <li>• Reducción del ruido acústico y contaminación visual.</li> <li>• Compromiso entre peso, material escogido y costo de construcción.</li> </ul>
<b>Sistemas de cambio de paso, buje y eje principal.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Integridad frente a cargas externas y de fatiga.</li> <li>• Capacidad de actuación frente al cambio de circunstancias climatológicas.</li> <li>• Inestabilidad por acoplamiento con rigidez torsional de las palas de captación.</li> </ul>
<b>Estructura y cimentación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Respuesta dinámica y comprobación de frecuencias naturales de vibración.</li> <li>• Comprobación de uniones soladas y atornilladas.</li> <li>• Estabilidad estructural.</li> </ul>
<b>ASPECTOS DE CONSTRUCCIÓN Y MATERIALES</b>	
<b>Configuración de materiales constructivos.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistencia estructural.</li> <li>• Resistencia a la fatiga.</li> <li>• Rigidez estructural.</li> <li>• Bajo Peso.</li> <li>• Facilidad de procesado.</li> <li>• Resistencia a agentes medio ambientales.</li> </ul>

Fuente: (CEPYME, 2012)

Dentro de los requerimientos adicionales que se buscan, bajo el parámetro de cumplimiento del rendimiento y eficiencia mecánica y energética, es reducir las averías, las cargas innecesarias, los errores de orientación vertical, la fatiga mecánica - térmica interna. Las sobre velocidades que determinan la destrucción del diseño, el envejecimiento debido al entorno y el coste de los componentes introduciendo nuevos materiales y componentes

mixtos especiales, para lo que el diseñador tiene que aumentar en gran medida los ensayos a escala, los tiempos de desarrollo y validación, el factor de capacidad operativo de la maquinaria, registrar una línea de mantenimiento predictivo correcta y la implantación de sensores redundantes de mantenimiento de la información sobre el emplazamiento circundante.

### 2.10.2. Restricciones

Las restricciones del diseño, al contrario de lo que podría entenderse por su conceptualización, son las principales características que debe mantener una estructura o sistema para que el nivel de falla o afección sea el menor posible, garantizando así su trabajo eficiente, además de representar una serie de condicionamientos efectivos para la seguridad del conjunto y el medio circundante, por lo que las principales restricciones impuestas para el presente diseño se especifican en la tabla No. 2.6.

**Tabla No. 2.6. Pliego de restricciones del sistema.**

<b>Restricción</b>	<b>Característica</b>
<b>Parada de protección del aero-generador</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pueden ocurrir por vientos altos, error de funcionamiento, parada de poco viento y parada manual por operarios.</li> <li>• Sostener un procedimiento de parada por paso fijo, comandada por operario y aerofrenos.</li> <li>• Incluir además una parada de paso variable, con participación de actuadores de cambio de paso, desconexión a aplicación secundaria e incremento paulatino del circuito secundario de frenada.</li> <li>• Agregar una parada de emergencia ante errores importante, peligro para personas alrededor o afectar la integridad de la turbina.</li> </ul>
<b>Arranque del sistema</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entre 1,5 y 2 m/s mantener una posición efectiva contra el viento, la que predomina la orientación efectiva e inicio del sistema.</li> <li>• A partir de 3 m/s ordena la desaplicación de frenos y comienza el giro productivo del aerogenerador.</li> <li>• Al alcanzar la velocidad de giro requerida se conecta a la aplicación secundaria especificada de forma automática y controlada mediante interruptor.</li> </ul>

<p><b>Coefficiente de potencia elevado</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mantener un coeficiente de potencia cercano o superior a 0,4, tomando en cuenta el coeficiente expuesto por el límite de Betz de 0,59.</li> <li>• Obtener la mayor conversión de energía cinética del viento en energía mecánica del motor, y mantener una transmisión de movimiento efectiva.</li> <li>• Sostenerse a efectos de la turbulencia existente en el emplazamiento de acuerdo al análisis del número de Reynolds y el perfil de construcción de las aspas.</li> </ul>
<p><b>Curva de potencia característica</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mantener una curva de potencia característica cuyo inicio parte de 5 m/s hasta una estabilización de esfuerzos a los 25 m/s.</li> <li>• Incrementar exponencialmente la eficiencia bajo circunstancias de viento muy bajos, guardando una relación de compromiso entre el perfil NACA seleccionado y el material de construcción.</li> </ul>
<p><b>Resistencia a vibraciones</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protección de las aspas ante la actuación de altas velocidades y el impulso del flujo del viento.</li> <li>• Reducción de vibraciones y ruidos molestos e innecesarios mediante mecanismo de disminución técnicos.</li> <li>• Reducir las dimensiones de las aspas, manteniendo una línea estricta con la metodología NACA seleccionada, no sometiendo la estructura total a elevadas velocidades lineales.</li> </ul>
<p><b>Bajo impacto medio ambiental</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propiciar un bajo impacto visual, priorizando la instalación del sistema lo más cercano posible al suelo, garantizando la seguridad de los operadores y el correcto funcionamiento.</li> <li>• Mantener un bajo impacto sonoro, exponiendo en menor medida a los componentes a velocidades lineales elevadas, y aplicando medidas de amortiguamiento en el contacto entre los diferentes componentes.</li> </ul>

Fuente: (Suárez, 2010), (CEPYME, 2012)

### 2.10.3. Objetivos principales del diseño.

- Investigar y comprender los beneficios de la captación del recurso eólico dentro del emplazamiento comprendido en el Campus CEYPSA, sector Salache, cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi, para orientarlo al suministro energético de producción agrícola familiar.

- Utilizar las características de los aerogeneradores de tipo Savonius, ejemplarizados bajo configuraciones WindSpire, para la construcción de una tipología de aerogeneradores de eje vertical eficientes para los medios aplicativos necesarios.
- Utilizar los conocimientos de conformación estructurales, así como la intervención de mecanismos de análisis de turbulencias, para el aprovechamiento de los recursos naturales renovables a los que se puede tener acceso de forma fácil y continuada.
- Aumentar la eficiencia de los sistemas productivos agrícolas familiares que hacen uso de suministros energéticos, para el desarrollo de sus funciones, mediante la transformación eficiencia de la energía cinemática en energía mecánica por cadenas de transmisión.
- Facilitar el uso de estructuras de captación de viento elaboradas bajo normativas NACA que, debido a su alto coste de desarrollo y operación, solamente eran designados a proyectos de gran escala, para una implementación didáctica y demostrativa.
- Elevar la fiabilidad de componentes dentro de los aerogeneradores de pequeña potencia para de esta forma se alcance una disponibilidad del 90%.

### **2.11. Desarrollo conceptual de diseño.**

El desarrollo del diseño y prototipado de un aerogenerador de flujo turbulento orientado a un suministro energético para producción agrícola familiar se basa en la configuración inicial propuesta por los aerogeneradores de eje vertical de tipo Savonius, especialmente el esquema desarrollado para aerogeneradores Windspire, cuyas características principales de composición son:

- El aerogenerador WINDSPIRE opera en zonas con bajas velocidades promedio del viento de por lo menos 2 m/s, siendo de máxima predilección emplazamientos que excedan los 5,4 m/s.

- A velocidades de viento superiores a 3,5 m/s, el Windspire comenzará a producir energía, que se mide en vatios (W) o kilovatios (kW), con la principal característica de que una Windspire de 1,2 kW producirá 2000 kWh en vientos promedios de 5 m/s.
- Los aerogeneradores windspire operan con tres juegos de aletas y estrechas superficies de sustentación que capturan el viento mientras que hace girar el sistema alrededor de un eje vertical.
- Los sistemas Windspire pueden funcionar en un rango de velocidades entre 2-11 m/s. A velocidades superiores a los 11 m/s el sistema de frenado electrónico participará como medida de seguridad, para protección ante la presencia de rafagosidad variable, turbulencia destructiva y vientos huracanados.

Las principales fuentes de análisis dentro del diseño es la aplicación de las medidas correctas de construcción de las aspas de captación eólica de acuerdo a los perfiles aerodinámicos normalizados de acuerdo a un perfil NACA, los mismos que han mantenido una serie de experimentaciones para comprobar su eficiencia y fundamentar su utilización en varias configuraciones, siendo de uso en este proyecto los perfiles aerodinámicos NACA 0015, NACA 0018 y NACA 0021.

### **2.11.1. Alternativas de diseño.**

A partir de la información recogida dentro del establecimiento del marco teórico, la conformación de la metodología investigativa y de diseño, además del análisis de una serie de perfiles aerodinámicos indicados para el diseño, construcción y prototipado de un aerogenerador de flujo turbulento orientado al suministro energético para producción agrícola familiar, principalmente los perfiles NACA 0015, NACA 0018 y NACA 0021, se evalúan estos tres tipos de alternativas de solución a la problemática establecida, como se señala de forma individual y comparativa final a continuación:

- **NACA 0015**

El perfil aerodinámico NACA 0015 mantiene las siguientes características:

- Perfil simétrico.
- Máximo espesor del 15% de la cuerda.
- Posición de la máxima deflexión de la línea de curvatura como un porcentaje de  $c=0\%$ .
- Máxima deflexión de la línea de curvatura  $X_{cmáx} =$  al 10%.
- Espesor de perfil  $t$  como un porcentaje de  $c=15\%$  de  $c$ .
- Coeficiente de presión en el borde de ataque son los mismos en el extradós como en el intradós.

Dos de las características más importantes a considerar con respecto al funcionamiento adecuado de los perfiles aerodinámicos en aplicaciones eólicas a partir de ejes verticales son el coeficiente de sustentación y coeficiente de arrastre (lift and drag coefficients), a partir del estudio realizado por (Sheldahl & Klimas, 1981), de lo cual se desprende los siguientes gráficos demostrativos.

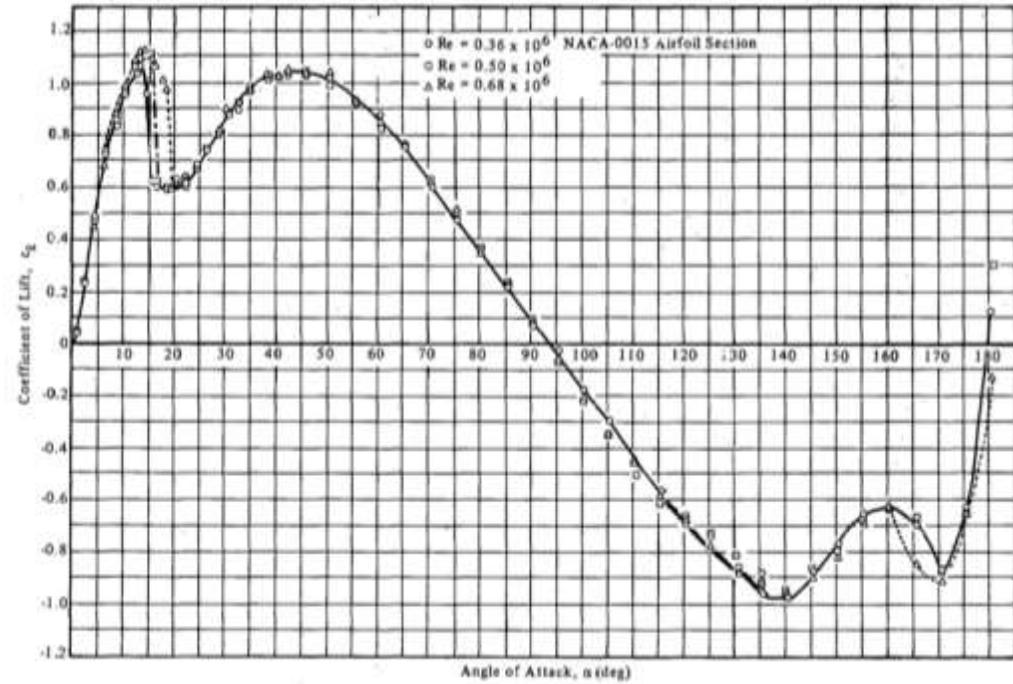
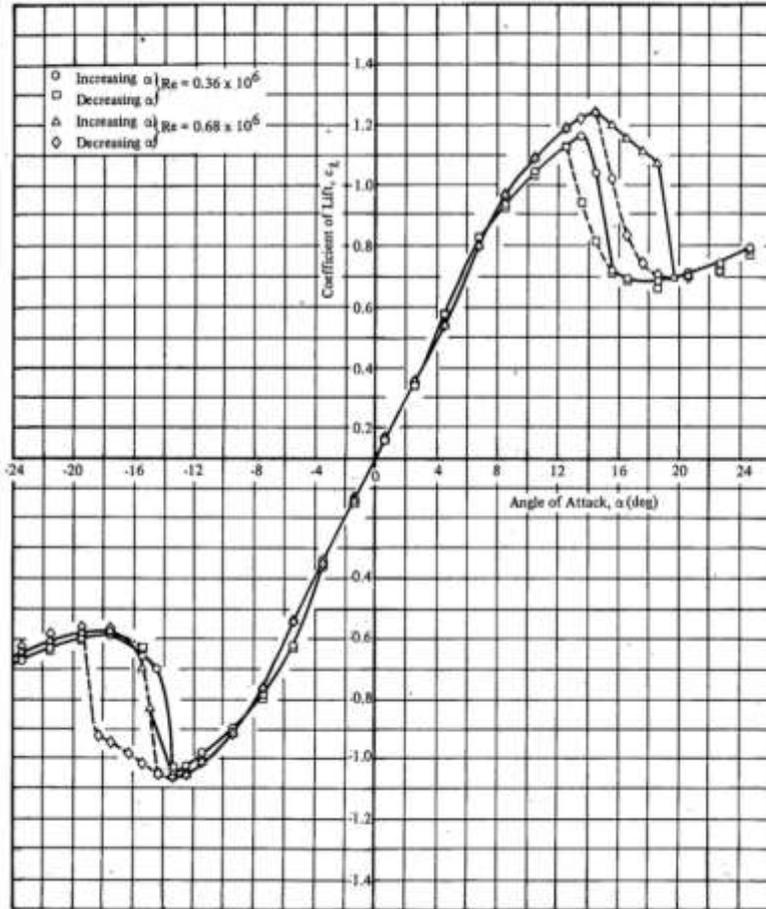


Gráfico No. 2.9. Coeficientes de sustentación para NACA 0015 ( $Re=0,36 \cdot 10^6$  y  $Re=0,68 \cdot 10^6$ ).

Fuente: (Sheldahl & Klimas, 1981).

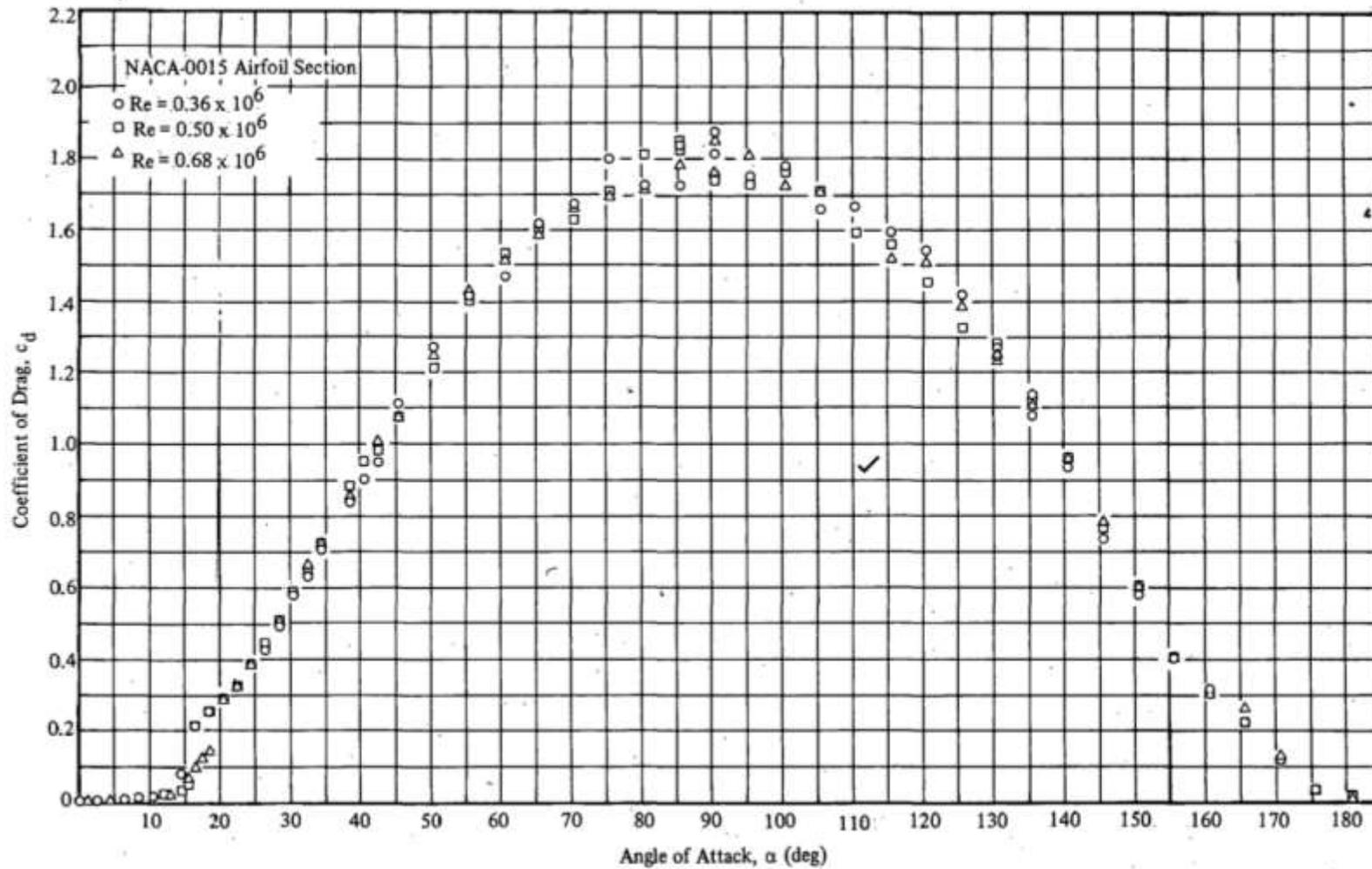


Gráfico No. 2.10. Coeficientes de arrastre para NACA 0015 ( $Re=0,36 \times 10^6$ ,  $Re=0,68 \times 10^6$  y  $Re=0,68 \times 10^6$ ).

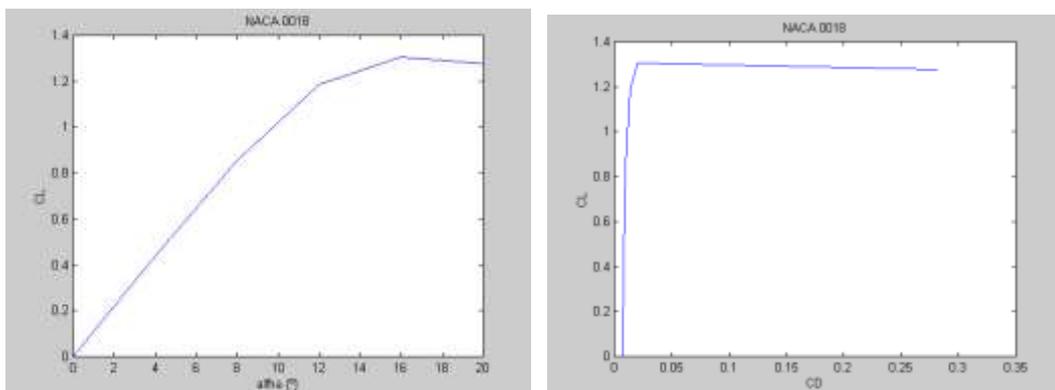
Fuente: (Sheldahl & Klimas, 1981)

- **NACA 0018**

El perfil aerodinámico NACA 0018 mantiene las siguientes características:

- Perfil simétrico (00)
- Máximo espesor del 18% de la cuerda en el 30% de la cuerda.
- Posición de la máxima deflexión  $c=0\%$ .
- Máxima deflexión de la línea de curvatura  $X_{cmáx} =$  al 10%.
- Máxima deflexión de la línea de curvatura  $X_{cmáx}$  correspondiente al 10%.
- Espesor del perfil  $t$  como un porcentaje de  $c = 18\%$  de  $C$ .
- Bajo coeficiente de sustentación máximo.
- Momento de cabeceo alto.

