

**VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL DISEÑO DE TURBINAS DE EJE  
VERTICAL PARA LA COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO  
FLUIDODINÁMICO**

**RAMSES ASAF DEL GALLEGO GOMEZ  
CRISTIAN DAVID FIGUEROA GONZÁLEZ**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA  
BARRANQUILLA - COLOMBIA  
2020**

**VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL DISEÑO DE TURBINAS DE EJE  
VERTICAL PARA LA COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO  
FLUIDODINÁMICO**

**RAMSES ASAF DEL GALLEGO GOMEZ  
CRISTIAN DAVID FIGUEROA GONZÁLEZ**

**Trabajo de grado presentado para optar al título de  
Ingeniero Mecatrónico**

**ASESORES DISCIPLINARES:  
ING. CARLOS G. DIAZ SAENZ, MSc.  
ING. JONATHAN FÁBREGAS VILLEGAS, MSc.**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA  
BARRANQUILLA - COLOMBIA  
2020**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

Firma del jurado 1

---

Firma del jurado 2

## DEDICATORIA

*Agradecemos en primera instancia a la Universidad, por permitirnos crecer como profesionales con la ayuda y el soporte de su conocimiento y personal académico capacitado. Específicamente al departamento de ingeniería mecatronica por sus excelentes profesores y profesionales que nos dieron guía para poder culminar nuestros estudios de la mejor manera. Agradecemos a nuestros asesores, el Ing. Carlos Díaz y el Ing. Jonathan Fábregas, que estuvieron guiándonos durante todo el proceso de este trabajo de grado, facilitándonos tanto el proceso metodológico, como el conocimiento específico de ciertas áreas del campo de estudio, sus recomendaciones y consejos nos llevaron a completar este trabajo de la mejor manera posible.*

*Agradecemos a nuestros padres, Luz Maritza González, Giovani Molinares, María Paula Gómez y Ramses Del Gallego por su apoyo moral, económico e incondicional durante todo el proceso de nuestros estudios, de no ser por ellos no habríamos si quiera empezado nuestro crecimiento como profesionales, ciertamente el pilar de nuestro crecimiento como personas. Ahora a un paso de culminar nuestro título como Ingenieros Mecatronicos valoramos mucho más su esfuerzo, y agradecemos cada día de su valioso tiempo para ayudarnos a avanzar por la vida.*

*Agradecemos a nuestros amigos y compañeros, con quienes crecimos, nos ayudamos y respetamos a lo largo de la carrera, apoyándonos en cada uno de los proyectos y estudios, en los momentos de gozo y de tormento, porque juntos crecimos y mejoramos.*

*Por ultimó una breve mención a la Investigadora Marsella Parra por su colaboración en los momentos finales, su apoyo apresuro una correcta culminación, sus recomendaciones y consejos pulieron este largo trabajo.*

## TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABLAS	9
LISTA DE ECUACIONES	10
GLOSARIO	11
RESUMEN	12
ABSTRACT	12
INTRODUCCIÓN	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.1. ANTECEDENTES	15
1.1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	17
1.1.2. JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE	18
2. OBJETIVOS	20
2.1. OBJETIVO GENERAL	20
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3. MARCO DE REFERENCIA	21
3.1. ESTADO DEL ARTE	21
3.2. MARCO TEÓRICO	27
4. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO	50
4.1. METODOLOGÍA	50
4.2. TIPO DE ESTUDIO	50
4.3. CRONOGRAMA – PLAN DE TRABAJO	51
5. PRESUPUESTO	52
5.1. PRESUPUESTO GENERAL	52
5.2. PERSONAL CIENTÍFICO Y DE APOYO	53
5.3. CONSULTORÍA ESPECIALIZADA	54
5.4. MATERIALES, INSUMOS Y EQUIPOS	54
6. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	57
6.1. DISEÑO DEL PROTOTIPO	57
6.2. DISEÑO DEL DISPOSITIVO FINAL	60
6.3. MATERIALES	69
6.4. RECOLECCIÓN DE DATOS	71
6.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	83

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	91
BIBLIOGRAFÍA	93
ANEXOS	107

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Grafica de eficiencia de turbina Analítica vs Experimental .....	26
Figura 2. Potencia eólica específica y velocidad del viento en condiciones normales .....	27
Figura 3. Representación Del Viento Sobre Una Hélice .....	29
Figura 4. Diseño alar.....	30
Figura 5. Apreciación de fuerzas sobre las turbinas .....	31
Figura 6. Análisis de hélice vertical .....	32
Figura 7. Rotor de velocidad variable.....	37
Figura 8. Perfiles de velocidad del terreno .....	40
Figura 9. Tipos de Aerogeneradores .....	41
Figura 10. Rendimientos [60].....	42
Figura 11. Partes de un aerogenerador estándar, eje horizontal.....	43
Figura 12. Turbina eólica eje horizontal .....	44
Figura 13. Tipos de turbina Darrie.....	45
Figura 14. Cronograma de actividades .....	51
Figura 15. Modelo de diseño #6 en SolidWorks .....	58
Figura 16. Modelo de Diseño #3 en SolidWorks .....	58
Figura 17. Prototipo diseño #6 .....	59
Figura 18. Prototipo diseño #3 .....	60
Figura 19. Modelo Construido de diseño 3 en Solidworks.....	61
Figura 20. Modelo Construido de diseño 6 en Solidworks.....	61
Figura 21. Mallado Completo .....	62
Figura 22. Mallado acercamiento 1 .....	63
Figura 23. Mallado acercamiento 2 .....	63
Figura 24. Calidad de Mallado .....	64
Figura 25. Numero de Nodos y elementos.....	64
Figura 26. Momento y Masa .....	65
Figura 27. Turbulencia .....	65
Figura 28. Rigid body.....	66
Figura 29. Simulación de turbina diseño #3 .....	66
Figura 30. Simulación de turbina diseño #6 .....	67
Figura 31. Turbina Eolica Diseño #3 Final .....	68
Figura 32. Turbina Eolica Diseño #6 Final .....	68
Figura 33. Grafica de Potencia vs Tiempo Prototipo Diseño #3 .....	84
Figura 34. Grafica de Potencia vs Tiempo Prototipo Diseño #6 .....	84
Figura 35. Velocidad Angular vs Tiempo Diseño #3 Simulados .....	85
Figura 36. Velocidad Angular vs Tiempo Diseño #6 Simulados .....	86
Figura 37. Torque vs Tiempo Diseño #3 Simulados.....	86
Figura 38. Torque vs Tiempo Diseño #6 Simulados.....	87
Figura 39. Torque vs Tiempo Diseño #3 Simulados.....	87
Figura 40. Torque vs Tiempo Diseño #6 Simulados.....	88
Figura 41. Grafica de Potencia vs Tiempo Diseño Final #3.....	89
Figura 42. Grafica de Potencia vs Tiempo Diseño Final#6.....	90
Figura 43. Trabajo Investigativo para selección de los diseños #1 Anexos .....	107
Figura 44. Trabajo Investigativo para selección de los diseños #2 Anexos .....	108

Figura 45. Trabajo Investigativo para selección de los diseños #3 Anexo.....	108
Figura 46. Trabajo Investigativo para selección de los diseños #4 Anexos .....	109
Figura 47. Torque vs Tiempo Bioinspirado .....	109
Figura 48. Cp vs TSR Bioinspirado .....	109
Figura 49. Cp vs TSR Tornado .....	110
Figura 50. Base de dispositivo .....	111
Figura 51. Soporte inferior de eje del dispositivo.....	111
Figura 52. Soporte superior L del eje del dispositivo .....	112

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 .Presupuesto general.....	52
Tabla 2. Costo personal científico.....	53
Tabla 3. Costo personal de apoyo.....	53
Tabla 4. Costo consultoría especializada.....	54
Tabla 5. Costo de materiales e insumos.....	54
Tabla 6. Costo trabajo de campo.....	55
Tabla 7. Costo equipos usados.....	55
Tabla 8. Dimensiones del dispositivo.....	69
Tabla 9. Dimensiones del Motorreductor.....	69
Tabla 10.Trabajos a seleccionar.....	71
Tabla 11.Matriz de choque.....	73
Tabla 12.Nivel de importancia matriz de choque.....	74
Tabla 13.Criterio de selección Cp.....	76
Tabla 14.Criterio de selección Rotor.....	76
Tabla 15.Criterio de selección Geometría.....	77
Tabla 16.Criterio de selección material.....	77
Tabla 17. Datos del prototipo diseño #3.....	78
Tabla 18. Datos del prototipo diseño #6.....	79
Tabla 19. Momentos de inercia diseño #3.....	79
Tabla 20. Momentos de inercia diseño #6.....	80
Tabla 21. Tabla de datos Diseño #3 simulado.....	80
Tabla 22. Tabla de datos diseño #6 simulado.....	81
Tabla 23. Tabla de datos diseño #3 Final.....	82
Tabla 24. Tabla de datos diseño #6 Final.....	82

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 Potencia de viento .....	27
Ecuación 2 Potencia del viento energía cinética .....	28
Ecuación 3 Energía Cinética.....	28
Ecuación 4 Flujo másico .....	28
Ecuación 5 Potencia de viento Remplazo 1 .....	28
Ecuación 6 Potencia del viento Resuelta 1 .....	29
Ecuación 7 Igualdad de nudos.....	29
Ecuación 8 Fuerza Turbina Darrieus.....	31
Ecuación 9 Modelo turbulencia por energía cinética .....	34
Ecuación 10 Disipación de energía cinética.....	34
Ecuación 11 Viscosidad turbulenta .....	34
Ecuación 12 Ecuación de contorno entrada 1 .....	36
Ecuación 13 Ecuación de contorno entrada 2.....	35
Ecuación 14 Ecuación de contorno salida 1.....	36
Ecuación 15 Ecuación de contornos salida 2.....	35
Ecuación 16 Ecuación de contornos solidos 1.....	36
Ecuación 17 Ecuación de contornos solidos 2.....	35
Ecuación 18 up representación .....	36
Ecuación 19 yp representación .....	35
Ecuación 20 Cuerpo tejido Fuerza aplicada.....	36
Ecuación 21 Cuerpo rígido torque.....	36
Ecuación 22 Coordenadas de cuerpo rígido .....	36
Ecuación 23 Matriz de Inercia.....	36
Ecuación 24 Contribuciones separadas.....	37
Ecuación 25 Potencia de la turbina.....	38
Ecuación 26 Angulo presión transversal .....	39
Ecuación 27 Coeficiente de potencia total .....	76
Ecuación 28 Coeficiente de potencia promedio Investigado .....	76
Ecuación 29 Coeficiente de potencia .....	85
Ecuación 30 Potencia .....	85
Ecuación 31 Potencia estándar .....	85
Ecuación 32 TSR.....	89

## GLOSARIO

**Turbina:** Máquina conformada por una rueda que se encuentra en el interior de un tambor y provista de paletas curvas sobre las cuales actúa la presión de un fluido, haciendo que esta gire.

**Eólico:** Adjetivo empleado para caracterizar a todo aquel ente, máquina, dispositivo o variaciones que trabajen con el viento para cualquier acción necesaria.