De igual manera que en el perfil aerodinámico NACA 0015, dos de las características más importantes a considerar con respecto al funcionamiento adecuado de los perfiles aerodinámicos en aplicaciones eólicas a partir de ejes verticales son el coeficiente de sustentación y coeficiente de arrastre (lift and drag coefficients), los mismos que para este perfil son tomados en base a análisis realizado por (Castillo, Montiel, Chacón, Chairizi, Ramijohn, & Barón, 2011), de lo cual se desprende los siguientes gráficos demostrativos.



**Gráfico No. 2.11. Sustentación vs ataque y Sustentación vs arrastre**

Fuente: (Castillo, Montiel, Chacón, Chairizi, Ramijohn, & Barón, 2011)

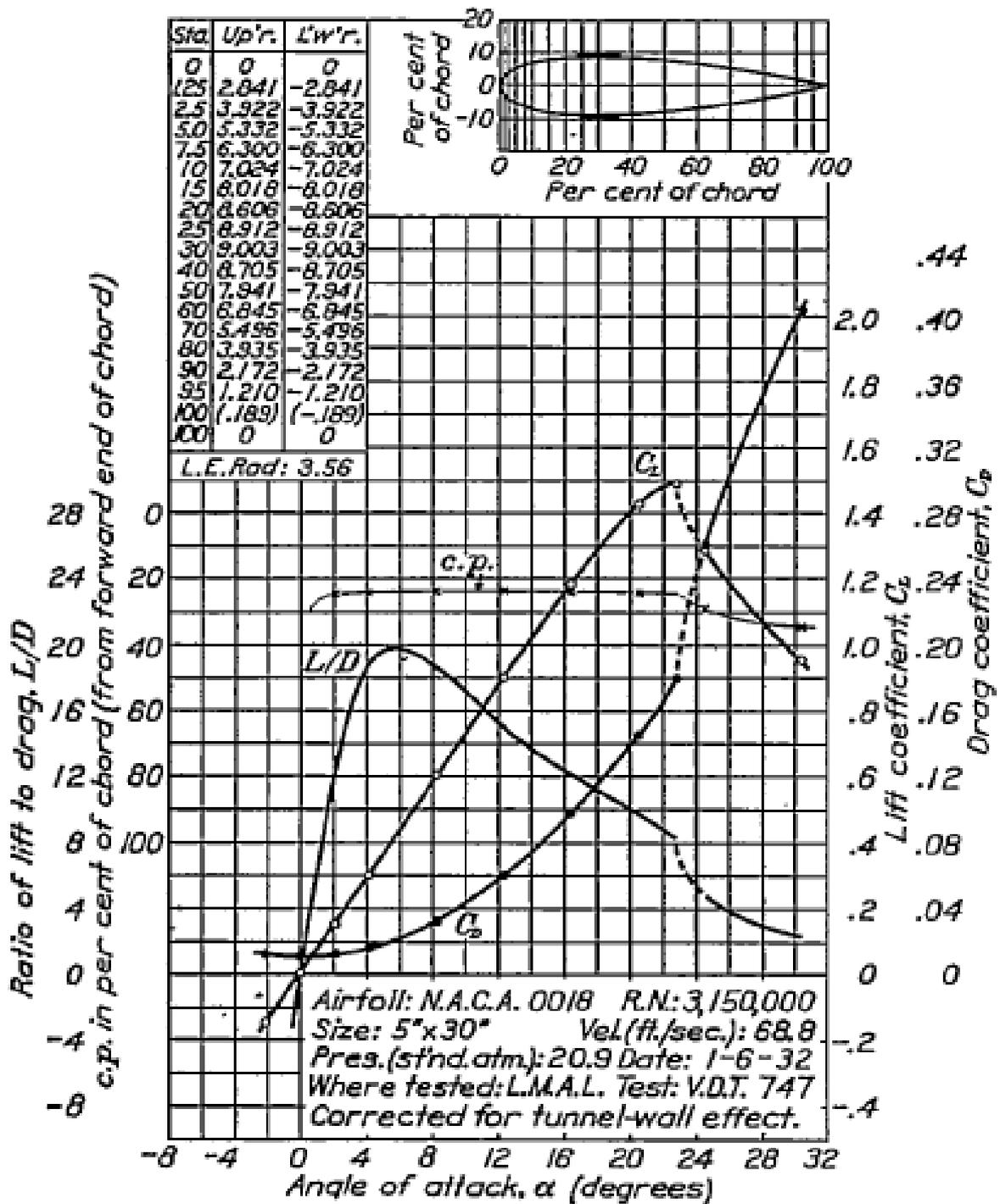


Gráfico No. 2.12. Valores experimentales de coeficiente de sustentación y coeficiente de arrastre. NACA 0018.

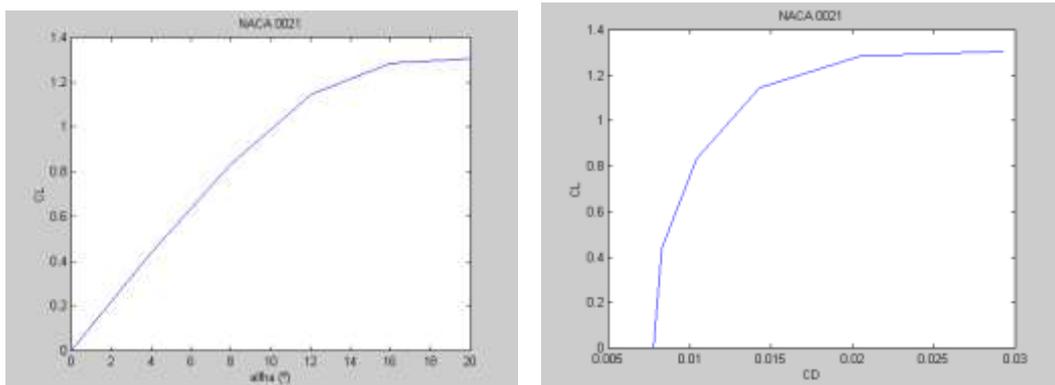
Fuente: (Castillo, Montiel, Chacón, Chairizi, Ramijohn, & Barón. 2011)

- **NACA 0021**

El perfil aerodinámico NACA 0021 mantiene las siguientes características:

- Perfil simétrico de 20% de grosor.
- Punto de máximo espesor ubicado en  $x/c=0,30$  donde  $x$  es la coordenada axial medida del frente de aspa y  $c$  es la longitud de cuerda.
- Posición máxima de deflexión  $c=0\%$ .
- Máxima deflexión de línea de curvatura  $X_{cmáx}=10\%$ .
- Espesor del perfil  $t$  como un porcentaje de  $c=21\%$ .
- Buena característica de parada.
- Pequeño centro de movimiento de presión.
- Rugosidad con poco efecto.

Similar al proceso que se realizó en los perfiles aerodinámicos NACA 0021, dos de las características más importantes a considerar con respecto al funcionamiento adecuado de los perfiles aerodinámicos en aplicaciones eólicas a partir de ejes verticales son el coeficiente de sustentación y coeficiente de arrastre (lift and drag coefficients), los mismos que para este perfil son tomados en base a análisis realizado por (Castillo, Montiel, Chacón, Chairizi, Ramijohn, & Barón, 2011), de lo cual se desprende los siguientes gráficos demostrativos.



**Gráfico No. 2.13. Sustentación vs ataque y Sustentación vs arrastre**

Fuente: (Castillo, Montiel, Chacón, Chairizi, Ramijohn, & Barón, 2011)

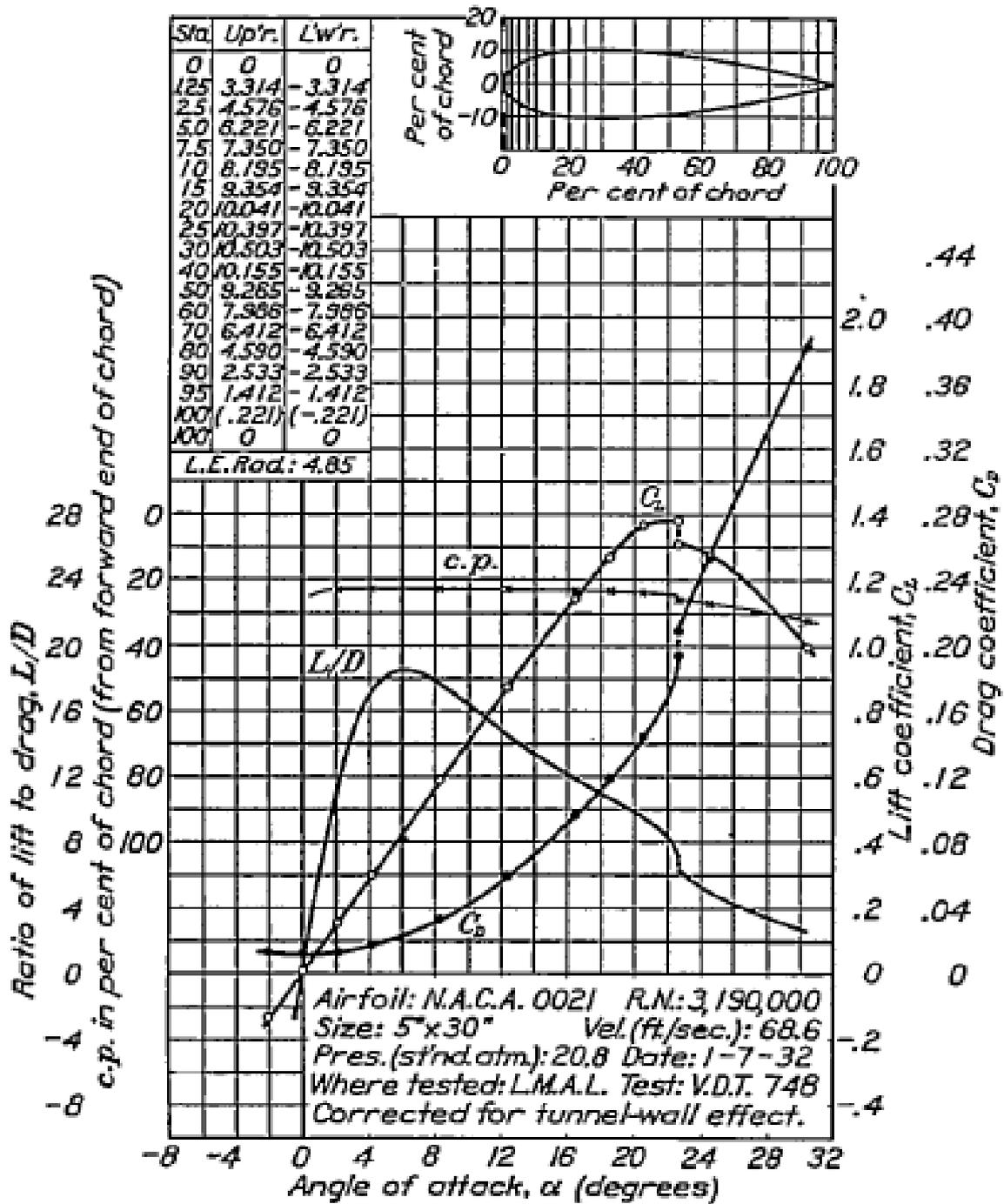


Gráfico No. 2.14. Valores experimentales de coeficiente de sustentación y coeficiente de arrastre. NACA 0021

Fuente: (Castillo, Montiel, Chacón, Chairizi, Ramijohn, & Barón, 2011)

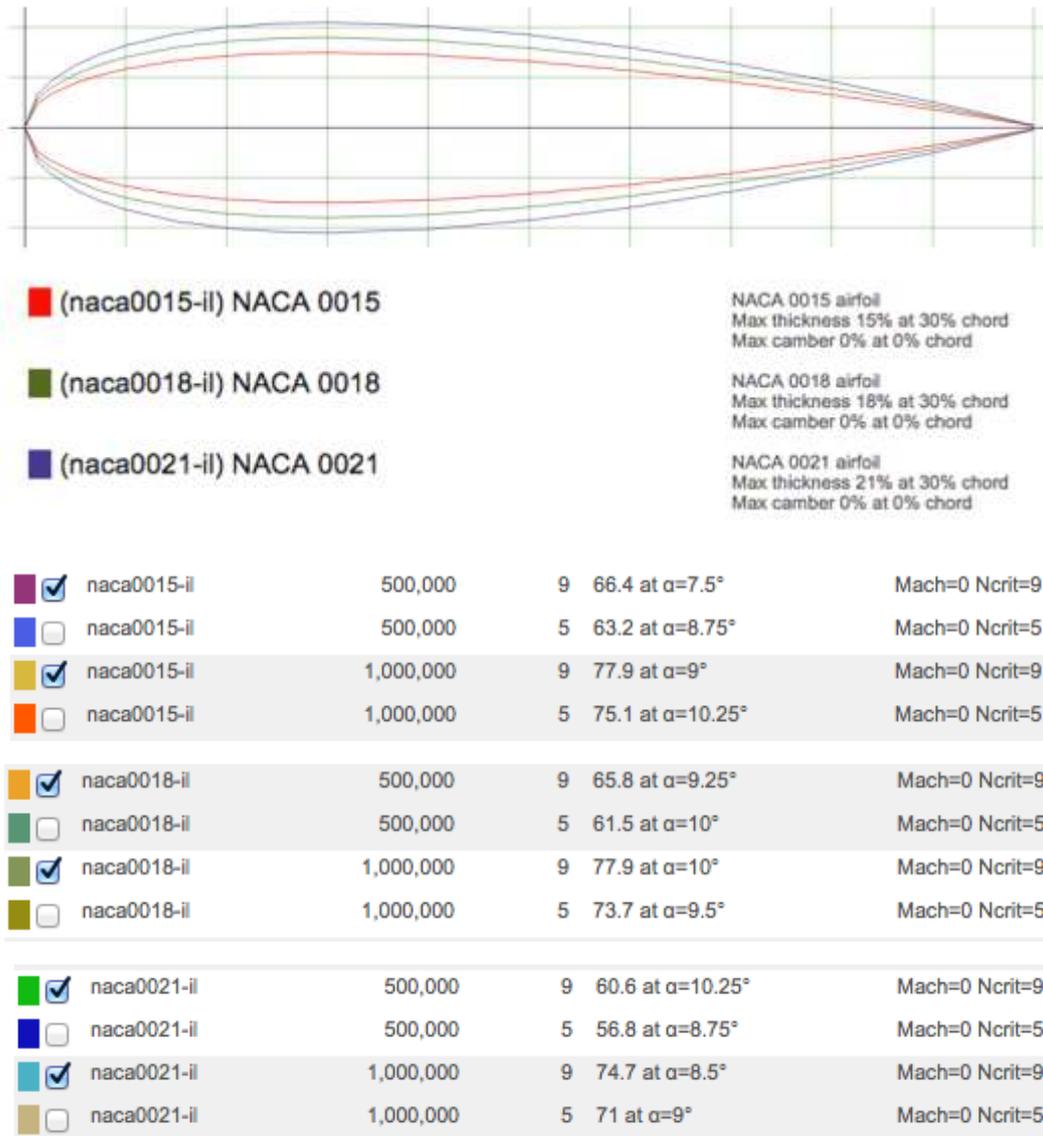
### **2.11.2. Soluciones específicas de la estructura.**

El diseño y prototipado de un aerogenerador de flujo turbulento orientado a un suministro energético para producción agrícola familiar, debe proveer las siguientes soluciones específicas:

- Realiza las funciones de captación de recursos eólicos de forma eficiente, con arranque preciso y medidas de protección ante presencia de rafagosidad y vientos huracanados.
- Mantiene una posición estable dentro de los medios de construcción y establecimiento vertical, tomando en cuenta la estabilidad del terreno, la protección del personal alrededor y la disminución de la contaminación auditiva y visual.
- Establece medios de mantenimiento indicados para una continuidad de sus medios en el tiempo, además de la disminución de desgaste innecesario de sus componentes.
- Es necesario seleccionar el mejor perfil aerodinámico NACA de acuerdo a un estudio comparativo de cualidades obtenidas como coeficiente de arrastre y de sustentación, manteniendo un compromiso continuo con el material a ser utilizado, los medios de fabricación y la metodología constructiva final.
- Correcta resistencia estructural a la fatiga y a la presencia de medios externos como la corrosión, así como una mínima afección por obstáculos aleatorios ocurrentes en el emplazamiento seleccionado.
- Perfecta relación de seguridad constructiva, estructural y de protección a todo momento, siendo de preferencia la utilización de medios de detección temprana de efectos externos.

En este punto final de detalle de las soluciones específicas de la estructura se apunta un análisis comparativo entre las características de desempeño de los 3 perfiles bajo configuraciones similares de ángulo de ataque y número de Reynolds, los mismos que nos permiten prever el comportamiento de los perfiles hacia la sustentación y el arrastre, dos

aspectos fundamentales de la captación eólica bajo eje vertical, (ANEXO G) tal como se detalla a continuación:

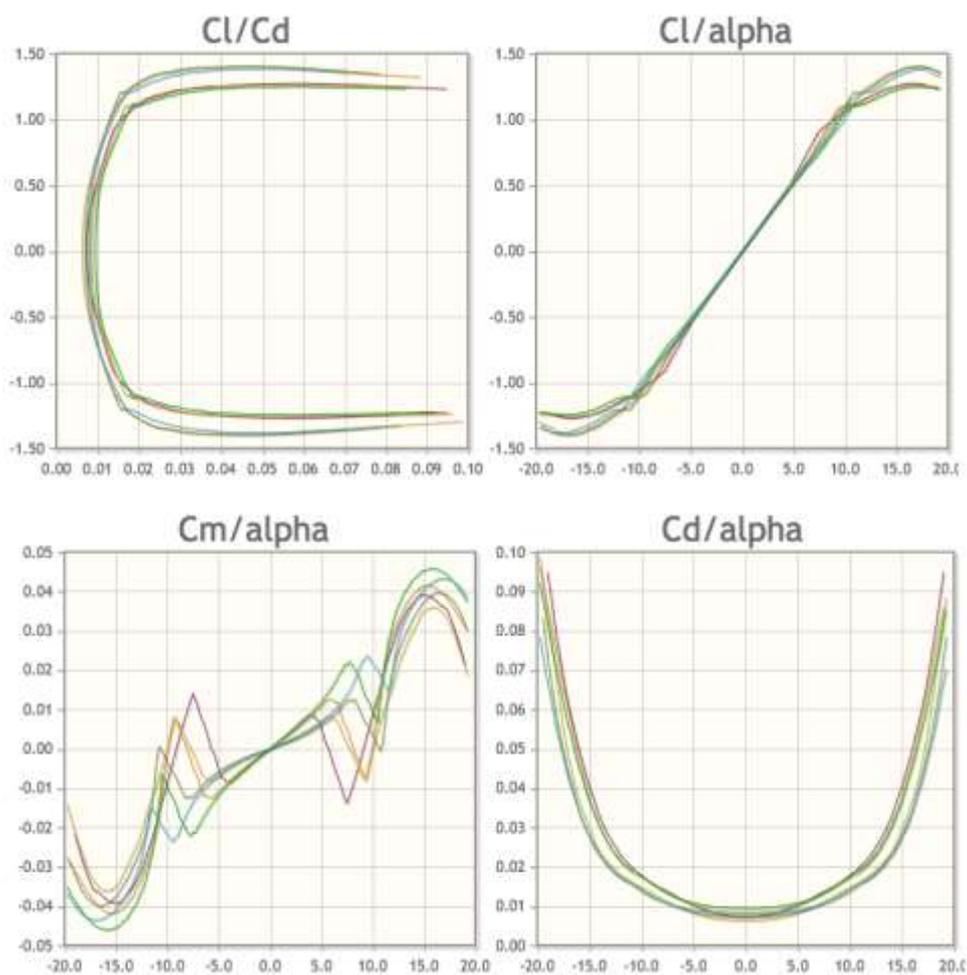


**Gráfico No. 2.15. Estudio comparativo NACA 0015, NACA 0018 y NACA 0021**

Fuente: El autor

Fuente de desarrollo: [www.airfoiltools.com/compare](http://www.airfoiltools.com/compare)

<input checked="" type="checkbox"/>	naca0015-il	500,000	9	66.4 at $\alpha=7.5^\circ$	Mach=0 Ncrit=9
<input type="checkbox"/>	naca0015-il	500,000	5	63.2 at $\alpha=8.75^\circ$	Mach=0 Ncrit=5
<input checked="" type="checkbox"/>	naca0015-il	1,000,000	9	77.9 at $\alpha=9^\circ$	Mach=0 Ncrit=9
<input type="checkbox"/>	naca0015-il	1,000,000	5	75.1 at $\alpha=10.25^\circ$	Mach=0 Ncrit=5
<input checked="" type="checkbox"/>	naca0018-il	500,000	9	65.8 at $\alpha=9.25^\circ$	Mach=0 Ncrit=9
<input type="checkbox"/>	naca0018-il	500,000	5	61.5 at $\alpha=10^\circ$	Mach=0 Ncrit=5
<input checked="" type="checkbox"/>	naca0018-il	1,000,000	9	77.9 at $\alpha=10^\circ$	Mach=0 Ncrit=9
<input type="checkbox"/>	naca0018-il	1,000,000	5	73.7 at $\alpha=9.5^\circ$	Mach=0 Ncrit=5
<input checked="" type="checkbox"/>	naca0021-il	500,000	9	60.6 at $\alpha=10.25^\circ$	Mach=0 Ncrit=9
<input type="checkbox"/>	naca0021-il	500,000	5	56.8 at $\alpha=8.75^\circ$	Mach=0 Ncrit=5
<input checked="" type="checkbox"/>	naca0021-il	1,000,000	9	74.7 at $\alpha=8.5^\circ$	Mach=0 Ncrit=9
<input type="checkbox"/>	naca0021-il	1,000,000	5	71 at $\alpha=9^\circ$	Mach=0 Ncrit=5



**Gráfico No. 2.16. Estudio comparativo NACA 0015, NACA 0018 y NACA 0021 (continuación)**

Fuente: El autor

Fuente de desarrollo: [www.airfoiltools.com/compare](http://www.airfoiltools.com/compare)

## 2.12 Selección de Alternativa de Solución.

Con la finalidad de poder seleccionar el mejor sistema de construcción, en este caso direccionado únicamente al perfil aerodinámico de las aspas de las cuales estará compuesto el aerogenerador de flujo turbulento orientado a un suministro energético para producción agrícola familiar, de forma concluyente se conforma un análisis por medio de herramientas comparativas y ponderadas, a partir de las cuales existen entre las características anteriormente mencionadas en el marco metodológico y de diseño, se escoge el nivel de afectación y peso que existe de cada una de ellas en el prototipo final propuesto, posterior a este proceso, y bajo fundamento de mediciones y cálculos matemáticos de caracterización eólica del emplazamiento, se modela el diseño y se presentan los resultados de simulación a forma de validación del sistema.

Es así que en la Tabla No. 2.7 se especifica la comparación de captación eólica por eje vertical y tipología Savonius, en la tabla No. 2.8 se enuncia la tabla de selección de alternativas del proyecto planteadas y en la tabla No. 2.9 se provee los medios de selección por alternativas de proyecto planteadas por criterios de prioridad y sumatoria de eventos.

**Tabla No. 2.7 Tabla de requerimiento de ingeniería.**

CRITERIOS	Coefficiente de sustentación máximo	Espesor relativo de perfil	Resistencia de torsión	Fiabilidad estructural	Resistencia a la fatiga	Deformaciones y vibraciones	Medios de fabricación y estructura	Análisis de materiales de aplicación	$\Sigma + 1$	Ponderación
Coefficiente de sustentación máximo		1	0,7	1	0,9	0,7	0,8	1	7,1	0,12
Espesor relativo del perfil	1		0,5	1	1	0,8	0,9	0,6	6,8	0,12
Resistencia a la torsión	0,8	0,7		0,5	0,7	1	1	0,8	6,5	0,11
Fiabilidad estructural	1	1	0,8		0,5	0,9	0,7	1	6,9	0,12
Resistencia a la fatiga	0,5	0,6	1	0,9		1	0,9	0,8	6,7	0,12
Deformaciones y vibraciones	1	0,8	1	0,9	0,7		0,6	1	7,0	0,12
Medios de fabricación y estructura	0,9	0,7	0,8	0,7	1	0,9		0,8	6,8	0,12
Análisis de materiales de aplicación	0,7	0,5	1	0,5	0,9	1	0,8		6,4	0,11
<b>SUMA:</b>									57,8	0,94

Fuente: El autor

**Tabla No. 2.8 Tabla de selección de alternativas del proyecto planteadas.**

TABLA DE ASIGNACIÓN DE ALTERNATIVAS DEL PROYECTO	Coefficiente de sustentación máximo	Espesor relativo de perfil	Resistencia a la torsión	Fiabilidad estructural	Resistencia a la fatiga	Deformaciones y vibraciones	Medios de fabricación y estructura	Análisis de materiales de aplicación	TOTAL
Perfil aerodinámico NACA 0015	5	4	5	4	5	5	5	5	38
Perfil aerodinámico NACA 0018	5	4	4	5	4	5	4	3	34
Perfil aerodinámico NACA 0021	4	3	4	3	4	4	3	3	28

Fuente: El autor

**Tabla No. 2.9 Tabla de selección de alternativas del proyecto planteadas.**

CRITERIOS	Coefficiente de sustentación máximo	Espesor relativo de perfil	Resistencia a la torsión	Fiabilidad estructural	Resistencia a la fatiga	Deformaciones y vibraciones	Medios de fabricación y estructura	Análisis de materiales de aplicación	$\Sigma$	PRIORIDAD
Perfil aerodinámico NACA 0015	0,6	0,48	0,55	0,48	0,60	0,60	0,60	0,55	4,46	1
Perfil aerodinámico NACA 0018	0,6	0,48	0,44	0,60	0,48	0,60	0,48	0,33	4,01	2
Perfil aerodinámico NACA 0021	0,48	0,36	0,44	0,36	0,48	0,48	0,36	0,33	3,29	3

Fuente: El autor

## **CAPITULO 3**

### **ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

#### **3.1 Caracterización del potencial eólico disponible en el Campus CEYPSA, sector Salache, provincia de Cotopaxi**

##### **3.1.1 Parametrización inicial**

La parametrización de variables, específica del recurso eólico en el emplazamiento correspondiente al Campus CEYPSA, sector Salache, ciudad de Latacunga, provincia de Cotopaxi, y toma en cuenta estos destacados aspectos:

- La ubicación indicada para el grupo de medida se estableció sobre una base de similares características a la dispuesta bajo prototipos iniciales del diseño del aerogenerador de eje vertical, donde la conversión de energía eólica mediante un proceso mecánico es claramente visible. Además, se deben tomar en cuenta parámetros del aerogenerador como: la velocidad y la densidad del lugar específico de instalación, por lo que es necesario se mantenga en un lugar alto como referencia, siguiendo los lineamientos indicados para la medida del viento, según lo establece (Letcher, 2012) y (Arbeloa & Zurita, 2012).
- Para un mayor acercamiento en cuestiones de exactitud de la medida de la velocidad del viento, desestimando en este caso la dirección ya que no influye mucho su efecto en el funcionamiento de los aerogeneradores de eje vertical, más que para fines de protección del mismo, se realizaron 24 medidas diarias, las 24 horas al día en un período de tiempo mensual comprendido entre Junio y Noviembre del año 2015. Esta medición se encuentra validada de acuerdo a la metodología propia de la herramienta de medición, una correlación con criterios expuestos por expertos en la toma de medidas de orden eólico, además de seguir pautas de desarrollo investigativo por hipótesis de Investigación y aproximaciones expuestas por (Arbeloa & Zurita, 2012).
- Finalmente, se tomó en cuenta elementos estrictamente meteorológicos de afección directa e indirecta, tanto a la evolución naturales del viento, como a la exactitud en los procesos de medida, siendo estos fenómenos el nivel temporal del emplazamiento,

interferencias ocurridas por estáticas y bloqueos de viento en el instrumento de medida, pérdida de calibración después de manutención de lecturas, fallas ocurridas por efecto del factor humano participante en la recolección de la información, la incertidumbre propia del registro de medidas, así como la consecución no intencional de fallas menores en el proceso.

Debido a q existe un margen de error e incertidumbre en las mediciones, la tabla No. 3.1, indica el porcentaje de medidas correctas o válidas para su análisis, medidas cuya influencia por medios externos como la ocurrencia de elementos meteorológicos de interrupción de medida no las permite tomarse en cuenta, y un porcentaje final de mediciones no validas por medios ya indicados.

**Tabla No. 3.1 Estudio de incertidumbre de la medición eólica.**

<b>ESTUDIO DE INCERTIDUMBRE DE LA MEDICIÓN EÓLICA</b>						
	<b>JUN.</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO.</b>	<b>SEP.</b>	<b>OCT.</b>	<b>NOV.</b>
<b>TOTAL MEDICIONES</b>	720	744	744	720	744	720
<b>MEDICIONES VÁLIDAS</b>	672	687	698	694	687	656
<b>PORCENTAJE VÁLIDO</b>	93,33%	92,34%	93,82%	96,39%	92,34%	91,11%
<b>MEDICIONES NO VÁLIDAS AGENTES EXTERNOS</b>	37	25	32	23	21	49
<b>PORCENTAJE NO VÁLIDO</b>	5,14%	3,36%	4,30%	3,19%	2,82%	6,81%
<b>MEDICIONES NO VÁLIDAS INCERTIDUMBRE</b>	11	32	14	3	36	15
<b>PORCENTAJE NO VÁLIDO</b>	1,53%	4,30%	1,88%	0,42%	4,84%	2,08%
<b>TOTAL</b>	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Fuente: El autor

A partir de estos datos se verifica que el mes de septiembre es aquel con mayor aproximación a la caracterización real del fenómeno eólico, recalcando una muy leve variación con el resto de meses medidos, al ser utilizado un grupo de medición con excelente trazabilidad y calibración continua, el porcentaje de medidas influenciadas no supera el 5% en ninguno de los casos, acercándose cuantitativamente en los meses de Julio (4,3%) y Octubre (4,84%), factor que permite tomar en cuenta el presente proceso de medición como válido, de acuerdo a lineamientos establecidos por (Letcher, 2012) y (Arbeloa & Zurita, 2012).

### 3.1.2 Distribución de velocidades.

Al ser un diseño de un aerogenerador de eje vertical en el cual la única medida que no influye con mayor importancia es la dirección, se requiere las siguientes mediciones:

- Registros mensuales de velocidad y densidad del aire.
- Perfil de incidencia de la velocidad por horario de medida.
- Perfil promedio de velocidad por horario de medida.

Como se observa de la ecuación 1.8, la potencia disponible del recurso eólico es directamente proporcional a la densidad del aire, la superficie de contacto dentro del aerogenerador, y al cubo de la velocidad del viento. La densidad del viento, en el caso del emplazamiento correspondiente al Campus CEYPSA, sector Salache, ciudad de Latacunga, provincia de Cotopaxi, tiene una especial participación en la potencia conseguida por el diseño del aerogenerador de eje vertical.

La densidad dentro del emplazamiento, al estar esta zona del Ecuador a una gran altura la densidad del aire, es mucho menor disminuyendo así la potencia extraíble del viento. En el caso del lugar del emplazamiento, las características iniciales de medición y parámetros propios de la naturaleza eólica quedan establecidas en el cuadro No. 3.2.

**Tabla No. 3.2 Caracterización inicial de emplazamiento.**

<b>Nombre del emplazamiento:</b>	Campus SEYPSA, sector Salache
<b>Longitud:</b>	70°37'00'' O
<b>Latitud:</b>	0°56'00'' S
<b>Altitud:</b>	2971,00 m.s.n.m.
<b>Densidad del aire:</b>	0,9115 Kg/m <sup>3</sup>
<b>Comienzo recogida de datos:</b>	Junio 2015.
<b>Fin recogida de datos:</b>	Noviembre 2015.

Fuente: El autor

Después de caracterizado el emplazamiento, tanto en su longitud, su latitud, la altitud, y la densidad del aire, se procede a la clasificación de la información obtenida por el Data

Logger de la herramienta de medición, inicialmente desde una perspectiva general promedio de velocidades mensuales (Tabla No. 3.3).

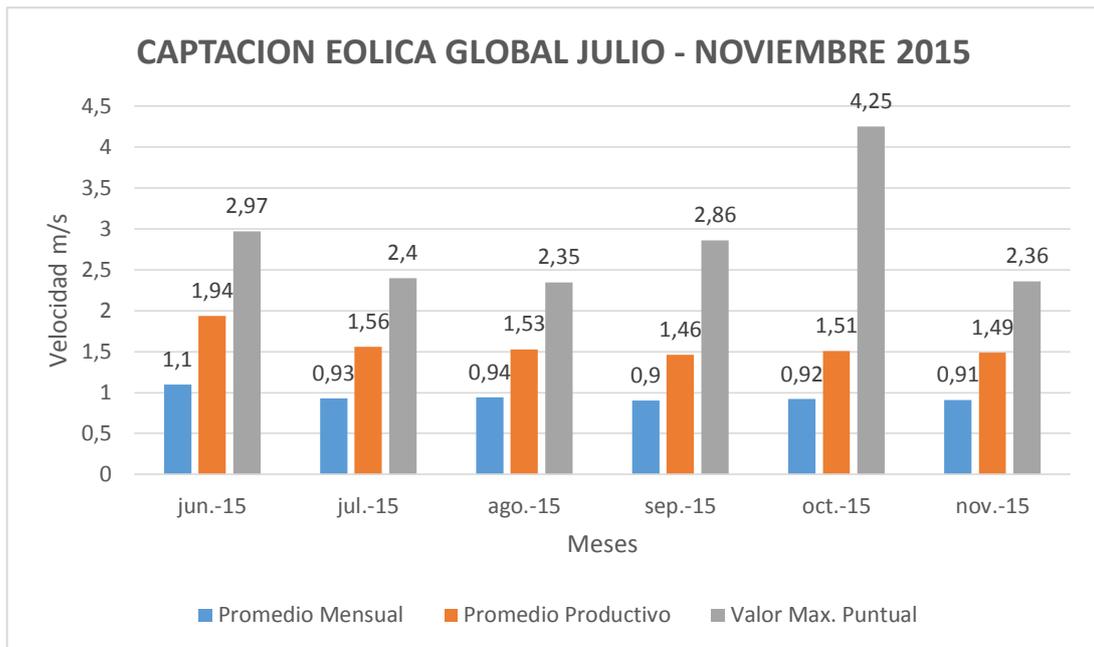
**Tabla No. 3.3 Registro mensual de velocidades.**

<b>CAPTACIÓN EÓLICA GLOBAL PROMEDIO</b>						
<b>JUNIO 2015 -NOVIEMBRE 2015</b>						
	jun-15	jul-15	ago-15	sep-15	oct-15	nov-15
<b>PROMEDIO MENSUAL</b>	1,10	0,93	0,94	0,90	0,92	0,91
<b>PROMEDIO PRODUCTIVO</b>	1,94	1,56	1,53	1,46	1,51	1,49
<b>VALOR MÁXIMO MENSUAL</b>	2,97	2,40	2,35	2,86	4,25	2,36

Fuente: El autor

De este registro mensual de velocidades se desprende una serie de valores primordiales a tomar en cuenta al momento del diseño del aerogenerador de eje vertical, tomando como principales los valores de promedio productivo y valor máximo mensual, cuyos puntos más significativos se presentaron en el mes de junio con 1,94 m/s de velocidad promedio en el período productivo, y un valor máximo mensual alcanzado de 4,25 m/s en el mes de octubre.

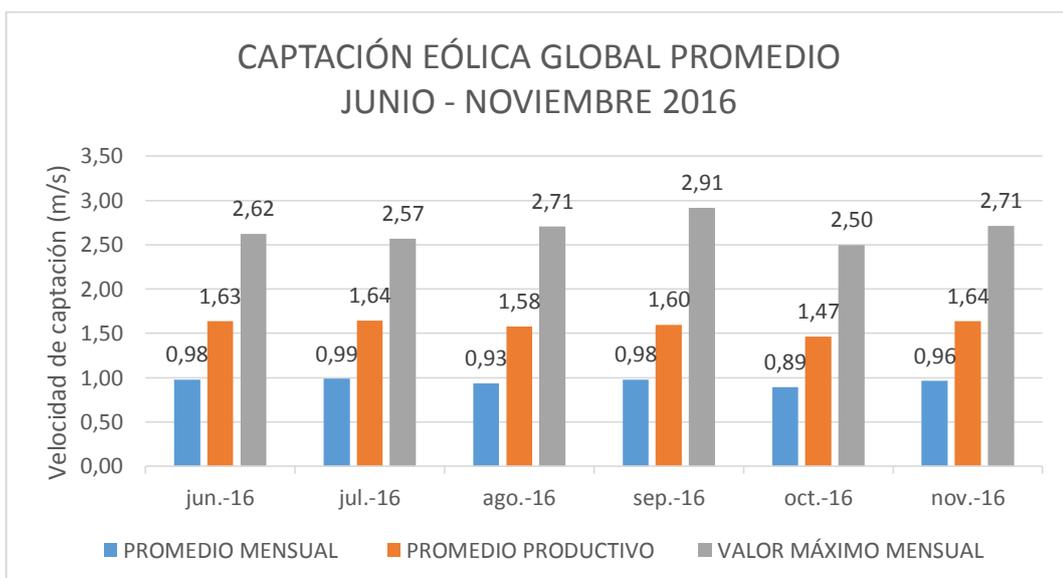
La variación entre las medidas mensuales es de promedio productivo y valor máximo mensual, entre sus puntos máximos y mínimos es de 18,18% en el primer caso, 24,74% en el segundo y 23,45% en el último parámetro respectivamente. De esta forma, en el gráfico No. 3.1 se observa la variabilidad del viento en los meses analizados.