**Dispositivo:** Pieza, grupo de piezas o elementos preparados para realizar una función determinada y que generalmente forman parte de un conjunto complejo.

**Simulación:** Acción de simular. Se le atribuye al proceso de recrear cierto evento, mecanismo o situación con características similares o idénticas a las ya antes vistas o propuestas.

**Modelamiento:** Del verbo modelar. Especifica el cambio o modificación de un objeto, asimismo dar forma a algo.

**Hélice:** Mecanismo compuesto por varias palas o aspas ladeadas que al girar con fuerza alrededor de un eje desplazan el fluido en el que están.

## RESUMEN

El documento a continuación presenta la creación de un prototipo de turbina eólica de eje vertical, la cual obedece al patrón o diseño de estudiantes de la Universidad Autónoma del Caribe e investigadores externos con el propósito de evaluar, estudiar, comprobar y validar datos virtuales antes propuestos y simulados en sus trabajo; brindando así una validación técnico funcional de los diseños presentados mediante la construcción de un dispositivo físico.

Para ello se establecieron una serie de parámetros tras la lectura e investigación de múltiples diseños de turbinas de eje vertical tipo Savonius. Con ellos fue posible la selección de dos diseños base para el armado de sus debidos prototipos y simulaciones, con el fin de lograr construir un dispositivo final que arrojase los datos necesarios para cumplir con la validación del comportamiento fluidodinamico tras su debido análisis.

**Palabras claves:** Fluidodinámico, Turbina Eólica, Validar, SAVONIUS (Máximo 5)

## ABSTRACT

The document below presents the creation of a prototype vertical axis wind turbine, which follows the pattern or design of students of the Autonomous University of the Caribbean and external researchers for the purpose of evaluating, studying, testing and validating previously proposed and simulated virtual data in their work; thus providing a functional technical validation of the designs presented by building a physical device.

To this end, a number of parameters were established after reading and researching multiple designs of Savonius vertical axis turbines. With them it was possible to select two base designs for the assembly of their proper prototypes and simulations, in order to build a final device that would yield the necessary data to comply with the validation of fluid dynamic behavior after proper analysis.

**Keyword:** Fluidynamik, Eolic Turbine, Validate, SAVONIUS.

## INTRODUCCIÓN

El grave problema medio ambiental al que se enfrenta el mundo a causa de las grandes cantidades de contaminación hace que la dependencia de combustibles fósiles genere mayor preocupación con el pasar del tiempo. Es este hecho el que funge como fundamento para la presente investigación.

Con el correr de los años se ha optado por la utilización de energías alternativas y renovables, todo con la finalidad de disminuir el impacto negativo al entorno, durante la búsqueda de esta investigación se encontraron múltiples diseños de turbinas de eje vertical (tipo Savonius) no comprobados en la práctica.

De esta manera, dichos trabajos pierden una validez real a la hora de querer realizar una implementación en un entorno físico, ya que no existen pruebas de que este funcione de la misma forma en un ambiente no controlado. esto a su vez impedía la comprobación real de estos diseños como un nuevo modelo de sustento energético aplicable.

Es por esto por lo que el objetivo principal de la investigación fue validar experimentalmente el diseño de turbinas de eje vertical para la comprobación del comportamiento fluidodinámico. Dicha comprobación se llevó a cabo mediante la construcción y comparación de los diseños considerados aptos; tras un debido proceso de selección.

Además, se realizó dicha etapa de comprobación buscando existencia de variables alternas las cuales no se tuvieron en cuenta en las simulaciones teóricas (o si estas presentaron mejor o peor funcionamiento).

Debido a la cantidad de investigaciones necesarias para este proyecto se optó por la utilización de un modelo metodológico cuantitativo, el cual ayudó con el análisis de los resultados esperado de los diseños de turbinas.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad se presenta una gran problemática concerniente al medioambiente, su degradación y contaminación a causa de la explotación de recursos y cambios en los suelos, mares y aires. Salaet y Roca plantean en su documento:

“En las últimas décadas (con una ligera inflexión dada la crisis actual) se ha utilizado más petróleo, más carbón y más gas natural que nunca en la historia.” [1].

Con esto en mente, se denota la gran dependencia que se tiene hacia los combustibles fósiles y cómo se va desgastando este recurso no renovable, sin tener en cuenta las generaciones por venir.

A su vez, Colombia también se ve afectada por esta temática medioambiental, donde la explotación de recursos y dependencia del petróleo afectan a los ecosistemas.

Sin embargo también posee otra problemática, se trata de la dependencia al sistema hidroeléctrico. Tal como expresa Quintero en su investigación, se presenció que la capacidad hidroeléctrica representa un 64% del sistema eléctrico a finales de 2012[2].

Por consiguiente, en la Universidad Autónoma del Caribe se han presentado una serie de trabajos de grado cuyo propósito es el de diseñar una o varias turbinas de eje vertical, buscando una alternativa óptima a la necesidad de nuevas energías limpias para el uso diario.

No obstante, debido al reducido tiempo de un trabajo de grado, no se logra la validación mediante la construcción del diseño sino una comprobación mediante el uso del programa ANSYS de simulaciones con fluido.

Así, se encontró una problemática en la cantidad de trabajos de grado almacenados sin una comprobación experimental física que demuestre la validez de sus diseños en el aspecto real.

## 1.1. ANTECEDENTES

Una de las principales necesidades en la actualidad radica en implementar cambios en las fuentes para la generación de energía, este hecho se ejemplifica perfectamente en el documento de Pesca y Torres, donde especifica que

“Para finales del año 2011, la energía eólica contaba con una capacidad mundial instalada de aproximadamente de 203.500 MW, lo cual representa alrededor del 1% del consumo de electricidad mundial. Hasta el 2010, Colombia contaba con una capacidad instalada de 19.5 MW, lo cual representa únicamente el 0.14% de la producción total de energía eléctrica...” [3].

Demostrándose así la necesidad que existe en Colombia de un avance referente ante el uso de energías renovables, con la finalidad de mejorar la dependencia ante energías contaminantes o inestables.

Por el contrario, se evidencia en un estudio realizado por Pinilla el alto porcentaje que poseen los territorios europeos entorno a la generación de energía mediante un medio renovable, manejándose en un rango que va desde un 6% hasta un 19% [4].

En base a lo anterior es preocupante la situación colombiana debido a que, como también argumentan Ayhan, Dursun y Saglam, Colombia sigue sin superar el 0.14% hoy en día, señal alarmante a la necesidad de invertir tiempo y estudio en llevar a cabo soluciones a la realidad [5].

Mateus presenta además, que a lo largo de los años en Colombia, debido a la dependencia fuerte al petróleo e hidroeléctricas, se ha ido creando una crisis agravada por los constantes cambios climáticos del país y múltiples desastres como el fenómeno del Niño, confirmando aún más que el apego total a una sola forma de generación de energía es una problemática [6].

Por consiguiente, Gómez en su investigación menciona que "...en la medida que la hidrología es afectada por fenómenos climáticos como el fenómeno de El Niño, que para Colombia se caracteriza por la ausencia de lluvias y aumento de la

temperatura.” Con esto se demuestra que en caso de un fuerte impacto del fenómeno del Niño, Colombia podría quedar fácilmente afectada por el demandante 64% de energía hidroeléctrica que genera [7].

Así mismo, gracias a la investigación de Orduz y Pérez, se abarca el hecho de que existe una necesidad aún más fuerte por implementar este tipo de energías en zonas no rurales o de difícil acceso, ya que en ellos se puede encontrar un recurso eólico apreciable, como apoyo a otros sistemas de generación alternos [8].

En estudios realizados por Benavides, Mejía y Ciro se evidencia que debido a diversas crisis en las formas de obtención masiva de energía en Colombia, se han presentado fallos eléctricos que pueden ir desde altos y bajos en los niveles de energía hasta inclusive apagones. Esto conlleva a que aún existan 1.710 poblados a los cuales no se les brinda servicio de energía [9].

Cabe destacar que en el trabajo de Polo, Rodríguez y Sarmiento, se plantean las diversas problemáticas sufridas en Colombia, en el área de la generación de energía y cómo se desperdician sus capacidades geográficas. Tomando en cuenta dichas cualidades, se estima lógico potenciar el estudio, reforzamiento e implementación de energía eólica para brindar sustento y energía constante a la mayor parte del país [10].

A su vez, en diversos estudios realizados por Miranda en 2019 se estipula que en el Mar Caribe se encuentran fuertes vientos alisios de 7 a 13 km/h, con esto en cuenta el uso de turbinas eólicas de eje vertical es factible en el aprovechamiento de dichos fuertes vientos para la recolección y generación de energía eléctrica [11].

Por último, las investigaciones de Buendía manifiestan que los fallos eléctricos y daños al medio ambiente por la alta extracción de petróleo en La Guajira no deberían presentarse puesto que, si se aprovechase la generación de energía eólica en dicha zona geográfica, sería posible generar un 20% de energía limpia a mediano plazo con la creación de algunos parques eólicos [12].

## **1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

En la Universidad Autónoma del Caribe se han presentado una serie de trabajos de grado relacionados al diseño y modelamiento de turbinas eólicas de eje vertical. Estos fueron propuestos para conseguir un medio de energía amigable con el medio ambiente.

Diversos investigadores se han dispuesto a la tarea de diseños innovadores que aprovechen de manera eficiente la potencia del viento para la generación de energía eléctrica. Sin embargo por diferentes factores, mayoritariamente falta de tiempo, no se han podido implementar dichos diseños en la realidad, dejando únicamente una validación numérica mediante el uso de una herramienta de simulación digital.

Con lo planteado anteriormente se presenta la siguiente interrogante:

¿Los diseños recientes presentaran una similitud en el comportamiento fluido dinámico en un ambiente real de acuerdo a su respectiva simulación en la herramienta digital?

## 1.2. JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE

El presente proyecto se basó en la comprobación de estudios teóricos previamente realizados en diversas partes del mundo, y la comparación de cada uno de estos para la posterior selección de los dos modelos más eficientes encontrados.

Esta selección de modelos fue utilizada para la fabricación a escala de las turbinas, con el fin de demostrar su eficiencia en el campo y validar si coinciden con los datos previamente realizados en estudios recientes. De esta manera se logra aportar nueva información verídica al uso de turbinas eólicas de eje vertical, además de permitir el uso de estos diseños de turbina como alternativas funcionales y comprobadas de energía limpia.

También cabe recalcar los diversos impactos que tendrán la comprobación de estos diseños y la demostración de su competencia, permitiendo así realizar cambios a nivel social, tecnológico y ambiental. Cada uno de estos sustentados con estudios previamente realizados que aportarán firmeza a la comprobación de estos datos.

Por consiguiente, tras realizar la validación principal de los datos y creación de los dispositivos, se obtuvo un prototipo de impacto en el área tecnológica y de innovación debido a que puede ser empleado como base de investigación para avanzar en el uso de turbinas eólicas de eje vertical, además de comprobar su efectividad en diversos campos y su eficiencia en diversas situaciones de trabajo.