**Gráfico No. 3.1 Variabilidad de la captación eólica global año 2015**

Fuente: El autor

Para el análisis de captación y medida eólica es preciso realizar un registro diario de las velocidades, las mismas que siguen los parámetros iniciales de medición, obtenidos del Data Logger como herramienta de medida. Estas pasaron por medio del control de incertidumbre y comprobación de la veracidad de los mismos. Para complementar esta aseveración los datos se compararon con las mediciones adquiridas de todo el año 2016, las cuales se exponen a continuación en el gráfico 3.2.



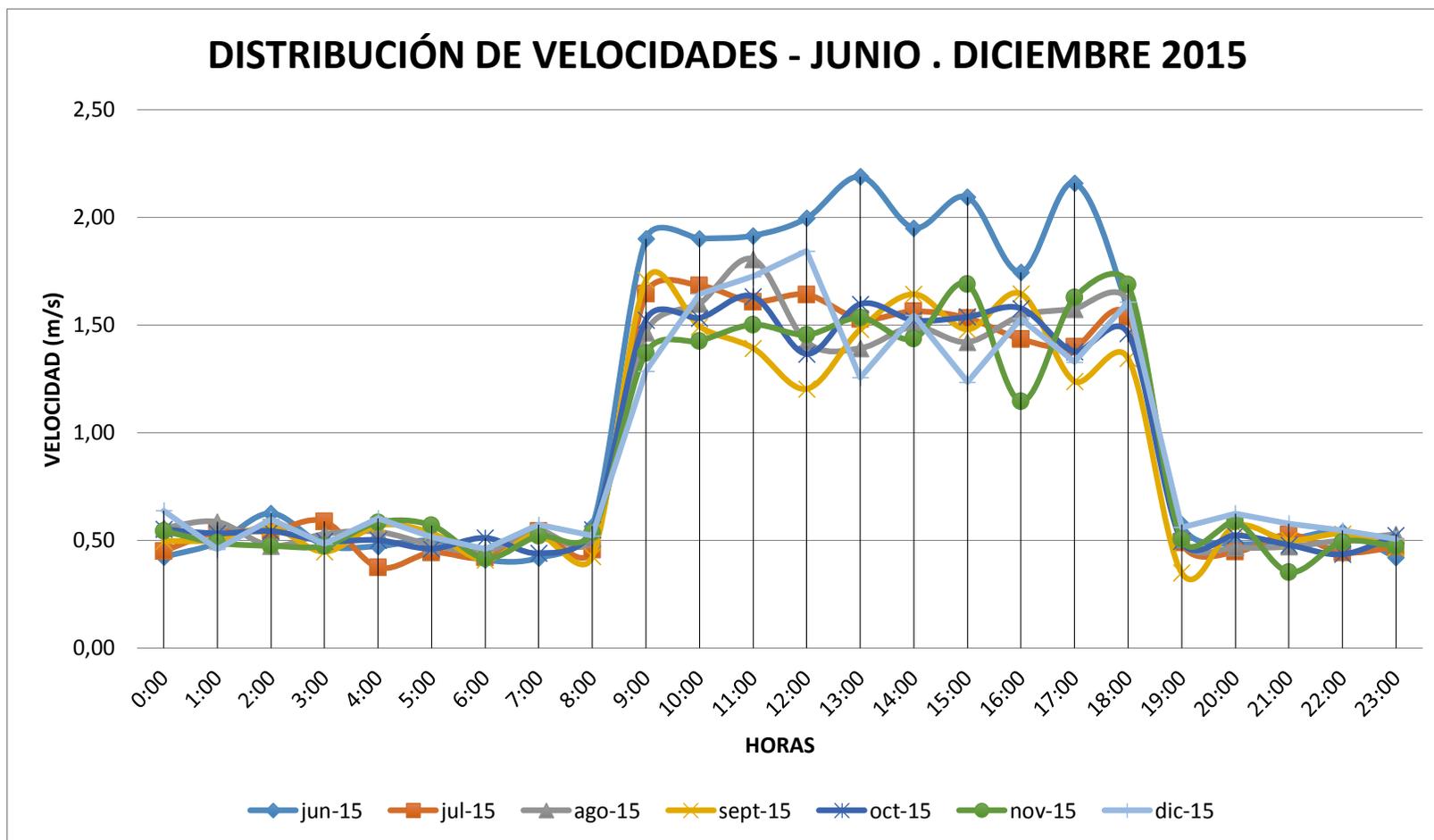
**Gráfico No. 3.2 Variabilidad de la captación eólica global año 2016**

Fuente: El autor

La metodología de fundamento científico y validación del proceso de medición eólico propuesto por (Arbeloa & Zurita, 2012), en pro de la constitución del perfil de distribuciones de Weibull para el emplazamiento, se requiere la concepción del perfil promedio de velocidades por horario, el mismo que es obtenido haciendo referencia a lo expuesto por los autores así:

"El perfil diario refleja la variación de la velocidad media del viento a lo largo de un día. Para hallar la velocidad media a una hora determinada se halla la media de todos los datos correspondientes a esa hora a lo largo de cada uno de los meses. Realizando esto para todas las horas se obtiene la curva del perfil diario." (p. 64).

De esta forma, el perfil promedio de velocidades por horario, obtenido a partir de mediciones realizadas cada hora, las 24 horas del día en un proceso de tiempo comprendido entre los meses de Junio y Noviembre del año 2015, se evidencian en los Anexos A, B, C, D, E, F.



**Gráfico No. 3.3 Perfil porcentual de ocurrencia de velocidad por horarios.**

Fuente: El autor

### 3.1.3 Distribución de Weibull local.

Tal como lo indica (Arbeloa & Zurita, 2012), su metodología de medición y comprensión de características eólicas, mediante la distribución Weibull correspondiente se representa la probabilidad de que se dé una velocidad de viento. Es decir "se trata de una expresión estadística que al variar determinados factores conocidos como factor de forma y de escala, consigue reflejar y ajustarse a los datos reales de viento de un emplazamiento correspondiente cuando se trata de mediciones en periodos no muy cortos, "(p. 64).

Un paso indicado para la presentación de la curva de perfil de distribución de Weibull es conocer el porcentaje de incidencia de las velocidades a determinados tiempos del día durante el tiempo en que se ha realizado el estudio eólico. En la Tabla No. 3.4 se presenta el porcentaje de incidencia del viento promedio de forma mensual, consiguiendo así las distribuciones de Weibull para los meses de Junio, Julio, Agosto, Septiembre, Octubre y Noviembre.

**Tabla No. 3.4 Porcentual de ocurrencia de velocidades - mensual**

<b>Velocidad</b>	<b>Junio</b>	<b>Julio</b>	<b>Agosto</b>	<b>Septiembre</b>	<b>Octubre</b>	<b>Noviembre</b>
1 m/s - 2 m/s	40,20%	53,90%	47,50%	48,77%	51,77%	43,49%
2 m/s - 3 m/s	47,30%	45,23%	52,75%	53,69%	57,50%	55,27%
3 m/s - 4 m/s	25,33%	27,83%	26,76%	27,85%	31,56%	33,62%

Fuente: El autor

Esta tabla, muestra la distribución porcentual para el promedio productivo de captación eólica, por lo que se vinculan todas las mediciones por horarios para obtener la presencia de vientos total promedio por horario de incidencia, después de la cual se obtiene la curva de distribución de Weibull.

En el caso del emplazamiento, se evidencia una elevada presencia de velocidades comprendidas entre 1 m/s y 2 m/s con un 30,05% de participación total, seguida con un 32,48% para las velocidades entre 2 m/s y 3 m/s, un 23,26% para las velocidades iniciales, consideradas de arranque, y un 14,21% final para presencia de velocidades en el rango entre 3 m/s y 4 m/s.

Como resultado de la proyección obtenida por Weibull, dentro de la velocidad del viento se evidencia un valor mayor de 1,61 m/s, un factor de escala de 1,78 m/s y finalmente un factor de forma de 2,98. Cabe resaltar finalmente que la velocidad máxima medida durante el período de tiempo fue de 3,07 m/s para el mes de junio, siendo el punto de referencia en consideraciones de medios de producción y estabilidad del diseño con respecto al nivel de rafagosidad presente en el emplazamiento.

Las mediciones se las realizaron durante un tiempo determinado de 6 meses, debido a que el patrón existente no tiene importancia dentro de este estudio de potencial eólico. La medición del viento realizada por periodos largos tiene la finalidad recopilar información que demuestre un alto índice de incidencia del viento laminar en una zona determinada, pero ese, no es el caso de esta investigación, ya que se quiere aprovechar el potencial eólico por mínimo que este sea, para lo cual se diseñará un aerogenerador de eje vertical que facilite el aprovechamiento total del viento que circula en cualquier dirección (turbulencia), desde el más suave hasta la ráfaga más fuerte que bañe una zona.

En orden a la validación del proceso de medición, tomando en cuenta para que el diseño del aerogenerador se mantenga dentro de un campo de acción de captación sin variación considerable, es importante verificar de forma general los 12 meses consiguientes al análisis específico detallado en la presente investigación. De esta forma, se procede a indicar los valores registrados para el mes de diciembre del año 2015 y los meses comprendido entre enero y noviembre del año 2016, en la tabla 3.5, se muestra la validación de las mediciones.

**Tabla No. 3.5 Validación de mediciones**

<b>Estudio de incertidumbre de la medición eólica complementario</b>	
Total de mediciones	552
Mediciones válidas	483
Porcentaje válido	87,50%
Mediciones no válidas agentes externos	41
Porcentaje no válido	7,43%
Mediciones no válidas incertidumbre	28
Porcentaje no válido	5,07%
Total	100,00%

Fuente: El autor

**Tabla No. 3.6 Mediciones promedio**

<b>CAPTACIÓN EÓLICA GLOBAL PROMEDIO</b>							
<b>JUNIO 2015 - DICIEMBRE 2015</b>							
	jun-15	jul-15	ago-15	sep-15	oct-15	nov-15	dic-15
<b>Promedio mensual</b>	1,10	0,93	0,94	0,90	0,92	0,91	0,94
<b>Promedio productivo</b>	1,94	1,56	1,53	1,46	1,51	1,49	1,50
<b>Valor máximo mensual</b>	3,07	2,40	2,35	2,86	2,45	2,36	2,45

Fuente: El autor

Como se verifica en la tabla 3.6, en el mes de diciembre el promedio mensual de captación eólica global promedio no tuvo una mayor variación, pasando de 0,91 m/s a 0,94 m/s con respecto al mes anterior. En cuanto a su valor máximo mensual, sigue una tendencia entre los 2,5 y los 3 m/s y 4m/s, aun cuando es algo menos al valor obtenido en el mes de septiembre con 2,86 m/s.

Como se menciona anteriormente, se realiza una comparación respecto al año 2016, el mismo que se llega a hacer un estudio de tipo general sobre la velocidad de captación del viento hasta el mes de noviembre, se puede observar que se mantiene una tendencia si se hace una comparación con los meses específicos tomados en el año anterior. Cabe resaltar que, en el caso de las mediciones del año 2016, el porcentaje de mediciones no válidas por agentes externos y mediciones no validas por incertidumbre dentro del proceso de medición se redujeron sustancialmente, debido a que el equipo de medición se sometió a un proceso de normalización y calibración.

En la tabla 3,7 se indica el estudio de incertidumbre de la medición eólica del año 2016, de los meses comprendidos entre enero y noviembre, así como los resultados del promedio mensual, promedio mensual en su período productivo, y el valor máximo mensual de la velocidad de captación del viento para los meses correspondientes.

**Tabla No. 3.7 Estudio de incertidumbre de medición de enero – noviembre 2016**

<b>ESTUDIO DE INCERTIDUMBRE DE LA MEDICIÓN EÓLICA ENERO - NOVIEMBRE 2016</b>											
	<b>Enero</b>	<b>Febrero</b>	<b>Marzo</b>	<b>Abril</b>	<b>Mayo</b>	<b>Junio</b>	<b>Julio</b>	<b>Agosto</b>	<b>Septiembre</b>	<b>Octubre</b>	<b>Noviembre</b>
<b>Total mediciones</b>	504	504	552	504	528	528	504	552	528	504	528
<b>Mediciones válidas</b>	472	471	533	472	481	497	459	522	498	484	491
<b>Porcentaje válido</b>	93,65%	93,45%	96,56%	93,65%	91,10%	94,13%	91,07%	94,57%	94,32%	96,03%	92,99%
<b>Mediciones no válidas agentes externos</b>	23	21	12	17	28	22	23	17	18	11	25
<b>Porcentaje no válido</b>	4,56%	4,17%	2,17%	3,37%	5,30%	4,17%	4,56%	3,08%	3,41%	2,18%	4,73%
<b>Mediciones no válidas incertidumbre</b>	9	12	7	15	19	9	22	13	12	9	12
<b>Porcentaje no válido</b>	1,79%	2,38%	1,27%	2,98%	3,60%	1,70%	4,37%	2,36%	2,27%	1,79%	2,27%
<b>Total</b>	100,00 %	100,00%	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00%	100,00%	100,00%

Fuente: El autor

Se procede a la clasificación de la información de la captación eólica global obtenida por el Data Logger paralelo como herramienta de medición, inicialmente desde una perspectiva general promedio de velocidades mensuales (Tabla No. 3.8).

**Tabla No. 3.8 Captación eólica global promedio**

<b>CAPTACIÓN EÓLICA GLOBAL PROMEDIO</b>											
ENERO 2016 - NOVIEMBRE 2016											
	ene-16	feb-16	mar-16	abr-16	may-16	jun-16	jul-16	ago-16	sep-16	oct-16	nov-16
<b>Promedio mensual</b>	0,82	0,93	0,90	0,78	0,95	0,98	0,99	0,93	0,98	0,89	0,96
<b>Promedio productivo</b>	1,27	1,48	1,44	1,06	1,58	1,63	1,64	1,58	1,60	1,47	1,64
<b>Valor máximo mensual</b>	2,50	2,33	2,87	2,45	3,16	2,62	2,57	2,71	2,91	2,50	2,71

Fuente: El autor

### 3.1.4 Rendimiento del Sistema y Potencia Adquirible.

#### 3.1.4.1 Potencia adquirible y eficiencia del aerogenerador.

Tomando en cuenta la presencia del aerogenerador basado en su disposición de eje vertical, se requiere especificar la potencia adquirible del viento. Recordando que, tal como lo expone (Mur Amada, 2012), a medida que aumenta el diámetro del rotor enfrentando el aire, y a medida que aumenta la velocidad, la potencia disponible en el viento aumenta y aparece la conformación de la terminología técnica denominada "potencia eólica aprovechable".

El cumplimiento de la ecuación de la conservación de la masa ocasiona que no toda la potencia disponible del aire pueda ser utilizada, siendo afectada por las pérdidas mecánicas en la transmisión y la eficiencia mecánica del sistema de transformación de la energía cinética en energía mecánica. De esta forma, la obtención paramétrica de la potencia adquirible del viento parte de la siguiente ecuación:

$$P_{\text{disp-min}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3$$

De esta forma, teniendo un registro de velocidades cuya incidencia se encuentra en parámetros de velocidades mínima 1m/s y pico de 3m/s, con una densidad del aire para el sector del desplazamiento de 0.9354 kg/m<sup>3</sup> y un diámetro estimado de captación de 700 mm se especifica una potencia disponible mínima y máxima aproximada de:

$$P_{\text{disp-min}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_{\text{min}}^3$$

$$P_{\text{disp-min}} = \frac{1}{2} \cdot \rho(0,9354) \cdot (\pi \cdot \frac{(0,7)^2}{4}) \cdot (1)^3$$

$$P_{\text{disp-min}} = 0,18 \text{ W}$$

$$P_{\text{disp-min}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_{\text{min}}^3$$

$$P_{\text{disp-min}} = \frac{1}{2} \cdot \rho(0,9354) \cdot (\pi \cdot \frac{(0,7)^2}{4}) \cdot (3)^3$$

$$P_{\text{disp-min}} = 4,85 \text{ W}$$

Como se observa, la velocidad de arranque mínima del aerogenerador en eje vertical sería 1 m/s, manteniendo un régimen nominal de producción promedio de 4,85W a una velocidad de 3 m/s, aún cuando aquí no se considera aún la medida de coeficiente de eficiencia de producción del aerogenerador, tal como se hace referencia en el Gráfico No. No. 1.14.

En cuestión a la facilidad de construcción para introducción de aletas de perfil NACA 15, se seleccionó un medio de construcción de tipo vertical, por lo que de acuerdo a esta disposición de potencia la eficiencia del aerogenerador con este tipo de paletas se encontraría en un rango entre 0,23 y 0,45 cm. medidos desde el centro, basado además en los resultados obtenidos dentro de la investigación sobre las velocidades del aerogenerador cuando se encuentra expuesto a vientos entre 2 y 4 m/s, de lo que se puede adicionalmente determinar el comportamiento del aerogenerador conociendo el tipo constructivo del mismo.

## **CAPITULO 4 PARAMETRIZACIÓN Y DISEÑO**

### **4. Definición de los parámetros de diseño de un sistema de aerogeneración orientado al suministro energético para producción agrícola familiar.**

#### **4.1. Necesidades de diseño**

Basado en los resultados recabados en el estudio de campo realizado en el emplazamiento correspondiente al Campus CEYPSA, sector Salache, cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi, sobre las velocidades del aerogenerador cuando se encuentra expuesto a vientos entre 2 y 4 m/s podemos, por otro lado, conociendo el tipo de aerogenerador en construcción se puede determinar el comportamiento del aerogenerador. Con la adaptabilidad que debería mantener el prototipo, con relación al gráfico No. 3.10, el mismo representa el comportamiento a diferentes velocidades del viento, independientemente de la dirección de la velocidad. Si bien es cierto el gráfico demuestra un comportamiento de curva hasta elevadas velocidades, al estar presente en el emplazamiento velocidades no mayores a 4.5 m/s el restante de la curva se cumplimentó mediante modelamiento ideal, este comportamiento no sería más que un acercamiento al comportamiento en presencia de rafagosidades.

#### **4.2 Características constructivas**

El proyecto parte de una descripción general de características constructivas del aerogenerador, tomadas de diseños genéricos de prototipos previos desarrollados bajo configuración de eje vertical, tomando en cuenta la facilidad de diseño, material de elaboración, resistencia al giro y autoprotección, entre otras características.



**Gráfico No. 4.1 Diseño base de construcción de aerogenerador.**

Fuente: <http://documents.tips/documents/estudio-diseno-aerodinamico-aerogeneradores-verticales-tipo-giromill.html>

Como se verifica en el gráfico 4.1., el aerogenerador de eje vertical cuenta de 3 perfiles aerodinámicos, los mismos que están sujetos al eje central por medio de dos barras de sujeción (superior e inferior), las cuales posteriormente girarían en dirección de la proyección del viento, para obtención de potencia generada al motor potencial para su uso final. En este punto es importante especificar que por facilidad de construcción del prototipo inicial se prefirió un tipo de perfil aerodinámico recto con proyección lo más cercana a la forma de una gota de agua, por cuanto aerodinámicamente es la forma física que mejor se comporta con respecto al paso de fluido por los límites de ella.

### **4.3 Análisis de selección de materiales.**

Para la arquitectura de este proyecto se siguieron los medios de análisis de selección de materiales para el ensamble del prototipo. El esquema de construcción por definición de materiales se expone de acuerdo a: Perfiles NACA, brazos sujetadores, el eje principal, base de colocación y parte rígida de soporte a tierra.

Fue necesario realizar un estudio a profundidad de los materiales que se utilizaron en la construcción del aerogenerador, debido a que los agentes o parámetros externos a los que se ve expuesto este, son severos y cambiantes.

#### **4.3.1. Impresión en 3D.**



**Gráfico No. 4.2. Impresora 3D con PLA y ABS.**

Fuente: El autor.

Una impresora 3D es una máquina capaz de realizar réplicas de diseños en 3 dimensiones, creando piezas o maquetas volumétricas a partir de un diseño hecho por ordenador, descargado de internet o recogido. Comúnmente se ha utilizado en el prototipado o en la prefabricación de piezas o componentes, en sectores como la arquitectura y el diseño industrial. Posee una tecnología que permite conseguir piezas utilizando como: plásticos ABS o bien PLA.

El ABS se usa extensivamente en los procesos de fabricación actuales: piezas de Lego, carcasas de electrodomésticos, componentes de automóvil. Al tener un punto de fusión alto, se puede utilizar para fabricar contenedores de líquidos calientes, se extruye de 230-260 °C y se debe imprimirlo en impresoras con base de impresión caliente, con resistencias en la base donde se deposita el material (cama).

El PLA es un producto que se vende como "natural", pues los componentes básicos son plantas como el maíz. Recientemente, este status ecológico del PLA está siendo muy discutido. Con las nuevas recicladoras que están apareciendo (la más conocida, Filabot) el ABS es mucho más ecológico que el PLA, pues estas recicladoras son cajas donde se pone el ABS sobrante, y a partir de él la recicladora nos hace una bobina de nuevo polímero.

#### **4.3.2. Brazos sujetadores de Aluminio**

El aluminio que se utilizó en los brazos para sujetar los perfiles NACA, es un aluminio con forma de "T" para obtener una mayor rigidez en el centro del brazo y evitar así fatiga mecánica y/o torsión en la longitud del brazo. Las características del perfil en forma de T se especifican dentro de la tabla No. 4.1.



**Gráfico No. 4.3. Perfiles de Aluminio tipo "T".**

Fotografía tomada por: Germánico Sinchiguano

**Tabla No. 4.1. Características del aluminio - brazos de sujeción**

Referencia	Base (B)		Altura (A)		Espesor mm.	Peso Kg/m
	Milímetros	Pulgadas	Milímetros	Pulgadas		
1001	25.40	1	25.40	1	1.60	0.219

Fuente: CEDAL (ANEXO I)

Fuente: El autor

#### 4.3.2.1 Tubo de aluminio

Por cuestión de desarrollo y formulación del mejoramiento del comportamiento de la estructura a la resistencia al paso del viento se seleccionó, el eje vertical es un tubo de aluminio con las siguientes características presentadas en la tabla No. 4.2.



**Gráfico No. 4.4. Tubo de aluminio.**

Fotografía tomada por: Germánico Sinchiguano

**Tabla No. 4.2. Características de aleación de aluminio - eje vertical**

Referencia	Diámetro (D)		Presión		Espesor mm.	Peso Kg/m
	Milímetros	Pulgadas	PSI	Km/cm <sup>2</sup>		
1013	76.20	3	540.54	38.06	1.27	0.810

Fuente: CEDAL (ANEXO J)

Fuente: El autor

Finalmente en cuestión de la referencia de especificación de dureza, resistencia a la fluencia, resistencia a la tensión y elongación que mantiene el material, a continuación en la tabla No. 4.3. se especifican sus características, siendo determinada la aleación 6061 y 6005 utilizadas para aplicaciones estructurales tales como estructuras espaciales, cuerdas, vigas, escaleras, malayos, entre otras, tal como lo especifica CEDAL en el manual del fabricante.

**Tabla No. 4.3. Propiedades de resistencia aluminio - eje vertical**

Aleación	Espesor pulgadas	Dureza (HWB) min	Resist. Fluencia (kg/mm <sup>2</sup> )		Resist. tensión (kg/mm <sup>2</sup> )		Elongación (% en 5 cm)
			Mínimo	normal	Mínimo	normal	
6061-T1	Todos	8	11	11	14.1	18	15
	T1	8	11	11.2	14.8	18.3	14
	T5	12	14	20.9	24.5	24.5	8
	T6	14	16	24.5	26.5	26.5	9

Fuente: CEDAL (ANEXO K)

Fuente: El autor

#### 4.3.2.2 Base de Acero

Para la construcción de la base que sirve de soporte, es necesario rigidez y dureza. Por ende, los materiales que se utilizaron para realizar el ensamble son tuberías de acero y correas tipo "C" también de acero.



**Gráfico No. 4.5. Tubo y correa de acero estructural.**

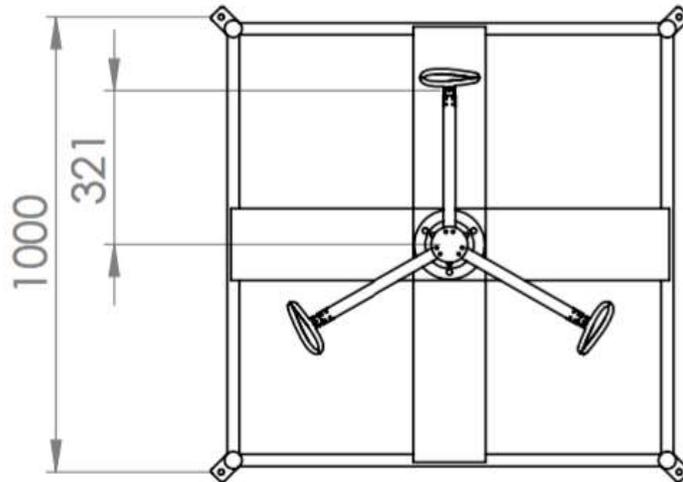
Fotografía tomada por: Germánico Sinchiguano

#### 4.4 Modelamiento del perfil aerodinámico para las condiciones del flujo eólico turbulento para condiciones locales.

##### 4.4.1. Diseño estructural del aerogenerador.

Con base en los diseños de aerogeneradores de eje vertical cuyos esquemas estructurales manejan perfiles aerodinámicos lineales de tipo NACA, a continuación, se especifican las características constructivas del diseño estructural del aerogenerador:

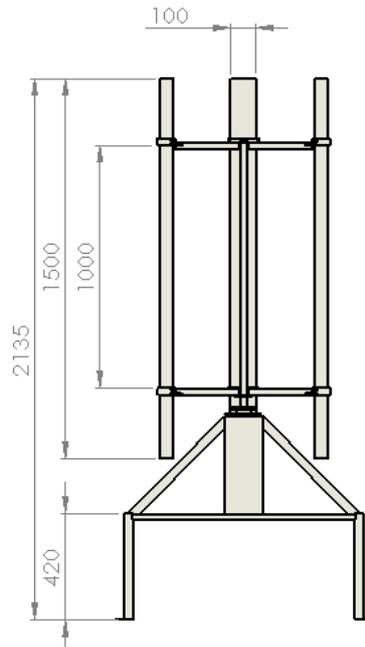
- Base rectangular de un metro cuadrado de área, con soportes diagonales para sujeción y ubicación del eje vertical del aerogenerador, tomando en cuenta una ubicación de separación de los perfiles aerodinámicos con radio de 32,1 cm. (Gráfico No. 4.6.).



**Gráfico No. 4.6. Vista superior diseño estructural del prototipo**

Fuente: El autor

- Patas de sujeción a la superficie de ubicación en tierra con una altura de 42 centímetros, los mismos que permiten reducir la influencia del desprendimiento de la capa límite del viento tomado en cuenta como fluido, ya que la ubicación es cercana a una pendiente pronunciada. La altura del eje es de 1 metro incluyendo las sujeciones, con una altura de los perfiles aerodinámicos de 1 metro con 50 centímetros, lo que daría una altura total de la estructura de 2 metros con 13 centímetros aproximadamente, tal como se presenta en el gráfico No. 4.7.



**Gráfico No. 4.7. Vista lateral diseño estructural del prototipo**

Fuente: El autor

El ensamble del mismo desde una perspectiva tridimensional, donde se clarifica la visualización del mismo, expuesto dentro del gráfico No. 4.8.



**Gráfico No. 4.8. Vista tridimensional diseño estructural del prototipo**

Fuente: El autor

#### 4.4.2. Especificaciones técnicas del aerogenerador.

Considerando las especificaciones técnicas de la velocidad y potencia adquirible del viento en el emplazamiento, además de considerar el formato constructivo que se presentó anteriormente, con características específicas para tres perfiles aerodinámicos NACA 0015, NACA 0018, NACA 0021 (Anexo G), escogidos debidamente en el marco metodológico, a continuación se presentan las características y especificaciones técnicas del aerogenerador en la tabla No. 4.4.

Se incluyen especificaciones genéricas propias de aerogeneradores de eje vertical como el ruido, tipo de generador, regulador de velocidad, capacidad de la batería si fuera conectada a electricidad y temperatura aproximada de trabajo.

**Tabla No. 4.4. Especificaciones técnicas prototipo aerogenerador.**

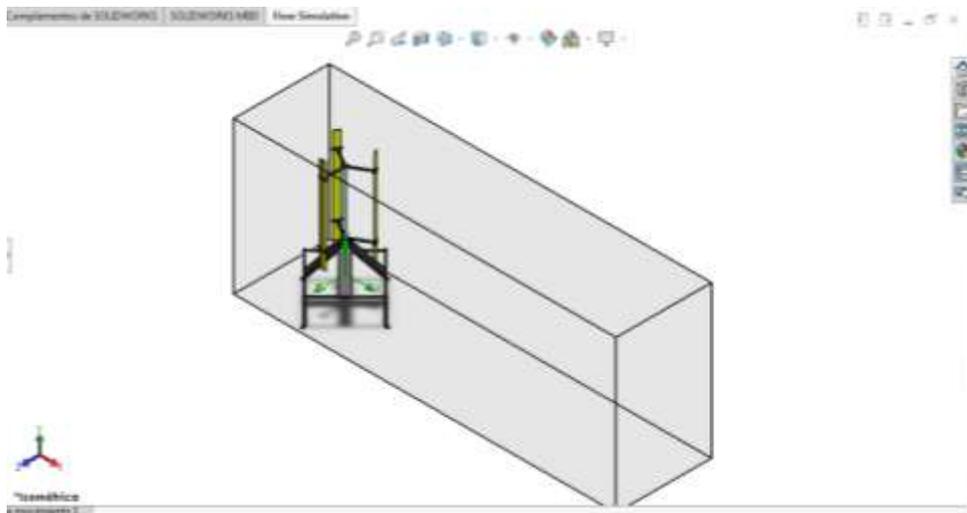
<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>VALOR NOMINAL</b>
<b>Potencia Nominal</b>	50W 10m/s
<b>Potencia Pico</b>	75W
<b>Velocidad de arranque</b>	2m/s
<b>Velocidad de trabajo viento</b>	3-20m/s
<b>Velocidad máx. resistida</b>	35m/s
<b>Ruido generado</b>	<40dB
<b>Rotor</b>	
<b>Diámetro del rotor</b>	642mm
<b>Área de barrido</b>	0.32m <sup>2</sup>
<b>Perfiles</b>	NACA 0015
<b>Material constructivo</b>	Erosión resistant aluminum
<b>Peso</b>	10.5KG
<b>Otras características</b>	
<b>Tipo de generador</b>	3 -fases AC PM, sin engranajes
<b>Regulador de velocidad y protección</b>	Controlador para cambio de sobrevoltaje
<b>Voltaje nominal</b>	DC 12/24V
<b>Capacidad sugerida de batería</b>	4pcs 9AH/12VDC
<b>Temperatura de trabajo</b>	-30°C - 50°C

Fuente: El autor

#### 4.4.3. Estudio y simulación de fluidos.

Para comprobación anterior a la construcción del prototipo diseñado, tal estructura tridimensional fue expuesta a situaciones de simulación para verificar su comportamiento a la acción de la captación del viento. Para fines de simulación se utilizó el software SolidWorks, el mismo que entregó un reporte de resultados.

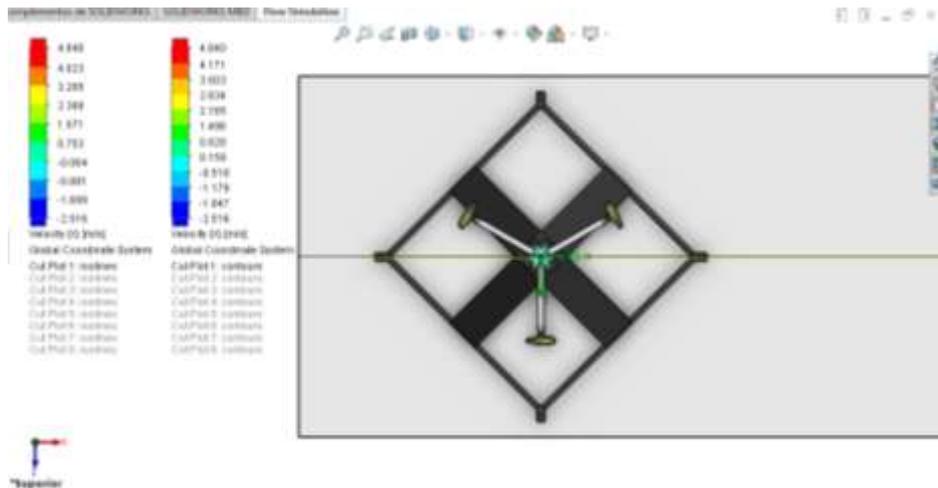
Del reporte se pueden verificar los siguientes resultados de la exposición de varios cortes realizados donde se predispone exista una mayor incidencia del viento sobre el aerogenerador. Cabe recalcar que los cortes que se realizaron para el análisis del fluido, se determinaron de acuerdo a los puntos más críticos que se determinan en la estructura.



**Gráfico No. 4.9. Vista completa ambiente de simulación de fluido**

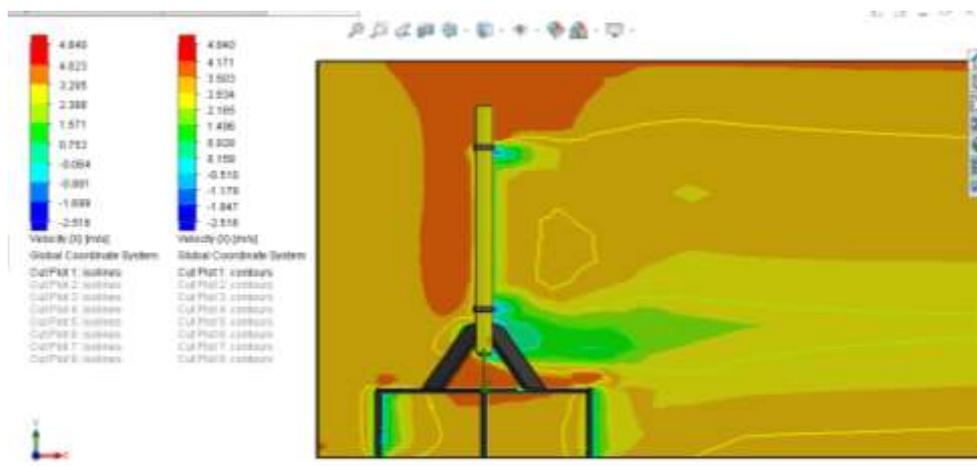
Fuente: El autor

Como se evidencia en el gráfico No. 4.9, el aerogenerador de eje vertical diseñado se lo expone a un flujo de aire horizontal dentro de un ambiente de simulación controlado para velocidades nominales de 3,5 m/s, siendo este parámetro el mejor valor de viento que se lograría en las inmediaciones del emplazamiento.



**Gráfico No. 4.10. Vista superior primer punto crítico**

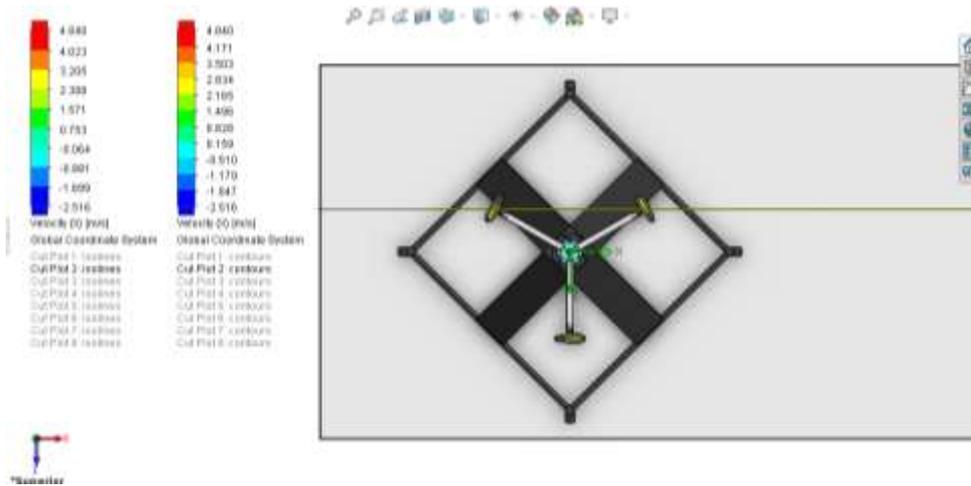
Fuente: El autor



**Gráfico No. 4.11. Simulación vista lateral primer punto crítico**

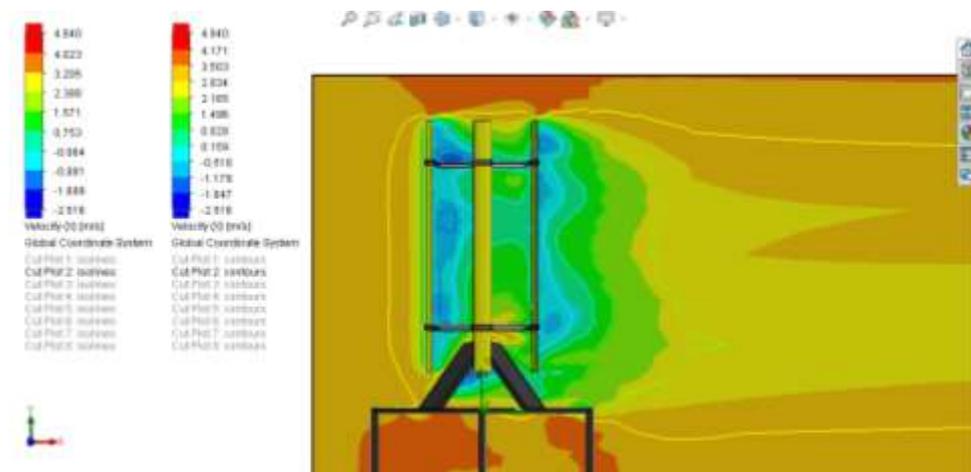
Fuente: El autor

Para razón de este primer punto crítico, como se evidencia en el gráfico No. 4.11, la simulación de la vista lateral presenta un comportamiento seguro para la captación de la velocidad del viento en este punto, con zonas de turbulencia menores que no provocarían inconvenientes en la seguridad de la estructura.