Se dio a conocer también el impacto ambiental del dispositivo, permitiendo comenzar el desligamiento del combustible fósil y presentando datos estadísticos (comprobados), los cuales muestran la operatividad de los dispositivos en el campo, siendo demostrados con proyectos en proceso de ejecución en el país:

“Colombia por su parte anuncia plan de energía eólica por US\$700 millones. El proyecto se construiría en la Guajira, aprovechando los vientos que se dan en esta zona del país, permitiendo garantizar un abastecimiento eléctrico y aumentar su

capacidad instalada en los próximos 15 años, según informó el Ministerio de minas y energía. Colombia busca con los proyectos eólicos aumentar su capacidad de generación en 20%, es decir, una quinta parte de su capacidad actual con una fuente renovable diferente a agua” [13].

Teniendo en cuenta diversos casos ya vistos alrededor del mundo, se puede conocer que los beneficios de la energía eólica a largo plazo representan un impacto positivo en el medio ambiente. Como ejemplo, según el portal especializado en este tema, Abo Wind, Alemania genera alrededor del 33% del total de su energía a través del viento; Dinamarca, 25% y España, 20%, convirtiéndose en los proveedores de 75% del total de energía eólica en Europa [13].

Gracias al conjunto de estos datos estadísticos, se puede plantear una idea base del impacto ambiental que tendría a largo plazo la implementación de este modo de energía renovable, incluso sin tener que llevarlo a temas globales de generación de energía en masa. Con un viento de  $\frac{4}{5}$  m/s se puede llegar a generar de 2000 a 2500kW, lo cual como reducción principal en la factura de energía por un dispositivo no tan costoso, sería beneficioso a mediano plazo [13].

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Validar experimentalmente el diseño de turbinas de eje vertical para la comprobación del comportamiento fluidodinámico.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- 2.2.1. Establecer parámetros de selección para turbinas de modelos simulados.
- 2.2.2. Seleccionar los diseños modelados de turbinas de eje vertical para su debida construcción.
- 2.2.3. Examinar de manera técnica y funcional el comportamiento fluido dinámico de los diseños seleccionados.

### 3. MARCO DE REFERENCIA

#### 3.1. ESTADO DEL ARTE

A continuación se adjuntan los diversos trabajos, ensayos y proyectos de grado que fueron utilizados como punto de partida, soporte y sustento de este proyecto de investigación. Tomando datos, información y gráficas cruciales o de mediana importancia para el emprendimiento y oportuna realización del proyecto.

- **Las energías renovables en el ámbito internacional:** Este artículo logra analizar el presente cambio de las energías renovables y la situación actual de las mismas a nivel internacional, más específicamente la Unión Europea. Se estudia la evolución del mix energético y posteriormente se analiza la situación de los diferentes recursos renovables, considerando así la situación de las energías renovables en cinco países concretos; así como la visión de tres importantes instituciones internacionales [14].
- **La energía eólica en Alemania: experiencias a tener en cuenta para el caso colombiano:** El siguiente trabajo plantea múltiples beneficios de la energía eólica, además de un aporte de estudios teóricos que fundamentan la implementación de éstas en países varios, con la finalidad de recrear como sería la situación en Colombia, con las bases investigativas que éste presenta, y generar así una base de investigaciones sobre la cual generar más diseños funcionales en el país [15].
- **Diseño de una turbina eólica de eje vertical con rotor mixto:** Este trabajo, además de aportar un nuevo diseño eficiente de turbinas de eje vertical, generó posibles métodos de selección para la turbina final, al colaborar con el planteamiento de las múltiples ventajas de los rotores mixtos y su aplicación en la región de Magallanes [16].

- **Diseño y construcción de un prototipo de generador eólico de eje vertical:** Analizando la comparación de su diseño de aerogenerador, que presenta una eficiencia del 12% (2% más que el común), esta investigación ayudó a establecer parámetros de selección para las diferentes turbinas a estudiar en túneles de viento [17].
- **Modelado de la interacción fluido-estructura (FSI) para el diseño de una turbina eólica HAWT:** Gracias al estudio de la relación entre fuerzas de flujo, deformaciones y tensiones inducidas en la estructura presentado en este trabajo, mediante un modelo de interacción de estructura fluida (FSI), se lograron establecer parámetros de mejor manera para la selección del diseño de turbina eólica a construir [18].
- **Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de 60W, para el suministro eléctrico de zonas urbanas:** Analizando el enfoque en la determinación y viabilidad del potencial eólico para el lugar de trabajo, selección de la turbina más eficaz según las necesidades, diseño del generador eólico, fabricación, montaje y resultados que presenta este documento, se tomó como base fundamental para plantear y comprender con mayor efectividad los diversos ámbitos de aplicación de una turbina eólica [19].
- **Modelado computacional del comportamiento fluidodinámico de una turbina eólica bioinspirada:** Debido a que este proyecto incluye tantos estudios, medidas y análisis de variables para proponer un diseño de turbina eólica de eje vertical, no fue posible comprobar experimentalmente sus conclusiones en el corto tiempo planteado. Sin embargo, en la presente investigación se podrá observar el estudio de, así como este, muchos otros trabajos que no pudieron llegar a la construcción física por diversos motivos, para entregar mayor validez y certeza a sus investigaciones [20].

- **An inverse method for optimization of geometric parameters of a Savonius Style wind turbine:** En esta investigación se detalla la optimización de una turbina Eólica de estilo SWT, utilizando la metodología de optimización inversa, basada en la evolución diferencial para satisfacer simultáneamente una potencia y características de torque dadas. Consiguiendo así aportar nuevos modelos de estudio a las turbinas de tipo Savonius [21].
- **Análisis y optimización aerodinámica del prototipo de turbina eólica tipo savonius implementado en la facultad tecnológica:** Gracias a este estudio se reconocieron variados errores y fallas en la estipulación de turbinas eólicas de eje vertical mediante el programa de ANSYS. Esto representó un factor a tomar en cuenta a la hora de estudiar y comparar su eficiencia completa [22].
- **Diseño y fabricación de los álabes de un micro-aerogenerador de baja potencia:** Este estudio demuestra el por qué las validaciones de los datos teóricos llegan a ser necesarias, puesto que plantea diversos diseños para aumentar la eficiencia de la turbina eólica y que ésta genere mayor energía, lo cual a su vez requirió de una validación experimental física [23].
- **Modeling and Comparative Performance Analysis of Different Bladed Vertical Axis Wind Turbine (VAWT):** El rendimiento se analizó con respecto a la velocidad y el número de cuchillas en términos de RPM, voltajes, par y potencia. Los resultados concluyeron que el VAWT de tres palas presenta mayor efectividad que otros VAWT de tres palas diferentes, demostrando así la necesidad global de la validación de los diseños y la importancia de la comparación de los mismos [24].

- **Design and CFD study of a hybrid vertical-axis wind turbine by employing a combined Bach-type and H-Darrieus rotor systems:** Mediante el diseño de una innovadora turbina híbrida de eje vertical (VAWT) este trabajo toma como objetivo principal la optimización de esta misma. Esto ayudo a aumentar la eficacia a la hora de seleccionar los dispositivos, gracias a que se tuvo en cuenta las especificaciones presentadas para posibles comparaciones entre las propuestas de diseño [25].
- **Analysis of the Design Parameters Related to a Fixed-Pitch Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine:** La anterior investigación pretende identificar y analizar críticamente los principales parámetros de diseño relacionados con SB-VAWT para su rentable aplicación en zonas urbanas. La implementación propone hacer cambios en el material y algunos breves en el diseño para reducir su valor y así poder probar su eficiencia completa en campo, justificando el porqué del avance en los estudios de turbinas de eje vertical [26].
- **Design and validation of vertical axis wind turbine for clean energy generation:** El presente trabajo tiene como finalidad el diseño de un aerogenerador de eje vertical que pueda ser fácilmente implementado como alternativa energética en viviendas con deficiencias en cuanto a este servicio, de esta manera se busca promover la igualdad de oportunidades y acceso a los servicios básicos de la población, otra justificación válida para profundizar en este tipo de estudios de energías renovables [27].
- **Diseño y modelamiento de un aerogenerador Vawt Darrieus tipo H para la zona costera del departamento de Córdoba:** Este artículo exhibe los resultados de una investigación experimental y un análisis numérico tridimensional de los fenómenos aerodinámicos transitorios. Estos ocurren en la modificación innovadora de la turbina eólica clásica Savonius,

presentando la optimización y corrección de estructuras que pueden afectar la eficacia del rotor [28].

- **Diseño y modelamiento de un aerogenerador Vawt Darrieus tipo H para la zona costera del departamento de Córdoba:** La utilización de herramientas de simulación, el análisis de sus características y la modificación mediante herramientas digitales son motivos por los cuales este artículo apoyó en gran medida a la investigación. Corrobora lo importante de utilizar medidas tanto experimentales como digitales para el avance en campos de eficiencia energética [29].
- **Experimental study of yawed inflow around wind turbine rotor:** Con esta investigación se logra documentar la comprensión de los múltiples beneficios de las turbinas de eje vertical, además de su gran disposición para la creación de diseños cada vez más eficientes y originales entre sí. Al tener en cuenta la múltiple cantidad de variables que afectan al rotor únicamente, se puede comenzar a imaginar lo mucho que falta por indagar en el campo de turbinas eólicas [30].
- **Low speed permanent magnet synchronous generator for vertical axis wind turbine:** Este documento presenta cómo la pequeña planta de energía eólica (SWPP) tiene la capacidad de satisfacer un hogar con el voltaje generado. Un importante detalle que ayudó a argumentar la profundización por parte de los investigadores en el campo de energías renovables, directamente energías eólicas y cómo estas podrían revolucionar poblados en algunos años [31].
- **Mathematical toolbox and its application in the development of laboratory scale vertical axis wind turbine:** En el presente artículo se observa la realización de un previo estudio analítico mediante simulación para una turbina de eje vertical, y como ésta genera una enorme ganancia

a la hora de compararla con una simple turbina de eje vertical, presentado en la gráfica de la Figura 1:

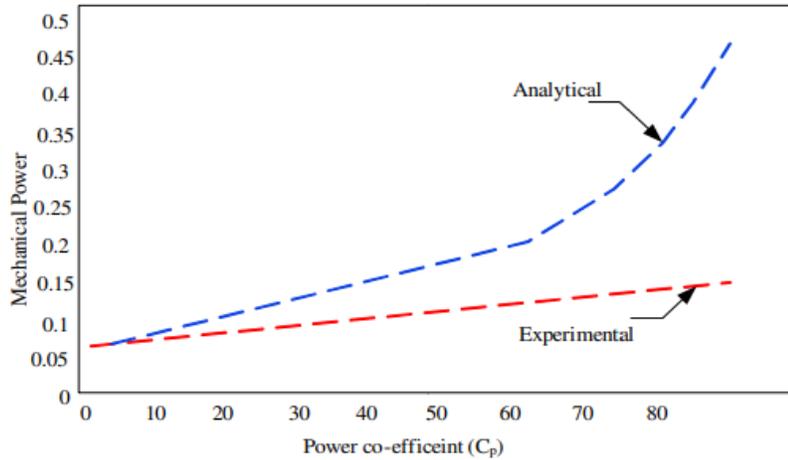


Figura 1. Gráfica de eficiencia de turbina Analítica vs Experimental [32].