**Gráfico No. 4.12. Vista superior segundo punto crítico**

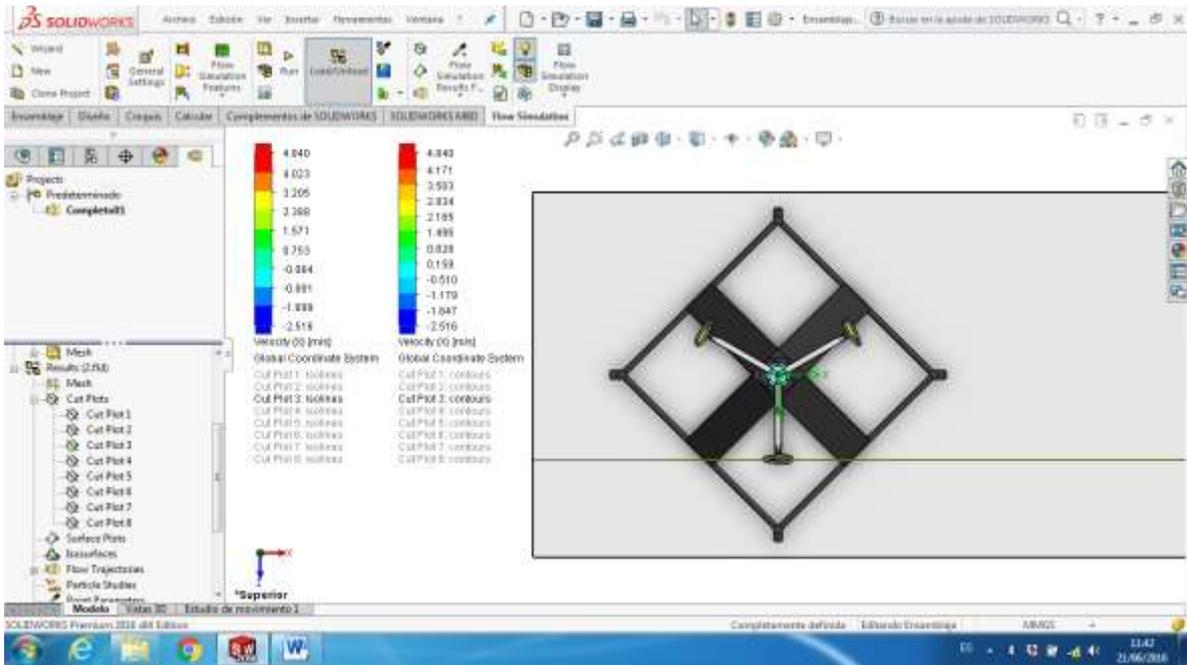
Fuente: El autor



**Gráfico No. 4.13. Simulación vista lateral segundo punto crítico**

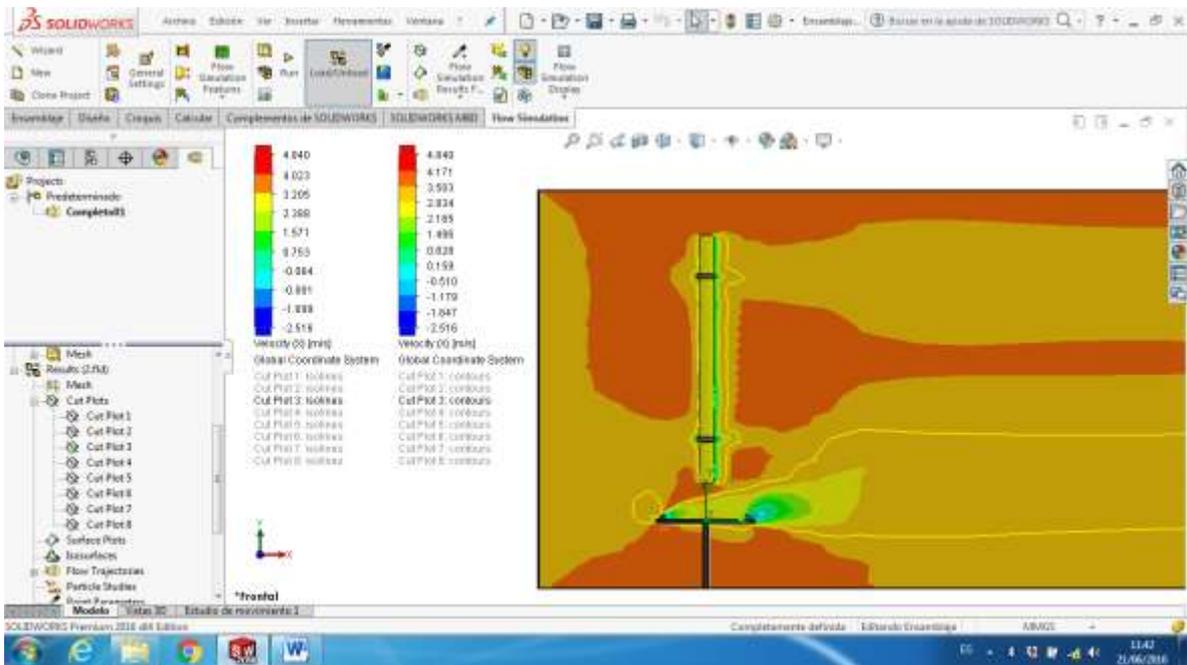
Fuente: El autor

En este segundo punto crítico, el comportamiento del aerogenerador a la captación del viento desde un medio horizontal ideal con flujo nominal es mejor aún que en el primer punto crítico. Se evidencian puntos de captación sin interferencia de comportamiento aerodinámico, debido en gran parte a la conformación de la forma de los perfiles bajo estructura. Esta simulación muestra tiene la ventaja de mostrar puntos vulnerables dentro del desarrollo o del comportamiento de aerogenerador como tal, partiendo como elemento principal los perfiles de sustentación NACA 0015, en donde su análisis principal se define en los siguientes puntos principales.



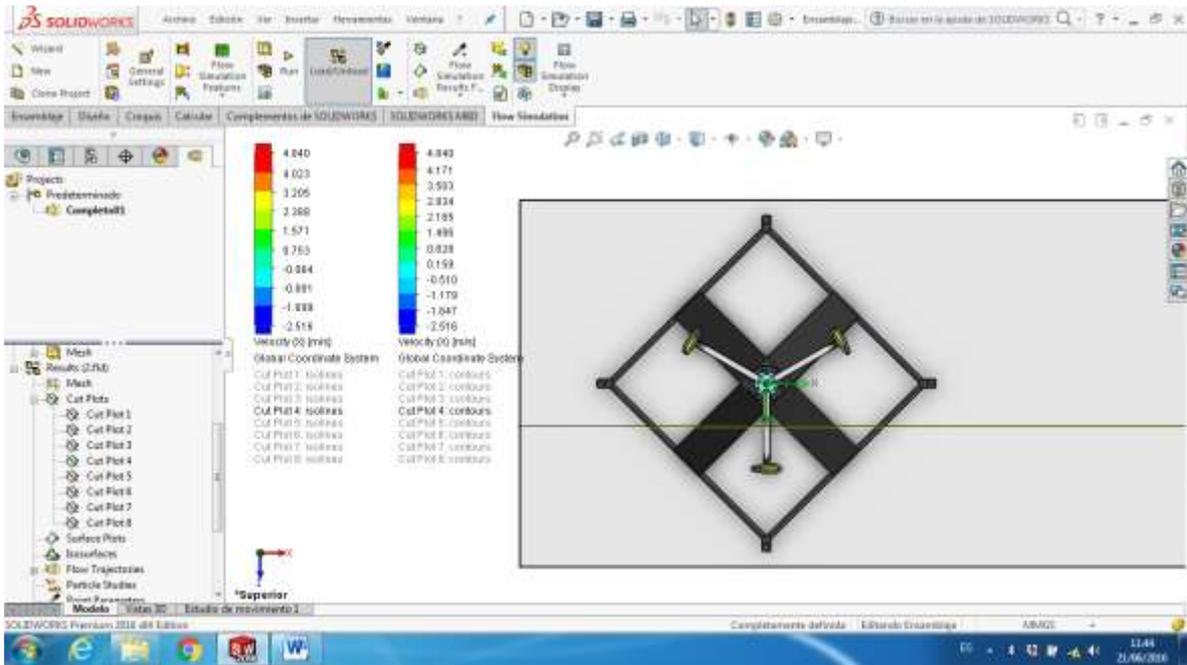
**Gráfico No. 4.14 Simulación vista superior tercer punto crítico**

Fuente: El autor



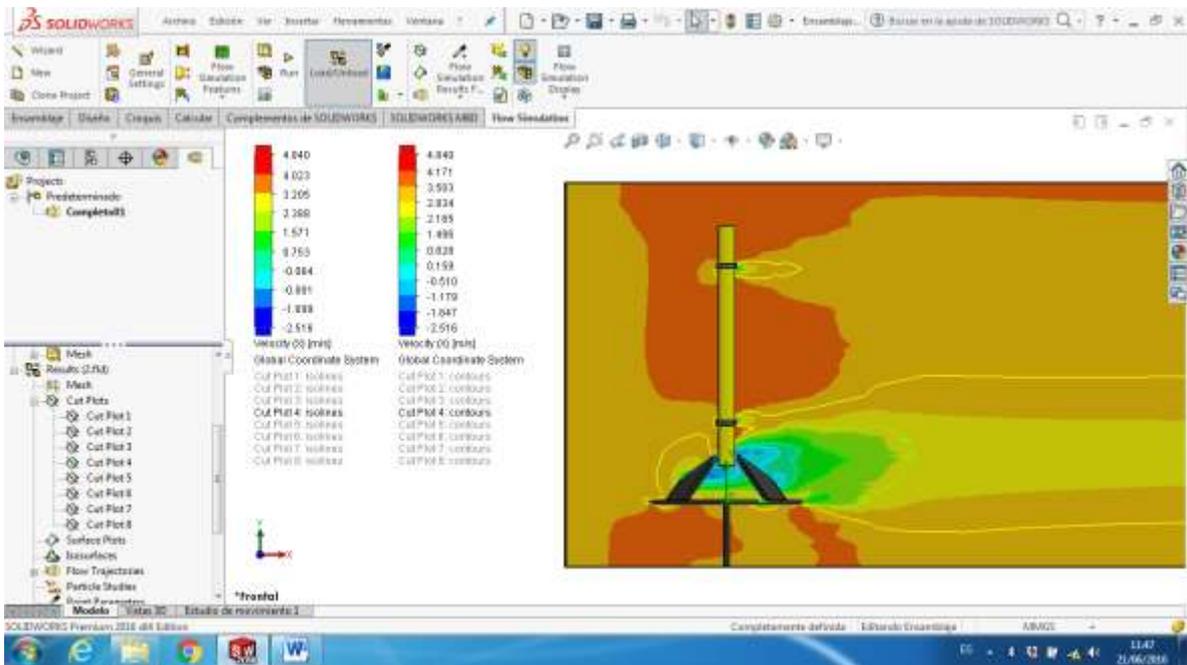
**Gráfico No. 4.15. Simulación vista lateral tercer punto crítico**

Fuente: El autor



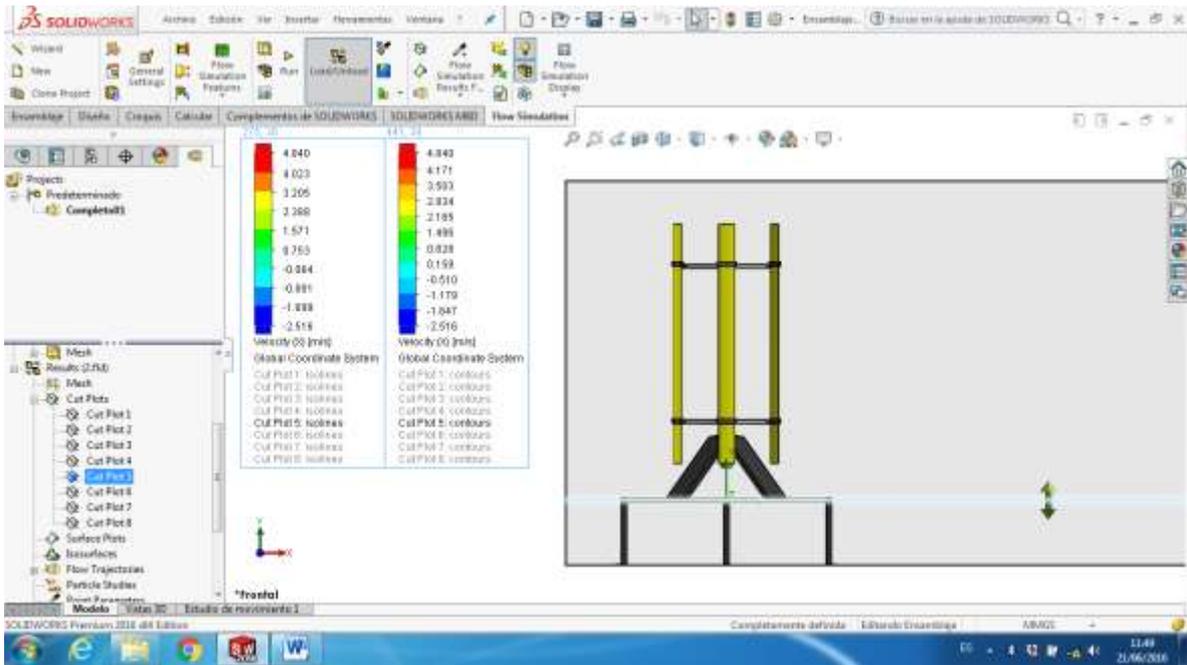
**Gráfico No. 4.16 Simulación vista superior cuarto punto crítico**

Fuente: El autor



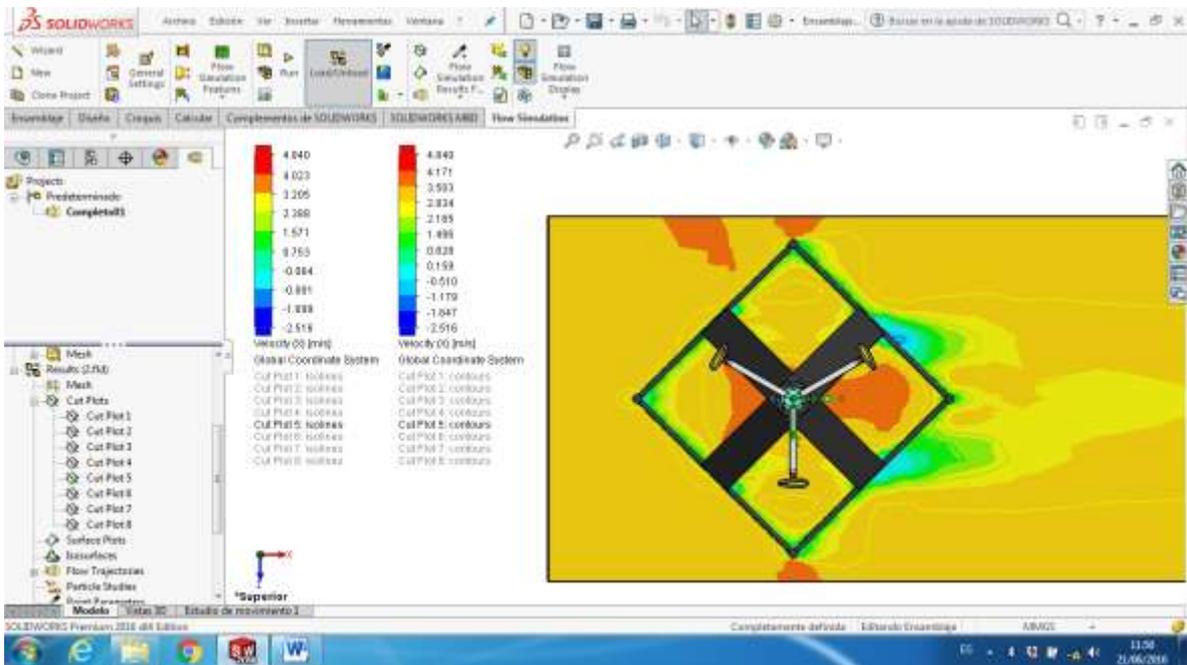
**Gráfico No. 4.17 Simulación vista lateral cuarto punto crítico**

Fuente: El autor



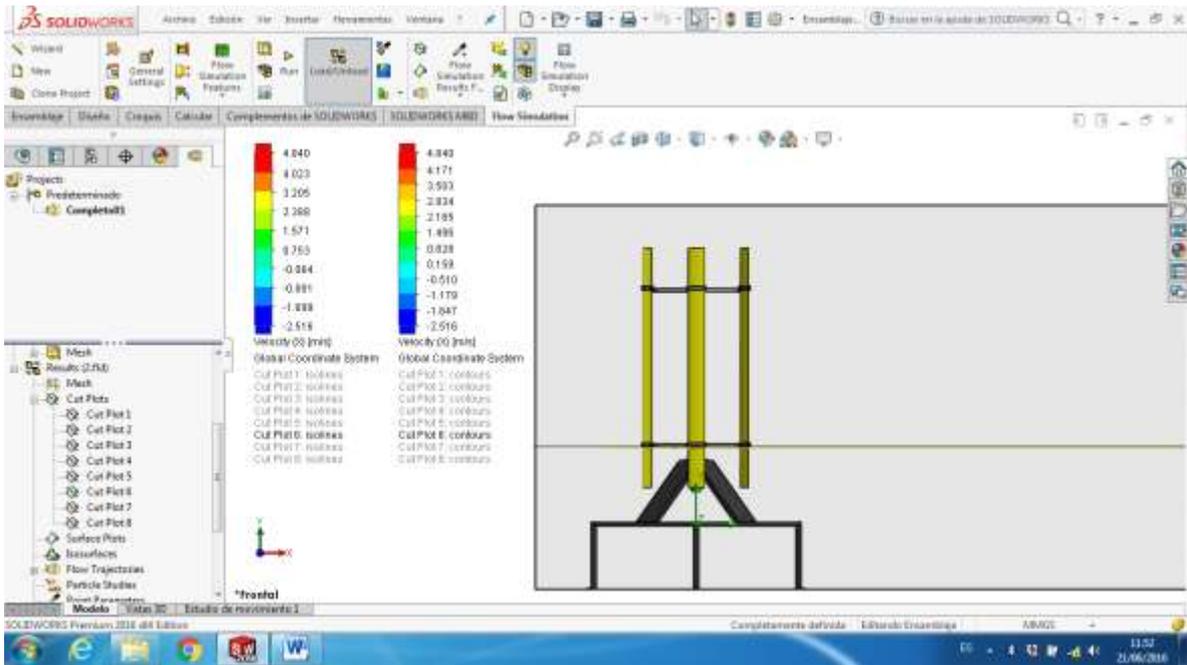
**Gráfico No. 4.18 Simulación vista superior quinto punto crítico**

Fuente: El autor



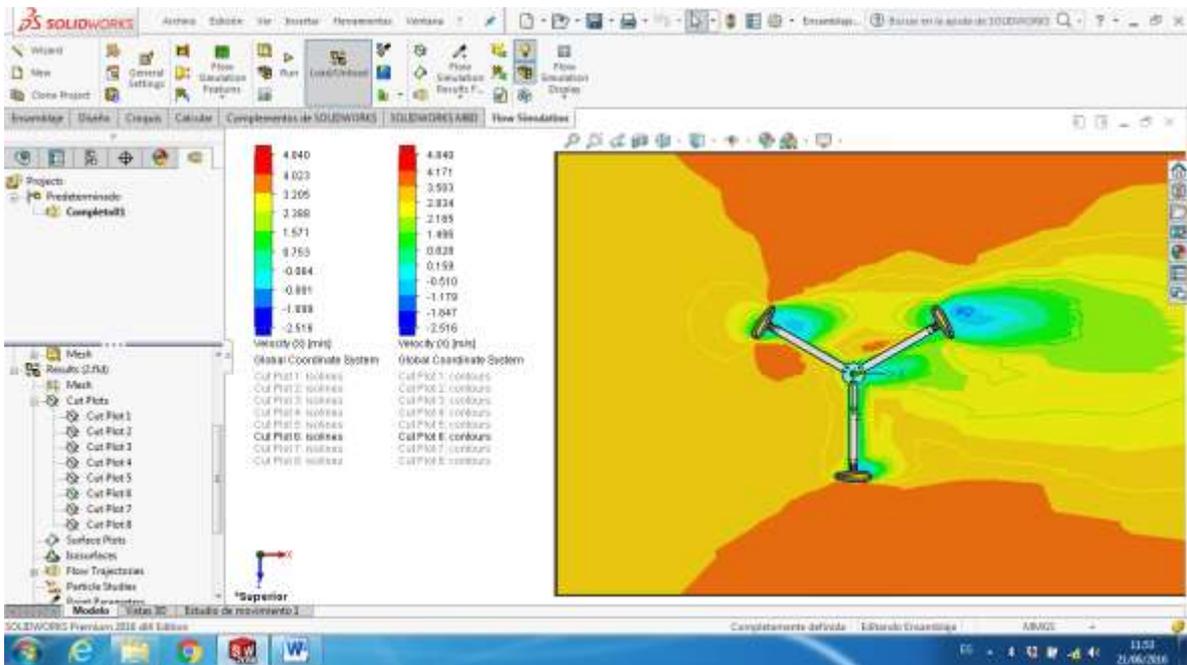
**Gráfico No. 4.19 Simulación vista lateral quinto punto crítico**

Fuente: El autor



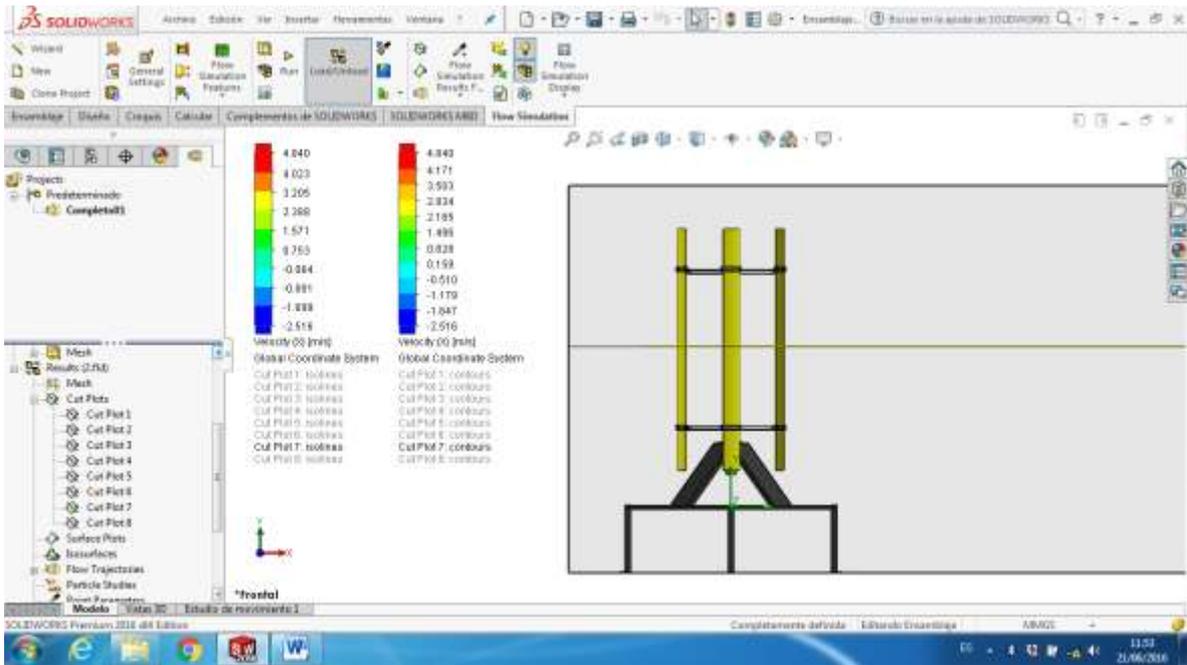
**Gráfico No. 4.20 Simulación vista lateral sexto punto crítico**

Fuente: El autor



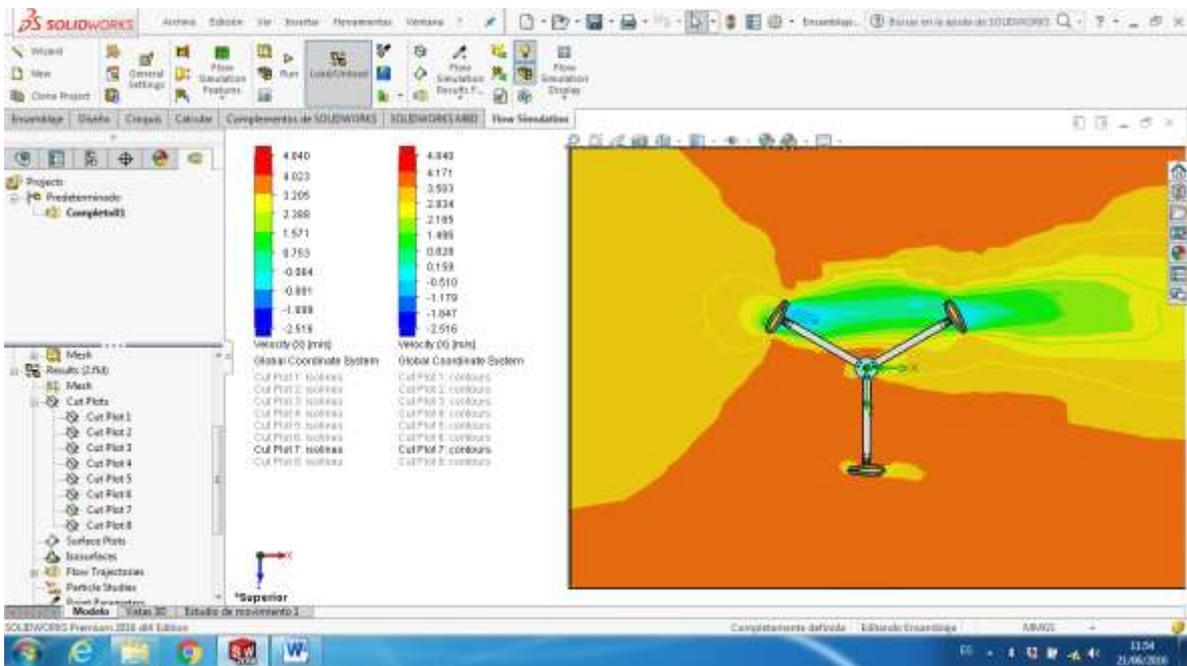
**Gráfico No. 4.21 Simulación vista superior sexto punto crítico**

Fuente: El autor



**Gráfico No. 4.22 Simulación vista lateral séptimo punto crítico**

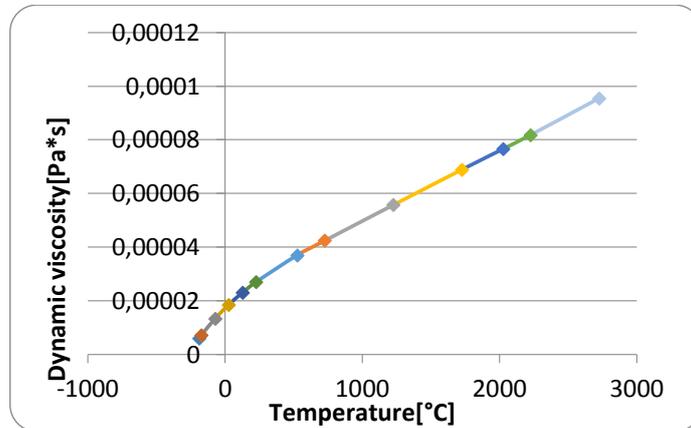
Fuente: El autor



**Gráfico No. 4.23 Simulación vista superior séptimo punto crítico**

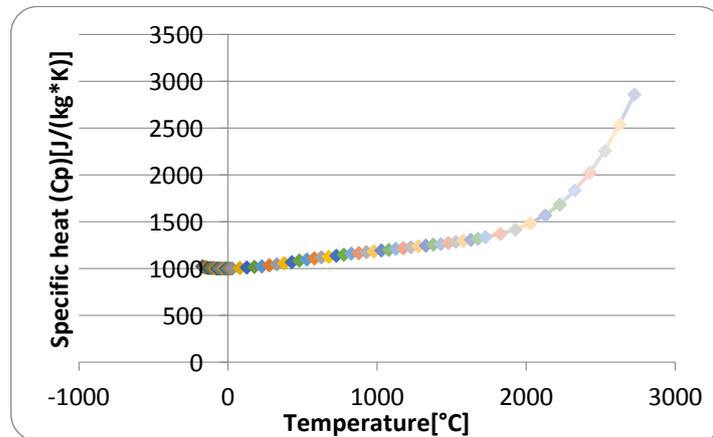
Fuente: El autor

Como puntos adicionales se presentan los gráficos de comportamiento de la viscosidad dinámica, calor específico y conductividad térmica del fluido, en este caso el aire, para fines de medios de construcción y resistencia en cuestión de materiales, expuestos dentro de los gráficos No. 4.24, gráfico No. 4.25 y gráfico No. 4.26.



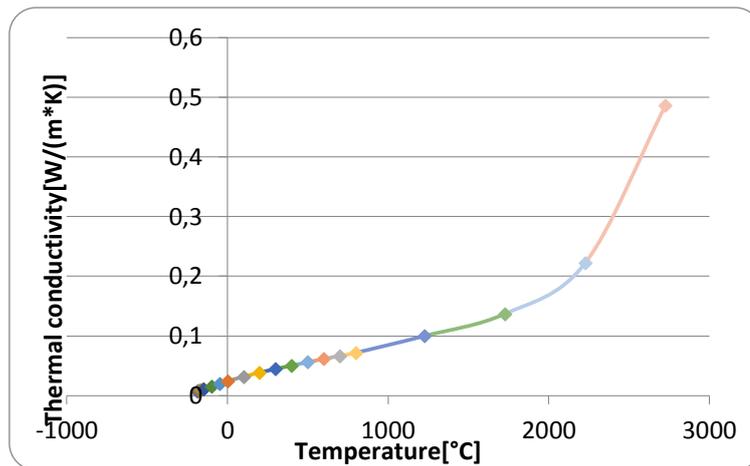
**Gráfico No. 4.24. Viscosidad dinámica del fluido.**

Fuente: El autor



**Gráfico No. 4.25. Calor específico del fluido.**

Fuente: El autor



**Gráfico No. 4.26. Conductividad térmica del fluido.**

Fuente: El autor

## **4.5 Pruebas y prototipado del aerogenerador de flujo turbulento en el Campus CEYPSA, sector Salache, Provincia de Cotopaxi**

### **4.5.1 Construcción del aerogenerador**

Para la construcción de todos y cada uno de los elementos que conforman el aerogenerador fue necesario tomar en cuenta algunas variables, que afectan directamente en los materiales con los que se va a fabricar cada mecanismo. Estas variables fueron físicas, químicas, o mecánicas dependiendo de la función que tuvo cada elemento que es parte del aerogenerador. A continuación, se detalla la construcción de cada una de las piezas y el ensamble del aerogenerador en el lugar donde se lo instalará.

#### **4.5.1.1 Construcción y ensamble del perfil NACA 0015**

Para la construcción de la NACA 0015, fue necesario un análisis previo de los materiales que se pudieron utilizar en la fabricación de la NACA. Estos materiales fueron evaluados de acuerdo a las características físicas que tienen el PLA y el ABS. Siendo el ABS el material más adecuado para la construcción, por la alta resistencia y a la temperatura y una excelente fuerza a la tracción. Cada sección de NACA está construida mediante una impresora 3D utilizando un software que diseña su parte interna. Se define previamente el grosor y la forma interna que tendrá la NACA para distribuir la carga. Definiendo la rigidez y flexibilidad de

cada una: con un grosor fino, en una abundancia del 40%, de forma hexagonal, como se muestra en el grafico No. 4.27.



**Gráfico No. 4.27. Software e impresión 3D.**

Fuente: El autor

#### **4.5.1.2 Ensamble de la NACA**

Cada sección construida tiene un segmento vacío en el centro, el cual será atravesado por una barra delgada de aluminio, proporcionando rigidez, dureza y cierta flexibilidad al perfil aerodinámico NACA 0015 de 1 metro con 50 centímetro de largo. Este ensamble se realizó con un pegamento epóxico especial como se encuentra puede apreciar en el grafico 4.28.



**Gráfico No. 4.28. Ensamble perfil NACA 0015.**

Fuente: El autor

#### **4.5.1.3 Construcción de los sujetadores.**

Al igual que la construcción del perfil NACA, el sujetador está hecho del mismo material (ABS), teniendo en cuenta que esta es la unión de tres piezas pequeñas las cuales unen el sujetador con el brazo de soporte, como se muestra en el gráfico No. 4.29.



**Gráfico No. 4.29. Sujetadores NACA 0015.**

Fuente: El autor

#### **4.5.1.4 Construcción de la estructura base.**

Para la construcción de la estructura se utilizaron dos tipos de materiales, una tubería de una pulgada y una correa tipo “C”, los dos materiales de acero, para que exista una mayor fuerza y rigidez en la base del aerogenerador (Gráfico No. 4.30).



**Gráfico No. 4.30 Estructura base.**

Fuente: El autor

#### **4.5.1.5 Preparación del suelo**

Para que exista un correcto posicionamiento del aerogenerador fue necesario colocar un cimiento recto, fuerte y rígido. Se utilizaron dos cuerpos de cemento facilitados por la universidad. Estos fueron enterrados en una posición adecuada y totalmente recta o a nivel (Gráfico No. 4.31), para que no exista inclinación alguna en la estructura y no se produzca cabeceo del eje giratorio.



**Gráfico No. 4.31. Preparación del suelo.**

Fuente: El autor

#### 4.5.1.6 Ensamble completo

Una vez construidas todas las piezas que conforman el aerogenerador, se procedió al ensamble en el sitio mismo donde será ubicado este, como se muestra en el gráfico No. 4.32.



**Gráfico No. 4.32. Preparación del suelo.**

Fuente: El autor

#### 4.5.2 Ubicación y estudio de captación eólica final

Indicado el material de utilización para la construcción, así como las características del material en cuanto a la resistencia a la fluencia, resistencia a la tensión y el porcentaje de elongación que experimentan, además de tener como base específica técnica un estudio de comportamiento de la estructura al paso del fluido, que si bien es cierto se lo presente como flujo laminar, cuando en la realidad presenta un nivel de turbulencia debido al desprendimiento de la capa límite, pero que aproxima el fenómeno a la relación estructural con soporte a la conjunción de los elementos en uno solo.

A continuación, en el gráfico No. 4.33, se indica el prototipo terminado del aerogenerador de eje vertical, tomando en cuenta las indicaciones anteriores, y simplificando el proceso de fabricación, además de ubicarlo en un punto específico al inicialmente determinado.



**Gráfico No. 4.33. Prototipo de aerogenerador de eje vertical.**

Fuente: El autor

Identificando el punto exacto de ubicación del aerogenerador es preciso realizar un estudio de captación eólico final, este estudio final mencionado mantiene las siguientes características:

- La medición se la realizó durante dos semanas (14 días), desde el día 30 de Mayo del 2016 hasta el 12 de Junio del 2016.
- Se realizaron mediciones con datos tomados cada hora en un horario productivo identificado entre las 13:00 y las 18:00.
- Se incluyeron tanto las velocidades del viento en el punto específico (m/s) y las revoluciones por minuto que se pueden obtener del aerogenerador promedio.

Fue necesario tomar mediciones en un tiempo determinado de 14 días entre las 13H00 y las 18H00, debido a que las condiciones climáticas son sumamente favorables en esas horas del día. En la noche y madrugada existen variaciones mínimas en la velocidad del viento teniendo una rafagosidad de 2 a 3 m/s de dos a tres veces de 19H00 a 05H0, además de que se está trabajando con un diseño experimental.

Con seguimiento a los parámetros de captación anteriores, a continuación, en las tablas No. 4.5, No. 4.6 y No. 4.7. se presentan los valores de captación eólica con respecto a las RPM, a la temperatura ambiente y a la humedad, obtenidas por los equipos correspondientes.

**Tabla No. 4.5. Estudio de captación eólica final**

		Velocidad del viento											
		Datos tomados cada hora											
Horas		13H00		14H00		15H00		16H00		17H00		18H00	
Unidades		m/s	rpm	m/s	rpm	m/s	rpm	m/s	rpm	m/s	rpm	m/s	rpm
Día													
30/5/16		2.2	10,8	3.3	20.2	3.1	10.9	4.2	20.5	4.6	21.4	3.2	19.7
31/5/16		3,8	20,3	2.5	9.8	3.3	22.1	3.6	20.2	2.3	10.8	3.8	20.2
1/6/16		3,3	19,8	2.1	9.1	2.8	17.2	3.1	19.2	3.8	20.1	4.1	22.1
2/6/16		4,2	21,1	4.4	21.9	3.5	20.8	4.1	20.5	2.5	11.4	2.1	10.8
3/6/16		2,4	10,9	3.1	17.8	3.4	18.8	2.8	15.7	3.5	19.6	4.3	21.5
4/6/16		3,5	18,4	3.8	19.6	3.2	17.6	4.6	20.1	4.8	21.4	3.8	20.6
5/6/16		2,5	10,9	3.1	17.6	4.2	21.4	3.8	20.6	2.6	12.6	3.8	18.9
6/6/16		3,9	19,4	3.3	18.8	2.1	10.3	1.8	8.2	3.9	19.6	3.6	19.2
7/6/16		3,2	18,8	2.1	10.4	3.5	19.1	2.4	11.2	4.1	21.2	3.8	20.2
8/6/16		2,8	11,1	3.7	20.1	2.5	10.6	3.9	20.6	2.6	11.2	4.6	21.2
9/6/16		4,1	19,9	2.6	10.5	3.9	20.6	2.2	10.4	3.1	18.3	3.3	19.4
10/6/16		3,2	19,1	2.8	11.2	2.5	11.3	6.8	24.3	4.4	21.5	4.7	22.6
11/6/16		4,2	20,8	2.7	10.6	3.5	19.5	2.8	10.7	3.4	18.8	3.9	20.4
12/6/16		2,4	10,7	3.8	19.8	3.4	19.9	3.5	20.5	3.5	20.3	4.9	22.1