Tras construir la versión analítica de la turbina, la comparación al modelo básico demostró la importancia de un buen proceso de análisis y diseño previo a la hora de trabajar en esta área de desarrollo [32].

- **Design and development of hybrid vertical axis turbine:** Este informe indicó la posibilidad para las turbinas de eje vertical, no solo de trabajar únicamente con vientos sino que estas aprovechan cualquier corriente, haciéndolas incluso competentes para generar energía a partir de corrientes marinas. Gracias a dicha información se sustenta el porqué del título del trabajo; analizar el comportamiento fluido-dinámico es de vital importancia, entendiendo el gran potencial que poseen estas turbinas a futuro [33].

### 3.2. MARCO TEÓRICO

Uno de los factores importantes que se tomaron en cuenta respecto a la investigación es la potencia del viento, la cual hará girar a mayor o menor velocidad el rotor de la turbina, generando mayor o menor energía respecto al dinamo.

La velocidad a la que se mueve el viento es un factor de gran importancia para determinar la cantidad de energía que un equipo eólico podrá transformar a electricidad. La cantidad de energía que tiene el viento varía con la tercera potencia de la velocidad media del viento (Figura 2) [34].

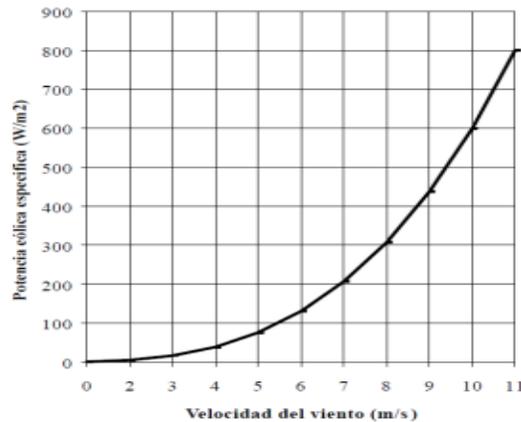


Figura 2. Potencia eólica específica y velocidad del viento en condiciones normales [34]

En relación a lo figura 2 se estipula:

$$P = \frac{1}{2} \rho A U_{\infty}^3 \quad \text{Ecuación 1 [34]}$$

Dónde:

- P = potencia del viento (W).
- $\rho$  = densidad del aire (1,225 kg/m<sup>3</sup>).
- A = área enfrentada o de barrido (m<sup>2</sup>).
- $U_{\infty}$  = velocidad del viento (m/s).

A continuación se analizó la dirección del viento, representando su importancia al justificar el modelo Savonius seleccionado. Ésta viene definida por el punto del horizonte del observador desde el cual sopla.

En la actualidad, se usa internacionalmente la rosa dividida en 360°. El cálculo se realiza tomando como origen el norte y contando los grados en el sentido de giro del reloj, de este modo un viento del Sureste equivale a 135°; uno del Sur, a 180°; uno del Noroeste, a 315°, y así sucesivamente [35].

Las ecuaciones planteadas a continuación serán de vital importancia para la medición con plena exactitud y corroboración de datos, contando con que se requiere un flujo constante de aire; el cual pueda ser suficiente para la generación de energía apropiada con el fin de alcanzar la máxima eficiencia de la turbina.

Para conocer la cantidad de energía del viento en una corriente de aire de densidad  $\rho$  y velocidad  $\vec{v}$  como se observa en la figura 3, la potencia eólica disponible que atraviesa una superficie A y hace un recorrido L en el tiempo t, viene dada como:

$$P_{viento} = \frac{E_{cinética}}{t} \quad \text{Ecuación 2[36]}$$

Donde la energía cinética viene dada por la siguiente expresión

$$E_{cinética} = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 \quad \text{Ecuación 3[36]}$$

Donde  $\dot{m}$  es el flujo de aire (Kg/s) y v es velocidad del viento (m/s). Y el flujo másico es expresado como

$$M = vtA\rho \quad \text{Ecuación 4[37]}$$

Donde v es la velocidad del viento (m/s), t es el tiempo transcurrido(s), A es el área barrida por las palas (m<sup>2</sup>) y  $\rho$  es la densidad del aire (Kg/m<sup>3</sup>). Reemplazando en la ecuación 2 obtenemos:

$$P_{viento} = \frac{v^2}{2t} \quad \text{Ecuación 5[38]}$$

Y resolviendo se obtiene la ecuación que define la potencia del viento que pasa por una región de área A [36].

$$P_{viento} = \frac{1}{2} A \rho v^3 \quad \text{Ecuación 6[38]}$$

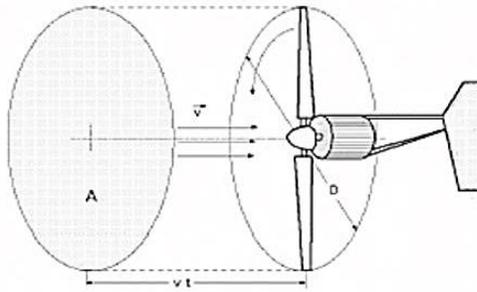


Figura 3. Representación Del Viento Sobre Una Hélice [36].

La velocidad del viento es un vector cuya longitud representa cuantificablemente el desplazamiento del viento. En caso de las flechas con barbas, la velocidad del viento se representa teniendo en cuenta la escala gráfica siguiente:

La barba de menor longitud equivale a 5 nudos, la de mayor longitud 10 nudos y el triángulo 50 nudos; si queremos representar 70 nudos será un triángulo con dos barbas grandes. Si la velocidad es inferior a 5 nudos se representan con flechas sin barbas. La unidad del viento en el SI es m/s, sin embargo aún se usan nudos (kt) y km/h.

$$1kt = 1.8km/h \quad \text{o} \quad 1kt = 0.5m/s \quad \text{Ecuación 7 [39]}$$

Tomando en cuenta los estudios realizados anteriormente se desarrollaron pruebas para conocer la aerodinámica de un perfil alar, los álabes que se modelaron constan de un cierto diseño el cual le otorga aerodinámica a la turbina, así, resultó esencial poder conocer los elementos del diseño de perfiles alares para su posible estudio.

Los perfiles alares son también usados en la industria aeronáutica en el diseño de alas de aviones, por lo que su estudio tiene bastante antecedentes. En la figura 4 se presenta un diseño alar con sus principales componentes.

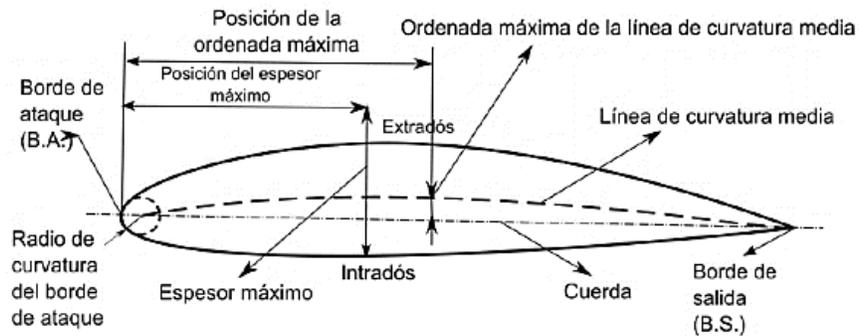


Figura 4. Diseño alar [40]

**Borde de ataque:** Es el borde del perfil por el cual el flujo entra en contacto.

**Borde de salida:** También llamado borde de fuga, es aquel por el cual el flujo sale del perfil.

**Cuerda:** Línea recta que conecta el borde de ataque con el borde de fuga del perfil, por lo general ésta se denomina como la distancia “c”.

**Extradós:** La curva del perfil sobre la cuerda.

**Intradós:** La curva bajo la cuerda.

**Línea de curvatura media:** Es la aquella línea definida como el punto medio entre el extradós y el intradós.

**Comba:** Se trata de la distancia entre la línea de curvatura media y la cuerda del perfil.

**Espesor:** Distancia perpendicular a la cuerda entre el intradós y el extradós.

**Espesor máximo:** Máximo valor del espesor.

Con lo anteriormente explicado, se procede a discutir y organizar las fuerzas que afectan los diseños aerodinámicos. Como bien se planteó alrededor del trabajo, las fuerzas que actúan principalmente en los distintos tipos de turbinas son de arrastre y sustentación, dichas se pueden apreciar en la figura 5:

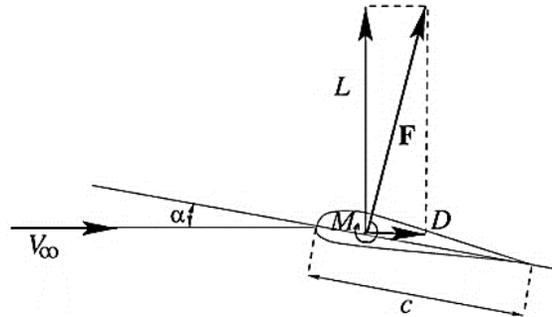


Figura 5. Apreciación de fuerzas sobre las turbinas [41]

La fuerza D representa el arrastre, o “Drag” en inglés, y la fuerza L es la sustentación o “Lift”. Ambas fuerzas son el resultado de la descomposición de la fuerza F la cual es el resultado del impacto del viento con una velocidad a un ángulo de ataque sobre el álabo. Como el estudio trata del análisis sobre una turbina Darrieus, la fuerza de mayor interés será la de sustentación.

La fuerza de sustentación resulta perpendicular a la fuerza con la que impacta el viento al perfil alar, lo que genera un movimiento rotacional sobre las turbinas de eje horizontal y las de tipo Darrieus. Dicha fuerza se calcula de la siguiente fórmula:

$$L = \frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 A c \quad \text{Ecuación 8[42]}$$

Donde  $\rho$  se describe como la densidad del aire mientras que A es descrita como la superficie del alar en el que se esté trabajando.

En la investigación fue necesaria la estipulación de parámetros para la selección de los diferentes modelos de hélices para turbinas de eje vertical. Un punto de referencia importante serían los parámetros de construcción turbina Savonius, los cuales fueron comparados con los parámetros de selección de los investigadores para conocer si estos iban por buen camino.

Los factores a tener en cuenta pueden explicarse mucho mejor en un modelo base, representado en la figura 6, que posee todos los diferentes parámetros que al ser modificados pudieron afectar la ganancia eléctrica y/o aprovechamiento del viento, su potencia, velocidad, entre otros.

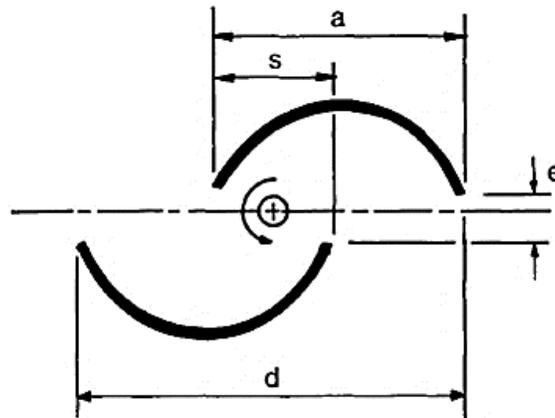


Figura 6. Análisis de hélice vertical [43]

Dónde

- $s$ : Traslapeo de los álabes [m].
- $e$ : Entrecruzamiento de los álabes [m], en esta situación de cero.
- $a$ : Diámetro del álabe [m].
- $d$ : Diámetro del rotor [m].

Los estudios realizados para llegar a la construcción de la figura 6 demuestran que la geometría ciertamente es un parámetro a tener en cuenta, una modificación en ésta puede ser la diferencia entre ganancia y pérdida.

Tener en cuenta la disposición de los vientos en la ciudad de Barranquilla es de vital importancia, por lo cual se ha realizado un estudio de todo el año que permitió a la investigación conocer a qué situación real van a enfrentarse estos diseños a futuro.

Los regímenes de velocidad media del viento en la ciudad están determinados por las oscilaciones del sistema de alta presión de las Azores y las fluctuaciones de la zona de convergencia Intertropical sobre el área [44].

De diciembre a marzo (Época Seca) presentan posiciones propicias para que se manifieste un flujo constante de viento en la ciudad de Barranquilla, ocasionando las mayores velocidades del año, las cuales según los registros multianuales del IDEAM oscilan entre 4,5 y 6,1 m/s, así mismo de abril a junio (Época de Humedad) se presentan velocidades medias entre 2,7 y 4,8 m/s [44].

De igual manera durante la época de transición de junio a julio se ostentan velocidades medias entre 2,7 y 3,2 m/s. Durante la segunda época húmeda del año (agosto a noviembre) se presentan las velocidades medias menores, las cuales oscilan entre 2,2 y 3,1 m/s. El promedio anual presenta un valor de 3,9 m/s [44].

Las herramientas computacionales colaboraron en gran medida con el avance en la toma de datos numéricos en esta investigación. Para esto se usó el programa ANSYS, software de simulación que permite predecir cómo se comporta el modelo que se quiere construir [45].

Añadido a lo anterior también se requirió del CFD (Dinámica de fluidos) software de simulación computacional ANSYS®, que permite predecir el impacto de los flujos de fluido de un modelo, a lo largo del diseño y fabricación [46].

El CFD o Computational Fluid Dynamics es una parte importante del sistema de simulación ANSYS, programa el cual se utilizó en su versión 2012 para la correcta validación numérica del dispositivo. Comparar los resultados tanto reales como numéricos permite una mayor eficiencia y veracidad al dar conclusiones sobre el desempeño de las turbinas.

Con todo esto en mente, se plasman en esta sección del trabajo las físicas y ecuaciones que rigen dicho programa, fundamentando el porqué de su uso, y abriendo camino para posteriormente observar el desenvolvimiento y simulación del proceso.

Para resolver las ecuaciones que modelan los flujos dinámicos considerando la dependencia del tiempo y su tridimensionalidad se ha empleado el modelo k-ε (Launder y Spalding 1974), ya que es uno de los modelos más ampliamente validados y requiere únicamente que se le suministren condiciones iniciales y de frontera [47].

En el anterior modelo se encuentra caracterizada la turbulencia por la energía cinética k, de la siguiente manera:

$$\frac{\partial(\sigma_k k)}{\partial t} + \nabla(\sigma_k k V_l) = \nabla \left\{ \left\{ \mu + \frac{\mu^T}{\sigma_k} \right\} \nabla k \right\} + G - \sigma_k \varepsilon \quad \text{Ecuación 9 [47]}$$

Por la tasa de disipación de energía cinética ε, se expresa como:

$$\frac{\partial(\sigma_\varepsilon \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\sigma_\varepsilon \varepsilon V_l) = \nabla \left\{ \left\{ \mu + \frac{\mu^T}{\sigma_\varepsilon} \right\} \nabla \varepsilon \right\} + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G - C_2 \sigma_\varepsilon \varepsilon) \quad \text{Ecuación 10 [47]}$$

Con los anteriores parámetros determinados, pasamos a la viscosidad turbulenta  $\mu^T$ , por medio de la expresión:

$$\mu^T = C_\mu k^2 / \varepsilon \quad \text{Ecuación 11[47]}$$

Donde G es la tasa de generación de energía (N/m<sup>2</sup>s), VI es el volumen del líquido (m<sup>3</sup>),  $\sigma_1$  es la densidad del líquido (kg/m<sup>3</sup>),  $\mu$  es la viscosidad (N s/m<sup>2</sup>), C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> y C<sub>m</sub> son constantes del modelo k-e [47].

Por último, entonces se pasa a implementar las siguientes condiciones de contorno tanto a la entrada, a la salida y a los entornos solidos:

Entrada:

$$k_{imi} = 1.6 \times 10^{-3} \quad \& \quad \varepsilon_{imi} = 2C_{\mu}^{0.75} k_{ini}^{1.5} (\kappa \Delta r) \quad \text{Ecuación 12 \& Ecuación 13[47]}$$

Salida:

$$\partial k / \partial n = 0 \quad \& \quad \partial \varepsilon / \partial n = 0 \quad \text{Ecuación 14 \& Ecuación 15[47]}$$

Entornos Solidos:

$$k_p = \frac{u_p^2}{C_{\mu}^{0.5} (u_p^+)^2} \quad \& \quad k_p = \frac{C_{\mu}^{0.5} (k_p)^{3/2}}{y_p} \quad \text{Ecuación 16 \& Ecuación 17[47]}$$

Donde

$$u_p^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y_p^+ + B \quad \& \quad y_p^+ = \frac{(C_{\mu}^{0.5} k_p)^{0.5} y_p}{u^T} \quad \text{Ecuación 18 \& Ecuación 19 [47]}$$

Donde “y” es la distancia (m) y el subíndice "ini" se refiere a las condiciones iniciales y el “p” denota la posición en el primer nodo cercano a la pared.

Una vez comprendida la base del comportamiento fluidodinámico del sistema, se procede a explicar y definir de mejor manera el modelo de los cuerpos rígidos, o como se conocen en el programa Rigid Body.

En primera se encuentran las ecuaciones de movimiento del cuerpo rígido, observando lo siguiente:

$$\frac{dP}{dt} = F \quad \text{Ecuación 20[48]}$$

$$\frac{d\pi}{dt} = m \quad \text{Ecuación 21 [48]}$$

Estas ecuaciones son el estado de cuerpo rígido debajo de la translación y rotación en el rango de cambio de un momento lineal y angular, “P” y “π” respectivamente, del cuerpo rígido son iguales a la fuerza aplicada y torque, “F” y “m” respectivamente, actuando en el cuerpo.

Siguiendo la misma línea pasamos a las ecuaciones del movimiento rotacional del cuerpo rígido, esta puede ser reescrita como unas coordenadas de cuerpo corregido:

$$\theta \dot{x} I \dot{x} I \ddot{\theta} = m \quad \text{Ecuación 22 [48]}$$

Donde la masa del momento de inercia en la matriz, I, es definida como:

$I \Rightarrow$

$$= \begin{bmatrix} \int ((y - y_G)^2 + (z - z_G)^2) dm & - \int (x - x_G)(y - y_G) dm & - \int (x - x_G)(z - z_G) dm \\ - \int (x - x_G)(y - y_G) dm & \int ((x - x_G)^2 + (z - z_G)^2) dm & - \int (y - y_G)(z - z_G) dm \\ - \int (x - x_G)(z - z_G) dm & - \int (y - y_G)(z - z_G) dm & \int ((x - x_G)^2 + (y - y_G)^2) dm \end{bmatrix}$$

Ecuación 23 [48]

En el momento másico de inercia de la matriz mostrado en la ecuación 20, el centro de masa es dado por  $(x_g, y_g, z_g)$  y  $dm$  es diferente al elemento másico.

En la ecuación 21 se representa la forma del espacio coordinado por la ecuación clásica de Euler para el cuerpo rígido en coordenadas de cuerpo-correcto.

De igual manera en esta misma ecuación “m” es el total de todas las contribuciones separadas incluyendo resorte y otros momentos alternos:

$$m = m_{Aero} - K_{Rotate}(\theta - \theta_{so}) + m_{ext} \quad \text{Ecuación 24 [48]}$$

Donde  $m_{Aero}$  es el torque aerodinámico,  $k_{rotativo}$  es el elástico rotacional constante y  $m_{Ext}$  representa todos los demás torques externos actuando en el cuerpo.

El método de generación de energía completa se tomó en cuenta como principio base del estudio, al momento de construir las turbinas el rotor puede ser de velocidad fija o velocidad variable. En el rotor de velocidad fija (figura 7), el generador asíncrono se conecta directamente a la red principal de suministro eléctrico, por lo que su construcción es simple y económica.

Por contra, presenta unas altas corrientes de arranque y una alta demanda de potencia reactiva. La energía que se obtiene es de frecuencia variable y necesariamente hay que añadir un rectificador y un ondulator para tener los 50 ciclos de la corriente de red [49].

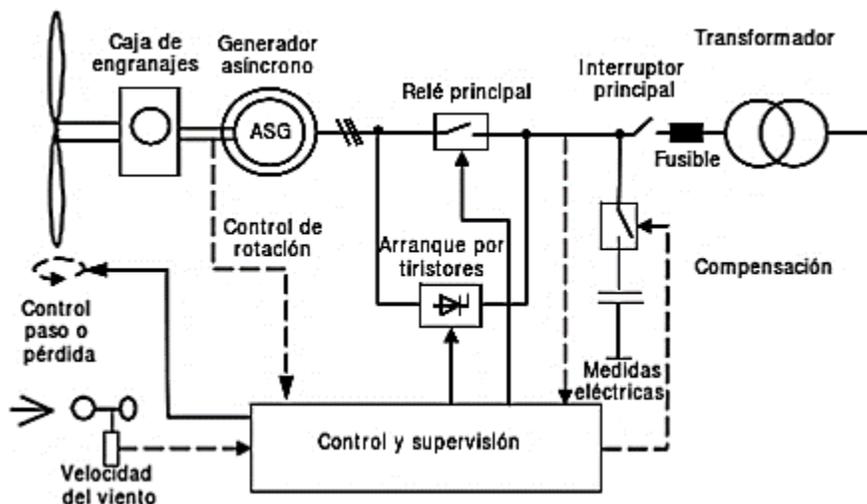


Figura 7. Rotor de velocidad variable [49]

La unidad de almacenamiento es una parte crucial de una turbina eólica, en los periodos en que no sopla el viento, es necesario utilizar algún sistema que almacene la energía producida y la libere cuando sea conveniente. Esto es particularmente cierto en instalaciones de micro potencia (< 1 kW) y en las de pequeña potencia (entre 1 y 100 kW) [50].

En general, todos los dispositivos de almacenamiento, incluidas las baterías de acumuladores, tienen rendimientos entre el 70 y el 85%, es decir, que disipan entre un 15 a un 30% de la energía que reciben del aerogenerador [50].

Si la unidad de almacenamiento no puede competir contra la potencia de viento se generarían vibraciones indeseadas por la incapacidad del rotor de generar esa energía extra. Uno de los métodos utilizados para el control en estos casos sería la regulación por desorientación: el rotor se pliega en el plano horizontal con respecto a la dirección del viento y el rotor gira hacia la cola [51].

El flujo de viento del sistema es empleado a través del bombeo de agua. En el rotor de los molinos de viento se ve reducido por la disminución del área que enfrenta éste al ponerse el rotor de lado. De esta forma la potencia que se extrae del viento es minimizada [51].