Fuente: El autor

**Tabla No. 4.6. Estudio de captación eólica final con respecto a la temperatura**

		Velocidad y Temperatura											
		Datos tomados cada hora											
Horas		13H00		14H00		15H00		16H00		17H00		18H00	
Unidades		m/s	°C	m/s	°C	m/s	°C	m/s	°C	m/s	°C	m/s	°C
Día													
30/5/16		2.2	15	3.3	16	3.1	17	4.2	18	4.6	16	3.2	15
31/5/16		3.8	16	2.5	16	3.3	17	3.6	17	2.3	15	3.8	14
1/6/16		3.3	17	2.1	16	2.8	17	3.1	15	3.8	14	4.1	13
2/6/16		4.2	15	4.4	17	3.5	16	4.1	17	2.5	15	2.1	15
3/6/16		2.4	16	3.1	16	3.4	15	2.8	17	3.5	16	4.3	15
4/6/16		3.5	16	3.8	16	3.2	17	4.6	17	4.8	15	3.8	14
5/6/16		2.5	13	3.1	14	4.2	15	3.8	17	2.6	16	3.8	13
6/6/16		3.9	14	3.3	13	2.1	14	1.8	15	3.9	15	3.6	13
7/6/16		3.2	15	2.1	17	3.5	16	2.4	15	4.1	14	3.8	15
8/6/16		2.8	18	3.7	18	2.5	19	3.9	17	2.6	16	4.6	16
9/6/16		4.1	17	2.6	16	3.9	17	2.2	16	3.1	17	3.3	15
10/6/16		3.2	16	2.8	17	2.5	18	6.8	19	4.4	17	4.7	15
11/6/16		4.2	14	2.7	16	3.5	18	2.8	17	3.4	15	3.9	14
12/6/16		2.4	11	3.8	13	3.4	15	3.5	16	3.5	15	4.9	14

Fuente: El autor

**Tabla No. 4.7. Estudio de captación eólica con respecto a la humedad**

Velocidad y Humedad												
Datos tomados cada hora												
Horas	13H00		14H00		15H00		16H00		17H00		18H00	
Unidades Día	m/s	%										
30/5/16	2.2	68	3.3	70	3.1	71	4.2	72	4.6	71	3.2	72
31/5/16	3.8	68	2.5	69	3.3	68	3.6	68	2.3	69	3.8	70
1/6/16	3.3	65	2.1	66	2.8	65	3.1	65	3.8	65	4.1	65
2/6/16	4.2	70	4.4	70	3.5	71	4.1	71	2.5	70	2.1	70
3/6/16	2.4	75	3.1	76	3.4	75	2.8	76	3.5	75	4.3	75
4/6/16	3.5	77	3.8	76	3.2	77	4.6	80	4.8	81	3.8	81
5/6/16	2.5	75	3.1	73	4.2	74	3.8	75	2.6	73	3.8	74
6/6/16	3.9	78	3.3	79	2.1	78	1.8	80	3.9	81	3.6	81
7/6/16	3.2	75	2.1	74	3.5	72	2.4	73	4.1	73	3.8	71
8/6/16	2.8	72	3.7	72	2.5	71	3.9	73	2.6	72	4.6	74
9/6/16	4.1	70	2.6	72	3.9	72	2.2	71	3.1	71	3.3	71
10/6/16	3.2	74	2.8	75	2.5	75	6.8	74	4.4	72	4.7	71
11/6/16	4.2	80	2.7	81	3.5	81	2.8	82	3.4	81	3.9	82
12/6/16	2.4	85	3.8	86	3.4	89	3.5	88	3.5	88	4.9	81

Fuente: El autor

En mediciones puntuales, dentro del periodo establecido entre las 13:00 y las 18:00, tal como se evidencia en la tabla anterior, se mantienen valores en rangos entre 2.2 m/s y 4.9 m/s, habiendo registrado además valores de rafagosidad momentánea de 6.8 m/s.

#### 4.6 Análisis de factibilidad

##### 4.6.1 Gastos de diseño y construcción del prototipo

Los gastos de diseño y construcción del prototipo correspondiente al proceso de elaboración de un aerogenerador de flujo turbulento orientado a un suministro energético para producción agrícola familiar, implementado como paso inicial para demostración técnica del presente proyecto, se encuentran detallados en la tabla No. 4.8.

**Tabla No. 4.8. Gastos de diseño y construcción del prototipo (en USD)**

No	Parámetro	Cantidad	Valor unitario	Valor Final
1	Barra de aluminio (7x0,03x0,0003m)	2	9,00	18,00
2	Impresión 3D perfil NACA 0015	3	325,00	975,00
3	Sujetadores de los perfiles NACA	6	25,00	150,00
4	Perfil de aluminio "T"	2	15,00	30,00
5	Tubería de aluminio de 2"	1	11,00	11,00
7	Soportes del eje principal (circulares)	3	10,00	30,00
8	Bocín de alojamiento de rodamientos.	1	10,00	10,00
9	Rodamientos especiales para carga axial	2	5,00	10,00
10	Sujetadores de aluminio del eje principal	2	10,00	20,00
11	Estructura base	1 conjunto	160,00	160,00
12	Construcción	1 grupo	150,00	150,00
			<b>TOTAL</b>	<b>1.564,00</b>

Fuente: El autor

#### 4.6.2 Gastos de montaje e instalación

Los avalúos económicos correspondientes a los gastos de montaje e instalación del prototipo de un aerogenerador de flujo turbulento orientado al suministro energético para producción agrícola familiar, tomando en cuenta la utilización y ensamblaje de perfiles NACA 0015, incluyen los valores que derivan del estudio técnico previo de diseño y desarrollo, la instrumentación utilizada para ubicación y medición eólica posterior, la obra civil de cimentación de la base, la cimentación como tal, los sistemas de ubicación con respecto a la medición del desprendimiento de la capa límite del fluido, y un porcentaje de presupuesto para imprevistos que surgen a medida que se va realizando el proyecto. Todos estos valores se encuentran especificados en la tabla No. 4.9.

**Tabla No. 4.9. Gastos de montaje e instalación (en USD)**

No	Descripción	Tipo	Valor Final
1	Estudio técnico de diseño y desarrollo	Humano y material	100,00
2	Instrumentación	Material	50,00
3	Obra civil	Humano y Material	40,00
4	Cimentación	Material	20,00
5	Medidor de Revoluciones por Minuto		70,00
6	Medidor de velocidad del viento	Instrumento	50,00
7	Licencia de adquisición de medias de flujo eólico	Material	180,00
8	Presupuesto imprevistos prototipo	10%	100,00
		<b>TOTAL</b>	<b>610,00</b>

Fuente: El autor

#### **4.6.3 Gastos de personal y de asesoría técnica**

Para el cálculo de gastos por personal de diseño, análisis, simulación, asesoría externa y construcción del prototipo del aerogenerador de flujo turbulento orientado a un suministro energético para producción agrícola familiar, se mantiene una serie de suposiciones sobre su participación dentro del proyecto:

- El personal de diseño está inmerso en todo el proceso de conformación de la idea completa del aerogenerador, incluyendo además la participación en la elaboración del prototipo por si fuera necesario un replanteamiento de la idea original.
- El personal de análisis y simulación, establece las mediciones mediante estudio de campo en las inmediaciones del emplazamiento, y además conforma un marco de comprobación por simulación mediante Solidworks, ya que son aquellos que han tenido mayor acercamiento con las características del fenómeno eólico.
- La participación de asesorías externas, tanto en mediación de elementos de construcción cuando fuera necesario, y organizaciones de conformación estructural de los

implementos de conformación final del aerogenerador son intermitentes dentro del proyecto, por lo que sus presupuestos son los únicos que pueden variar de acuerdo a las necesidades de estudio.

Tomando en cuenta las particularidades de participación de cada uno de los elementos del personal de conformación del proyecto, a continuación en la tabla No. 4.9 se detallan los gastos efectivos de personal.

**Tabla No. 4.10. Gastos de personal (en USD)**

No	Descripción	Tipo	Valor Final
1	Estudio técnico de diseño y desarrollo	Humano y material	100,00
2	Instrumentación	Material	50,00
3	Obra civil	Humano y Material	20,00
4	Cimentación	Material	40,00
6	Copias de información bibliográfica	Material	20,00
7	Internet y búsquedas metodológicas	Material	20,00
8	Asesoría técnica de medición y recolección de información	Humano y material	50,00
9	Asesoría técnica en desarrollo de diseño, medición y prototipado	Humano y material	50,00
10	Asesoría técnica en construcción e instalación de prototipos	Humano y material	200,00
12	Presupuesto imprevistos prototipo	10%	55
		<b>TOTAL</b>	<b>605,00</b>

Fuente: El autor

#### 4.6.4. Inversión total

La inversión total estimada del proyecto de diseño y prototipado de un aerogenerador de flujo turbulento orientado a un suministro energético para producción agrícola familiar se establece en base a la sumatoria de los valores correspondiente tanto para gastos de diseño y construcción, gastos de montaje e instalación y gastos de personal participante dentro del

proceso de diseño y elaboración del prototipo. A partir de los avalúos anteriormente señalados, la inversión total se representa a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{Inversión}_{\text{Total}} = \text{Gastos}_{\text{diseño + constr.}} + \text{Gastos}_{\text{montaje + inst.}} + \text{Gastos}_{\text{personal}}$$

Reemplazando cada uno de ellos con los respectivos valores detallados en las tablas iniciales a su estudio, provee una inversión total de:

$$\text{Inversión}_{\text{Total}} = 1564,00 + 610,00 + 605,00$$

$$\text{Inversión}_{\text{Total}} = 2779,00 \text{ USD}$$

Dentro del valor expuesto de la inversión total, si bien es superior a valores de aerogeneradores de pequeña producción en el mercado actual, cabe recalcar que la medida evaluada corresponde al desarrollo de diseño y prototipo, el mismo que de acuerdo a análisis de proyectos y desarrollo esquemático, el producto en bruto siempre tendrá a ser más caro.

Para establecer la inversión inicial diferenciada al precio de producción de cada uno en las etapas post diseño y prototipado, sería necesario realizar un estudio de mercado y de selección de materiales de acuerdo a la cantidad de unidades a ser construidas, tomando en cuenta además la introducción de maquinarias automatizadas para el desarrollo efectivo de los perfiles aerodinámicos.

#### **4.6.5 Evaluación de compatibilidad**

Dentro del análisis de influencia con el entorno circundante, su afección de forma directa e indirecta con los medios de contaminación visual, auditivo y de interferencia con el hábitat y ecosistemas existentes en el emplazamiento, se evidencian los siguientes factores:

- El impacto visual dentro del emplazamiento es considerado mínimo, en razón a que la estructura mantiene un tamaño disminuido, con la inclusión de perfiles aerodinámicos NACA 0015 de dimensiones cortas ya que el medio metodológico de captación por eje vertical para su alcance dentro de las metas agrícolas es de pequeña producción.

- La contaminación sonora en el emplazamiento es prácticamente ninguna, considerando que el nivel de giro obtenido por el aerogenerador no alcanza su medida nominal, además que la presencia de perfiles aerodinámicos NACA 0015 ayudan a reducir la oposición del giro al paso del fluido por ella.
- En cuestión a la afección directa e indirecta sobre la fauna y flora que se encuentra cercano al punto de ubicación del prototipo, es importante mencionar que se visualizó poca presencia de medios vegetales y animales en el punto de medición y experimentación, siendo un lugar indicado para la ubicación y posterior utilización del prototipo dentro de medios pedagógicos y de mejoramiento del esquema de captación eólica.

#### **4.7 Conclusiones**

- En el caso del emplazamiento, se evidencia una elevada presencia de velocidades comprendidas entre 1 m/s y 3 m/s con un 69,05% de participación total, seguida con un 20,48% para las velocidades entre 3 m/s y 4 o 5 m/s, un 10,24% para las velocidades iniciales, consideradas de arranque, y un 0,24% final para presencia de velocidades en el rango entre 5 m/s y 7 m/s. Cabe recalcar que este nivel de mediciones es generalizado para el emplazamiento, por lo que una vez establecido el diseño final de captación es necesario incluir un estudio de diagnóstico adicional con mediciones horarias puntuales.
- Al verificarse en el diseño final, el aerogenerador de eje vertical posee 3 perfiles aerodinámicos, con una estructura giratoria de aluminio para aligerar el peso, y una estructura base sólida y fuerte de acero. Este conjunto, sujeta al eje central que gira en dirección de la proyección del viento, para la obtención de potencia que será transmitida al motor generador. En este punto es importante especificar que por facilidad de construcción del prototipo inicial se prefirió un tipo de perfil aerodinámico recto con proyección lo más cercana a la forma de una gota de agua (NACA 0015), por cuanto aerodinámicamente es la forma física que mejor se comporta con respecto al paso de fluido por los límites de ella.

- En cuestión de medios de simulación de la estructura para verificar su comportamiento con respecto al paso del viento, se consideró el fluido aerodinámico, tomando en cuenta puntos críticos que puedan afectar la estructura. La simulación de la vista lateral presenta un comportamiento seguro para la captación de la velocidad del viento en el primer punto crítico, con zonas de turbulencia menores que no provocarían inconvenientes en la seguridad de la estructura. En un segundo punto crítico, el comportamiento del aerogenerador a la captación del viento desde un medio horizontal ideal con flujo nominal es mejor aún que en el primer punto crítico. Se evidencian puntos de captación sin interferencia de comportamiento aerodinámico, debido en gran parte a la conformación de la forma de los perfiles bajo estructura NACA 0015.
- Para revisión final de las características de captación aerodinámica como comprobación de incidencia del viento hacia el aerogenerador en el emplazamiento establecido, el estudio de captación eólica final mencionado mantiene las siguientes características: La medición se la realizó durante dos semanas (14 días), desde el día 30 de Mayo del 2016 hasta el 12 de Junio del 2016, se realizaron mediciones con datos tomados cada hora en un horario productivo identificado entre las 13:00 y las 18:00, se incluyeron tanto las velocidades del viento en el punto específico (m/s) y las revoluciones por minuto que se pueden obtener del aerogenerador, dando como resultado una velocidad promedio de 3 y 4 m/s con ráfagas de viento de hasta 7 m/s, y un eje que gira entre 25 y 50 RPM.

#### **4.8 Recomendaciones**

- Desde el inicio un punto coordinado de ubicación potencial del prototipo dentro del emplazamiento debe ser seleccionado, tomando en cuenta la presencia de interferencias, la rugosidad del terreno, y especialmente para el caso del presente proyecto, las características de desprendimiento de la capa límite dentro del paso del viento hacia el giro del aerogenerador.
- Dentro de la selección de materiales para los procesos de construcción hay que tomar en cuenta los medios de simulación realizados, habiendo además hecho una selección de materiales por sus características de resistencia y autoprotección, aún cuando el nivel de

irregularidad del terreno no es muy elevado por lo que los procesos de destrucción del aerogenerador no participarían en el análisis final.

- Un complemento esencial para este proyecto, sería el desarrollo de un estudio de mercado posterior al desarrollo de diseño y prototipado del aerogenerador, tomando en cuenta las actuales opciones de producción dentro de medios agrícolas de pequeño y mediano alcance.
- Los medios de producción de los perfiles aerodinámicos dentro del proceso de prototipado se construyeron con una máquina impresora en tercera dimensión, aún cuando de acuerdo a estudio de resistencia de materiales, dicho proceso de producción mantiene una mayor fragilidad a la presentada por medios de fundición de material plástico o de metal, pero que por características del emplazamiento y la mínima presencia de rafagosidad lo hacía despreciable.
- En el proceso de construcción, es pertinente mantener una similitud de manejo en las distancias de los perfiles aerodinámicos con respecto al eje central de giro, además identificando las características de giro pertinentes hacia el proceso de producción energética del potencial motor a utilizarse.
- Una vez instalado el prototipo realizar una serie de pruebas aerodinámicas y de medición de la captación eólica, con miras a identificar los puntos de producción energética más eficientes, y poder visualizar de forma mecánica las formas de reducción de la resistencia de giro del eje vertical con respecto al restante medio estructural de sujeción al suelo.
- Es necesario que se busque modelos de gestión, preferentemente locales, que impulsen el desarrollo de la producción en serie y a gran escala de este proyecto como producto final.
- Una vez que se ha caracterizado el potencial eólico en la zona de estudio, es necesario que se identifiquen los lugares adecuados para una posible instalación de un parque eólico a pequeña o mediana escala.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia Insular de Energía de Tenerife. (2010). *Información general sobre energía eólica*. Tenerife, España: AITE.
- Asea Brown Boveri. (2012). *Cuaderno de aplicaciones técnicas n.º 12. Plantas eólicas*. Barcelona, España: ABB.
- Castillo, F., Montiel, R., Chacón, M., Chairizi, N., Ramijohn, A., & Barón, R. (2011). *Práctica No.2 Perfiles aerodinámicos*. Maracaibo, Venezuela: ZULIA.
- CEPYME. (2012). *Manual de procedimientos de trabajos seguros en la fabricación, montaje y mantenimiento de generadores eólicos*. Aragón, España: FundaPrevLab.
- CER Subsecretaría de Energía Eléctrica. (2008). *Energías Renovables. Energía Eólica*. Buenos Aires, Argentina: CER.
- Chávez, S. (2010). *Diseño de un microgenerador de eje vertical*. México D.F., México: UNAM.
- CONELEC. (2014). *Desarrollo de la energización rural y la electrificación urbano marginal*. Quito, Ecuador: CONELEC.
- Conrado Moreno, F. (2012). *Estimación de la energía producida por un aerogenerador*. La Habana: Independiente.
- Fernández, S. A. (2013). *Instalación eólico fotovoltaica para suministro eléctrico a un suministro de riego por goteo para uso agrícola*. Cartagena, España: UPCT.
- FINDER. (2011). *El mundo sustentables de las energías renovables*. Buenos Aires, Argentina: FINDER COMPONENTES LTDA.

- INEC. (2010). *Censo de población y vivienda 2010*. Quito, Ecuador: INEC.
- Rudnick Van De Wyngard, H. (2012). *Energía Eólica. La generación eólica*. Santiago de Chile, Chile: UCC.
- Sheldahl, R. E., & Klimas, P. C. (1981). *Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Trough 180-Degree Angle of Attack for use in aerodynamic analysis of Vertical Axis Wind Turbines*. Albuquerque, Estados Unidos: Sandia National Laboratories.
- SOLVENTA. (2004). *Introducción a las energías renovables*. Santander, España: Independiente.
- Suárez, Á. (2010). *Generador eólico de eje vertical WM*. Madrid, España: WM.
- Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico. (2014). *Programa especial para el aprovechamiento de las Energías Renovables*. México D.F., México: SENER.
- Antezana, J. C. (2004). *Diseño y Construcción de un prototipo de generador eólico de eje vertical*. Santiago de Chile, Chile: Universidad de Chile.
- Arbeloa, L., & Zurita, J. (2012). *Diseño de una erogenerador de eje vertical tipo Savonius para electrificación rural*. Pamplona, España: UPNA.
- Betz, A. (2012). *La energía eólica y su aprovechamiento mediante molinos de viento*. Göttingen, Alemania: Vandenhoeck & Ruprecht.
- Escudero, J. M. (2008). *Manual de energía eólica*. Madrid, España: Mundi-Prensa.
- FING. (2012). *Nociones generales de energía eólica*. Montevideo, Uruguay: URU.

- Fundación Energías Renovables. (2013). *El camino hacia un modelo energético sostenible*. Madrid, España: F.E.R.
- Mattio, & Tilca. (2009). *Recomendaciones para mediciones de velocidad y dirección del viento*. Buenos Aires, Argentina: CREE.
- Pérez Ramírez, R. (2006). *Diseño y construcción de un pequeño aerogenerador de 100W para su aplicación en zonas indígenas de México*. Zaragoza, España: Unizar.
- Schallenberg, J., Pienavieja, G., Hernández, C., Unamunzaga, P., García, R., Díaz, M., y otros. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética*. Islas Canarias, España: ITC.
- Studer, I. (2014). *Energías Renovables para la competitividad en México*. Monterrey, México: IGS.
- Zenit, R. (2013). *Ingeniería de fluidos. La turbulencia*. México D.F., México: UNAM.

# **ANEXOS**