Considerando cómo puede ser afectada la ganancia del sistema, hay muchos factores posibles pero el libro de Tecnología y Medio Ambiente 2 plantea una fórmula para hallarla:

$$\omega_{turb} = \left( \frac{W_{turb}}{m} h_3 - h_4 = C_p(T_3 - T_4) \right) \quad \text{Ecuación 25 [52]}$$

Tener en cuenta ésta para la revisión de diseños fue de vital ayuda. Basándose en la misma se pueden justificar algunos parámetros a futuro, juzgar su veracidad y efectividad en el campo.

Añadiendo al trabajo anterior, cabe recalcar que existen muchas formas de volver eficientes estas turbinas además de haciendo análisis estructurales y dinámicos, una de éstas sería midiendo el torque generado por las mismas, ya que de este depende su eficiencia y cantidad de energía producida.

Debido a lo anterior se planteó la utilización de un programa para el cálculo de este torque pero a su vez una corroboración teórica:

”Los errores de componentes que afectan al rendimiento de uso compartido de carga considerados en este artículo se pueden clasificar como error de frecuencia dental, error de frecuencia del eje y error constante” [53].

at es el ángulo de presión transversal del anillo y el sol.

$$\theta_{r,si} = x_t - \Psi_i \quad \text{Ecuación 26[53]}$$

Conocer los diversos errores en el sistema ayudó al mejor entendimiento y análisis de las investigaciones de diversos diseños de turbinas eólicas de eje vertical.

Por último, un importante parámetro a conocer fueron los 4 factores importantes que nos entrega el libro Manual de energía eólica para la selección de un aerogenerador [54]:

1. Condiciones de logística de accesos, dado que en algunos emplazamientos no se puede llegar con los medios de transporte actuales o bien el coste puede ser limitado.
2. Condicionantes de tipo legal y técnico, principalmente medioambientales y energéticos.
3. Condiciones de viento, velocidad de media, distribución de la velocidad, turbulencia, frecuencia e intensidad de las ráfagas, etc.

4. Condiciones de tipo económico, precio de los aerogeneradores, coste del transporte y la instalación.

### 3.2.1 MARCO CONCEPTUAL

**Energía Eólica:** Se estipula la energía eólica como aquella obtenida a partir del viento, refiriéndose a la energía cinética generada por efectos de las corrientes de aire y que es transformada en otras formas útiles para las actividades humanas [55].

**Viento:** Es el flujo de todos los gases a gran escala existentes en la atmósfera, estos se mueven de acuerdo a diferentes factores directos e indirectos pero generalmente ocurre como la compensación de las diferencias de presión atmosféricas entre dos puntos [56].

**Variación del viento respecto a la altura del terreno:** La altura del terreno fue también otro factor determinante a la hora de tomar la velocidad del perfil del viento, ya que este último varía en función de él. La forma que tome dicho perfil depende y varía según la rugosidad del terreno, con esto en cuenta podemos observar el comportamiento de perfil de velocidades de viento contra las características topográficas del terreno en la figura 8 [57], a continuación:

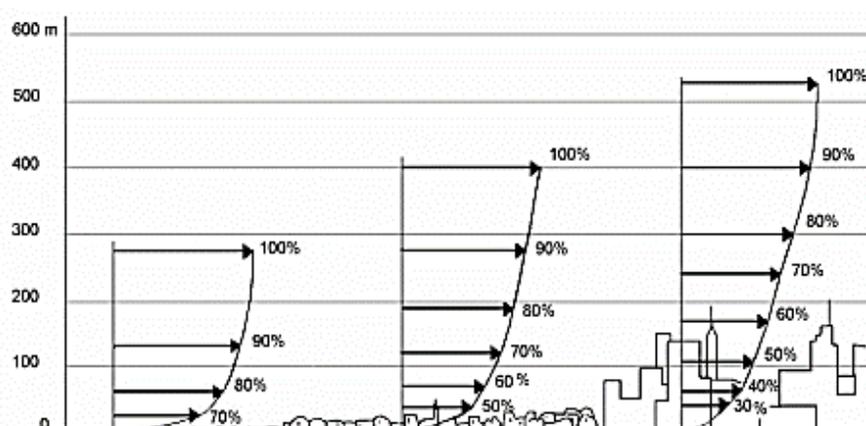


Figura 8. Perfiles de velocidad del terreno [57]

**Anemómetro:** Es un dispositivo que se encarga de la medición del viento para determinar el potencial eólico de la zona o simplemente para censar los cambios climatológicos de una zona en concreto. Este dispositivo tiende a variar su tipología según la forma en la que se desee medir el viento [11]:

1. Fuerza de enfrentamiento entre una superficie y el viento a medir.
2. Utilizando métodos ultrasónicos, dependiendo de la velocidad de propagación del sonido se determina la velocidad del medio (viento).
3. Utilizando medidores ópticos (láser).
4. La variación de velocidad de rotación en una hélice.
5. Diferencia de temperatura entre filamentos calentados uniformemente, uno sometido al viento y el otro estable.

**Aerogeneradores:** En esencia, una turbina eólica o aerogenerador, es una turbo máquina motora que intercambia una cantidad de movimiento con el viento, haciendo girar un rotor. En estas máquinas, la energía cinética del aire en movimiento proporciona energía mecánica a un rotor o hélice que, a través de un sistema de transmisión mecánica, hace girar el rotor de un generador, convirtiendo la energía mecánica rotacional en energía eléctrica [58].

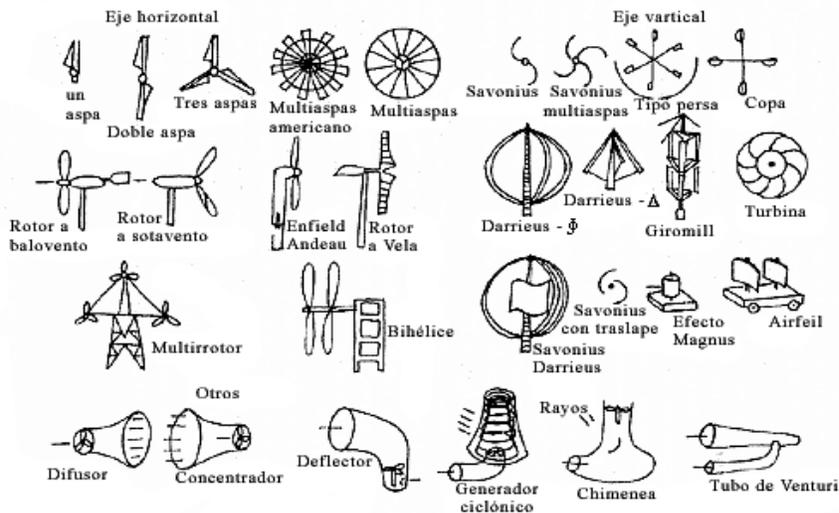


Figura 9. Tipos de Aerogeneradores [58]

**Rendimiento de los principales aerogeneradores:** Se señala que la velocidad del viento, luego de atravesar la superficie de captación, no es nula y es por esto que la potencia dada por la expresión anterior no será totalmente aprovechable. Betz demostró que la máxima energía recuperable, con un aerogenerador ideal, es igual a  $16/27$  (aproximadamente un 60%) de la energía total que pasa por A [59].

Tomando en cuenta que ningún rotor es ideal, para caracterizarlo es necesario conocer su eficiencia o rendimiento  $\eta$ . A su vez el rendimiento  $\eta$  depende del tipo de máquina y de las condiciones del viento en el momento de su operación. En la Figura 10 se representan los rendimientos típicos de diversos tipos de rotores eólicos, tal como se expresara en la figura a continuación [59].

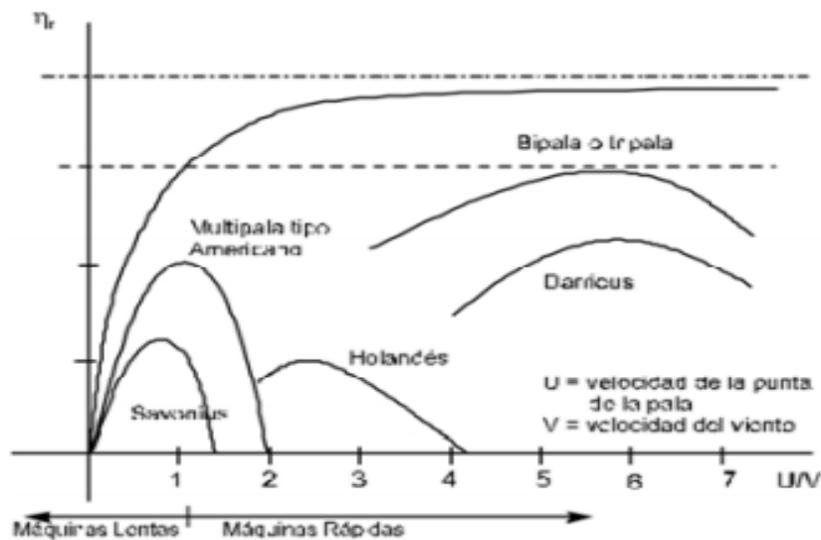


Figura 10. Rendimientos [60]

**Aerogenerador tipo Savonius:** El aerogenerador tipo Savonius fue diseñado por el ingeniero finlandés Sigurd J. Savonius en 1924 y patentado por éste en 1929. El cual consta de tres piezas fundamentales: el Rotor, mecanismo de transmisión y el generador eléctrico [60].

El principio de funcionamiento se basa en la fuerza de arrastre diferencial que generan las corrientes de viento sobre las superficies del rotor. Así, debido a la

curvatura de los álabes de éste, presenta menor resistencia cuando gira en contra del viento que lo impulsa.

Siendo este rotor un mecanismo de arrastre, obtiene menor fuerza de las corrientes de aire que las turbinas de sustentación convencionales; lo cual le permite soportar turbulencias y accionamientos con bajas velocidades del viento [61].

Por otro lado tenemos las diferentes partes de algunas turbinas las cuales fueron esenciales para su construcción. Una turbina consta de 13 partes básicas, desde los cimientos hasta la rueda del rotor, en la figura 11 a continuación podemos observar un esquema de las partes [62].

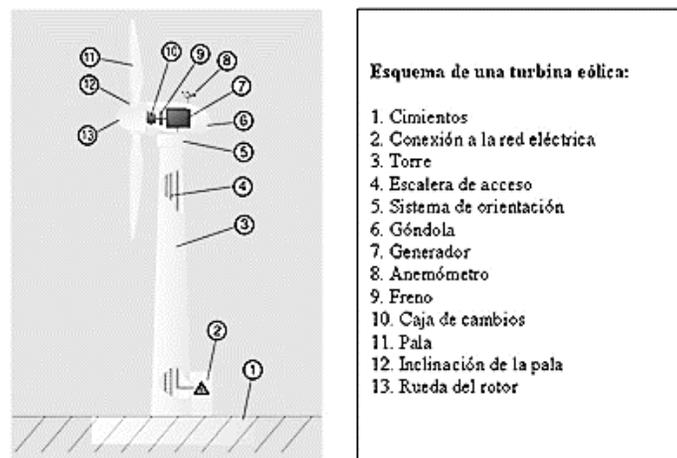


Figura 11. Partes de un aerogenerador estándar, eje horizontal [62]

**Turbina Eólica:** Se define como un elemento que sea capaz de transformar la energía cinética del viento en energía mecánica, para luego ser transformada en energía eléctrica o realizar un trabajo útil [63].

**Turbina eólica de eje horizontal:** Este tipo de turbinas son las más comunes, y constituyen gran parte de la capacidad instalada actual. Su rotor es paralelo al suelo, y están formadas, generalmente, por tres álabes con forma de perfiles

alares (ver Figura 12), estos son los encargados de recibir el torque provocado por el contacto con el viento [64].



*Figura 12. Turbina eólica eje horizontal [64]*

**Turbina eólica de eje vertical:** A diferencia de las turbinas de eje horizontal, este tipo de turbinas tiene su rotor de forma perpendicular al suelo, y giran verticalmente. Su uso es menos común, y por ende están menos probadas.

Entre sus desventajas se encuentran diversos problemas para comenzar su rotación (self starting), por lo que generalmente cuentan con un sistema secundario que se encarga de dar inicio a su funcionamiento. Además los esfuerzos sobre los perfiles y el eje son significativos y variables, por lo que la falla por fatiga se presenta frecuentemente en diseños anteriores [65].

**Bioinspirado:** Hace referencia a un modelo basado en algún ente natural o procesamiento biológico de los animales, plantas o personas [66].

**Darrieus:** Tipo de turbina de eje vertical que basan su movimiento en la fuerza de sustentación que provoca el fluido, y sus álabes tienen forma de perfiles alares [67]. Existen múltiples configuraciones para la disposición de sus álabes, estas se muestran en la Figura 13.

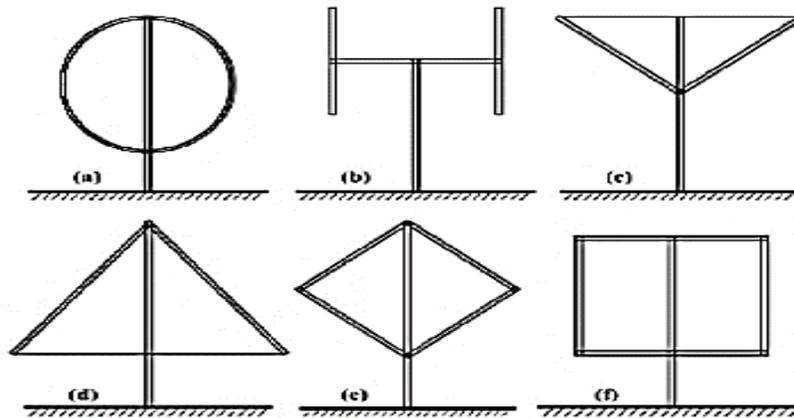


Figura 13. Tipos de turbina Darrieus [67]

**Temperatura:** La temperatura, sometida a numerosas oscilaciones, se halla condicionada por la latitud y por la altura sobre el nivel del mar. La cantidad de energía solar recibida, en cualquier región del planeta, varía con la hora del día, con la estación del año y con la latitud. La temperatura puede variar también debido a la distribución en distintos tipos de superficies y en función de la altura [68].

**Humedad:** La humedad se entiende como la cantidad de agua en forma de vapor en un sistema. La mayor parte de esta en la atmósfera se encuentra en los 5 primeros kilómetros del aire, dentro de la troposfera, y procede de diversas fuentes terrestres gracias al fenómeno de la evaporación, el cual es ayudado por el calor solar y la temperatura propia de la tierra [69].

**Aero bombas:** Las Aero bombas de actuación directa trabajan mediante bombas de desplazamiento positivo de una o de dos etapas, también denominadas multipalas [70].

**Distancia:** Es simplemente la longitud total del trayecto recorrido al moverse de un lugar a otro [71].

**Masa:** Se define como la cantidad base con que se describen cantidades de materia. Cuanta más masa tiene un objeto, más materia contiene. La unidad en el sistema internacional es el kilogramo (kg) [72].

**Tiempo:** Una definición común es que el tiempo es el flujo de sucesos hacia adelante, también se dice que es una cuarta dimensión que acompaña a las 3 dimensiones del espacio (x,y,z,t) de tal suerte que si algo existe en el espacio, también en el tiempo [73].

**Velocidad:** Puede definirse como una forma de describir el movimiento. Es la resultante de tener una rapidez con dirección, es decir la velocidad es un vector que describe la cantidad de distancia por segundo que posee un cuerpo, con una dirección definida, por lo cual se mide en metros/segundo (m/s) [74].

**Aceleración:** Al entender velocidad como la tasa de cambio de posición con respecto al tiempo, si se va más allá y se considera esta tasa de cambio con respecto al tiempo se obtiene la aceleración. Es decir, la aceleración se define como el cambio en la velocidad de un objeto o partícula [75].

### **3.2.2 MARCO LEGAL**

Uno de los estímulos legales para haber desarrollado proyectos para el prototipo de dispositivos que beneficien la eficiencia energética es la contratación a largo plazo de estos, donde se busca impulsar de manera económica los proyectos relacionados tales como el presente. Por ello, el ministerio de minas y energía posee el Decreto 570, 23 de marzo de 2018, que estipula:

Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, en lo relacionado con los lineamientos de política pública para la contratación a largo plazo de proyectos de generación de energía eléctrica y se dictan otras disposiciones [76].

Otro prospecto legal que se tuvo es la necesidad encontrada en las zonas sin cobertura de servicio de energía eléctrica debido a la dificultad de llegada, para esto el ministerio de minas y energía estipula el Decreto 1623, 11 de agosto de 2015, donde se menciona:

Por el cual se modifica y adiciona el Decreto 1073 de 2015, en lo que respecta al establecimiento de los lineamientos de política para la expansión de la cobertura del servicio de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional y en las Zonas No Interconectadas [76].

Otra necesidad que se marcó se encuentra en el Decreto 388, 7 de agosto de 2016, el cual habla de la buena prestación de energía eléctrica en situaciones extraordinarias, como lo son energías renovables o fuera del sistema básico de energía, éste menciona que:

Por el cual se adiciona el decreto único reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, con el fin de adoptar medidas tendientes a garantizar la prestación eficiente del servicio público domiciliario de energía eléctrica en circunstancias extraordinarias [76].

El modelo de turbina para la generación de energía eléctrica fue estipulado para zonas urbanas, por lo cual se llega a entender que no ocupa mucho espacio y al usarse de manera única para hogares, oficinas, entre otros establecimientos, resulta pertinente apoyarse en la norma del Decreto 348, 1 de marzo de 2017, que discute lo siguiente:

Por el cual se adiciona el Decreto número 1073 de 2015, en lo que respecta al establecimiento de los lineamientos de política pública en materia de gestión eficiente de la energía y entrega de excedentes de autogeneración a pequeña escala [76].

Entrando de nuevo al campo de las necesidades, se observa en el Decreto 1513, 19 septiembre de 2016, del ministerio de minas y energías, la mención de la cobertura y necesidad del servicio eléctrico en temas de expansión, denotando:

Por el cual se modifica el Decreto 1073 de 2015 en lo relacionado con lineamientos de política pública en materia de expansión de la cobertura del servicio de energía eléctrica [76].

En materia de incentivos para la expansión del campo de energías renovables para la sustentación de energía eléctrica se encuentra el Decreto 2143, 4 noviembre de 2015, del ministerio de minas y energía, el cual dicta:

Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, en lo relacionado con la definición de los lineamientos para la aplicación de los incentivos establecidos en el Capítulo III de la Ley 1715 de 2014 [76].

Considerando la resolución 4-0779 del ministerio de minas y energía, el presente trabajo puede resultar de ayuda en el ámbito de desarrollo y planificación de estrategias para implementar planes a futuro de llevado de energía a nivel nacional en expansión [76].

A tener en cuenta para la normatividad del proyecto de grado se encuentra el hecho de que éste es el desarrollo de un prototipo con base en un conjunto de estudios y trabajos de estudiantes, investigadores, profesores y demás de la Universidad Autónoma del Caribe, lo cual crea una necesidad de protección de la propiedad intelectual bastante clara.

Para este fin se da basamento en artículos mencionados en la Guía para la elaboración de acuerdos de confidencialidad y de delimitación de la propiedad

intelectual entre instituciones de educación superior, centros de desarrollo tecnológico, centros de investigación y contribuyentes de renta en el marco de las deducciones tributarias para i+d+i, establecida por la Organización Colciencias de Colombia:

Artículo 22.- El derecho a la patente pertenece al inventor. Este derecho podrá ser transferido por acto entre vivos o por vía sucesoria. Los titulares de las patentes 20 podrán ser personas naturales o jurídicas. Si varias personas hicieran conjuntamente una invención, el derecho a la patente corresponde en común a todas ellas. Si varias personas hicieran la misma invención, independientemente unas de otras, la patente se concederá a aquella o a su causahabiente que primero presente la solicitud correspondiente o que invoque la prioridad de fecha más antigua [77].

Artículo 23.- Sin perjuicio de lo establecido en la legislación nacional de cada País Miembro, en las invenciones ocurridas bajo relación laboral, el empleador, cualquiera que sea su forma y naturaleza, podrá ceder parte de los beneficios económicos de las invenciones en beneficio de los empleados inventores, para estimular la actividad de investigación. Las entidades que reciban financiamiento estatal para sus investigaciones deberán reinvertir parte de las regalías que reciben por la comercialización de tales invenciones, con el propósito de generar fondos continuos de investigación y estimular a los investigadores, haciéndolos partícipes de los rendimientos de las innovaciones, de acuerdo con la legislación de cada País Miembro [78].

Artículo 24.- El inventor tendrá derecho a ser mencionado como tal en la patente y podrá igualmente oponerse a esta mención [79].

## **4. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO**

### **4.1. METODOLOGÍA**

El tipo de paradigma o metodología que se trató en el siguiente trabajo es de carácter cuantitativo debido al uso, análisis y trabajo de variables específicas como la velocidad, potencias, energía, ganancia, entre otras que son necesarias e influyentes en el análisis, ensamblado y validación de datos de una turbina de eje vertical.

Al haber sido un estudio centrado en la generación de energía mediante el aprovechamiento de un recurso, específicamente el viento, el presente estudio no intercede para nada con seres humanos ni grupos sociales, sino es más bien el estudio de un proceso y la optimización del mismo, en consecuencia es completamente de carácter cuantitativo.

### **4.2. TIPO DE ESTUDIO**

El tipo de investigación a tratar en el trabajo realizado es denominada de tipo expofacta y aplicada, puesto que la primera parte de la investigación a tratar se basó primordialmente en el análisis completo de situaciones o documentación.

Pasado lo anterior y consolidado como información verídica, se realizó la aplicación de estos documentos en un trabajo que buscó la validación y comprobación de los datos tomados teóricamente en investigaciones pasadas mediante la construcción de dispositivos para la comprobación de los datos teóricos, permitiendo así el paso a nuevas investigaciones en el tema.

### 4.3. CRONOGRAMA – PLAN DE TRABAJO

Componentes	Descripción	Fecha Inicio	Fecha Final	Duración (Días)
<b>OBJETIVO 1</b>	<b>Establecer parámetros de selección para turbinas de modelos simulados.</b>	5/11/19	5/12/19	31
<b>Entregable # 1</b>	<b>Documento de Requerimientos previos</b>	5/11/19	25/11/19	21
Tarea 1	Analizar cada uno de las investigaciones pertinentes enfocados al proyecto de investigación.	5/11/19	13/11/19	9
Tarea2	Estudiar los diversos diseños de turbinas planteados en cada uno de los trabajos	14/11/19	16/11/2019	3
Tarea3	clasificar las diversas diferencias encontradas en cada uno de los diseños estudiados	17/11/19	20/11/19	4
Tarea 4	Formular presupuesto estimado para requisitos iniciales de diseño	21/11/19	23/11/19	3
Tarea 5	Estipular los parametros de seleccion deacuerdo a los estudios realizados	24/11/19	25/11/19	2
<b>Entregable # 2:</b>	<b>Requisitos necesarios para la seleccion de turbinas</b>	26/11/19	5/12/29	10
Tarea 6	Verificacion de los parametros seleccionados con los asesores	26/11/25	29/11/19	4
Tarea 8	Entrega final bajo la cual se realizara la seleccion de diseños del proyecto	30/11/19	12/5/19	6
<b>OBJETIVO 2</b>	<b>Seleccionar los diseños modelados de turbinas de eje vertical para su debida construcción.</b>	20/1/20	15/04/20	97
<b>Entregable # 3</b>	<b>Diseño seleccionado mediante matriz de parametros</b>	20/1/20	10/2/20	22
Tarea 9	Análisis de parametros para la seleccion de diseños de turbinas	20/1/20	25/1/20	6
Tarea 10	Creacion de matriz para la clasificacion de los diseños a realizar	26/1/20	3/2/20	9
Tarea 12	Selección de diseños mediante la matriz de parametros	4/2/20	10/2/20	7
<b>Entregable # 4</b>	<b>Construccion detallado de Turbina de eje vertical con diferentes helices</b>	11/2/19	29/04/20	77
Tarea 13	Identificación del diseño optimo para la implementacion.	11/2/20	20/2/20	10
Tarea 14	Diseños de las turbinas a travez del software Solid work-Ansys.	21/2/20	28/2/20	8
Tarea 16	Ensable del diseño del dispositivo final.	29/2/20	09/04/20	39
Tarea 17	prueba del modelo, potencia y velocidad de la helice	10/04/20	29/04/20	20
<b>OBJETIVO 3</b>	<b>Examinar de manera técnica y funcional el comportamiento fluido dinámico de los diseños seleccionados</b>	30/04/20	30/05/20	32
<b>Entregable # 5</b>	<b>Plan de pruebas para el estudio fluido dinamico de las turbinas</b>	30/04/20	20/05/20	22
Tarea 18	Análisis de la velocidad de viento que permita una maxima eficiencia en las turbinas	30/05/20	06/05/20	8
Tarea 19	Medicion de la cantidad de energia producida por las turbinas	07/05/20	16/05/20	10
Tarea 20	Análisis de las características adecuadas para la evaluación eficiente del diseño de turbinas	17/05/20	20/05/20	4
<b>Entregable # 6</b>	<b>Comparacion del analisis fluidodinamico demostrado en el campo y el descrito en los diseños.</b>	21/05/20	30/05/20	10
Tarea 21	Comparacion entre la produccion energetica simulada y la registrada	21/05/20	26/05/20	6
Tarea 22	validacion del completo funcionamiento de los diseños seleccionados, con base a los datos encontrados.	26/05/20	30/05/20	4

Figura 14. Cronograma de actividades

## 5. PRESUPUESTO

A continuación presentaremos una lista de tablas con los debidos presupuestos de todo el proyecto, incluyendo puntos clave como: Materiales, investigadores, docentes, personal científico, instrumentos, consultorías y demás factores.

### 5.1. PRESUPUESTO GENERAL

Tabla 1 .Presupuesto general.

	<b>FORMATO DE PRESUPUESTO PARA PRESENTACIÓN DE PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN EN CONVOCATORIAS INTERNAS</b>				GI-02-PR-03-F02
					Versión 1
					12/06/2019
<b>PRESUPUESTO GENERAL DEL PROYECTO</b>					
<b>RUBROS</b>	<b>Fuentes de Financiamiento</b>				
	<b>Vicerrectoría de Investigaciones y transferencia</b>	<b>INVESTIGADORES</b>	<b>Otras fuentes Externas</b>	<b>Contrapartida a UAC</b>	<b>Total</b>
1. Personal Científico	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 13.021.824	\$ 13.021.824
2. Personal de Apoyo	\$ 0,00	\$ 600.316	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 600.316
3. Consultoría especializada y Servicios Técnicos externos	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,0
4. Materiales e Insumos	\$ 0,00	\$ 567.000\$	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 567.000\$
5. Trabajo de Campo	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,0
6. Equipos	\$ 0,00	\$ 4.240.000	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 4.240.000
7. Bibliografía	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,0
8. Material de difusión y Promoción de resultados	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,0
<b>TOTAL, PRESUPUESTO DEL PROYECTO</b>	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	<b>\$ 17.862.707</b>

## 5.2. PERSONAL CIENTÍFICO Y DE APOYO

El presupuesto invertido en este rubro consiste en el costo del tiempo empleado por el personal de investigación vinculado a este proyecto, que incluye a los directores y a los auxiliares de investigación.

Tabla 2. Costo personal científico.

1. PERSONAL CIENTÍFICO										
Nombres y Apellidos	Tipo de Contrato	Función dentro del Proyecto	Valor Hora (\$)	Dedicación Horas/semana	No. de Semanas	Fuentes de Financiamiento				
						Vicerrectoría de Investigaciones y transferencia	INVESTIGADORES	Otras Fuentes Externas	Contrapartida UAC	SUB-TOTAL
1. Carlos Díaz Sáenz	Instructor	Investigador Principal	\$33.911	4	48	-	Ing. Mecatronica	-	\$6.510.912	\$6.510.912
2. Jonathan Fábregas Villegas	Instructor	Co-Investigador	\$33.911	4	48	-	Ing. Mecatronica	-	\$6.510.912	\$6.510.912
<i>SUB-TOTAL</i>						0	0	0	\$13.021.824	\$13.021.824

Tabla 3. Costo personal de apoyo.

2. PERSONAL DE APOYO										
Nombres y Apellidos	Tipo de Vinculación	Función dentro del Proyecto	Valor Hora (\$)	Dedicación Horas/semana	No. de Semanas	Fuentes de Financiamiento				
						Vicerrectoría de Investigaciones y transferencia	INVESTIGADORES	SUB-TOTAL		
1. Diego Ramirez	Practicante	Auxiliar de Investigación	\$2.331	4	3			\$600.316	\$600.316	
<i>SUB-TOTAL</i>									\$600.316	

### 5.3. CONSULTORÍA ESPECIALIZADA

Tabla 4. Costo consultoría especializada.

3. CONSULTORIA ESPECIALIZADA Y SERVICIOS TÉCNICOS EXTERNOS				
Descripción	Justificación	Fuentes de Financiamiento		
		Vicerrectoría de Investigaciones y transferencia	INVESTIGADORES	SUB-TOTAL
1. Nombre				\$ 0
2.				\$ 0
3.				\$ 0
SUB-TOTAL		\$ 0	\$ 0	\$ 0

### 5.4. MATERIALES, INSUMOS Y EQUIPOS

El presupuesto dedicado a esta sección incluye desde los componentes eléctricos para la generación y recolección de energía, como los soportes, bases, uniones y demás que constituyen el dispositivo.

Tabla 5. Costo de materiales e insumos.

4. MATERIALES E INSUMOS					
Descripción	Justificación	Fuentes de Financiamiento			
		Vicerrectoría de Investigaciones y transferencia	INVESTIGADORES	Contrapartida a UAC	SUB-TOTAL
1. Tubo PVC 4pulg	Alabes de turbinas	-	14.000\$	-	14.000\$
2. 2 láminas de madera prensada de 30x30	Sujeciones del dispositivo	-	280.000\$	-	280.000\$
3. Madera prensada 40x40 mdf	Base del dispositivo	-	45.000\$	-	45.000\$
4. Soporte de madera	Soporte del dispositivo	-	60.000\$	-	60.000\$
5. Barra de soporte metálico tipo L	Soporte superior de turbina	-	35.000\$	-	35.000\$
6. Tornillos, tuercas y remaches	Uniones del dispositivo	-	8.000\$	-	8.000\$
7. Caja de cartón	Base del motor	-	30.000\$	-	30.000\$

presando	de la turbina				
8. Motor con moto reductor	Convertidor de energía	-	40.000\$	-	40.000\$
9. Metro de UTP	Conexiones de turbina	-	3.000\$	-	3.000\$
10. Protoboard	Obtención de voltaje	-	20.000\$	-	20.000\$
11. Lata de pintura negra mate	Diseño	-	10.000\$	-	10.000\$
12. Lata de pintura blanca mate	Diseño	-	10.000\$	-	10.000\$
13. Barra de madera 23cm	Eje de turbina	-	12.000\$	-	12.000\$
<i>SUB-TOTAL</i>			567.000\$		567.000\$

Tabla 6. Costo trabajo de campo.

5. TRABAJO DE CAMPO									
Descripción	Justificación	No. De días	No. De personas	Costo/día de estadía por persona	Transporte por persona (ida/vuelta)	Fuentes de Financiamiento			
						Vicerrectoría de Investigaciones y transferencia	INVESTIGADORES	Contrapartida UAC	SUB-TOTAL
1.		21	2			\$ 0			0
							\$ 0		\$ 0
								\$ 0	\$ 0
<i>SUB-TOTAL</i>						\$ 0	\$	\$ 0	\$ 0

Tabla 7. Costo equipos usados

6. EQUIPOS						
Descripción	Justificación	Cantidad	Fuentes de Financiamiento			
			Vicerrectoría de Investigaciones y transferencia	INVESTIGADORES	Contrapartida UAC	SUB-TOTAL
1. Multímetro	Para la medición y calibración del dispositivo.	1	-	\$1.000.000	-	\$ 1.000.000
2. Pc	Herramienta de desarrollo, modelado,	2	-	\$1.500.000	-	\$ 3.000.000

	simulación y análisis de datos					
3.Tacómetro	Para la medición de la variable de velocidad del dispositivo	1	-	\$120.000	-	\$ 120.000
4.Anaemometro	Herramienta para medir los vientos a los cuales someteremos las turbinas	1	-	\$120.000	-	\$ 120.000
<i>SUB-TOTAL</i>			\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 4.240.000

## **6. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **6.1. DISEÑO DEL PROTOTIPO**

A continuación se describe la manera mediante la cual se seleccionó, modeló y simuló los diseños de turbina eólica de eje vertical.

Primeramente con el uso de la Tabla 8, en la sección de Recolección de Datos, se organizó y analizó cada uno de los diferentes diseños encontrados, tras su debida lectura se concluyeron los parámetros generales que afectaban a cada uno de los diseños. A partir de ahí se seleccionaron un serie de parámetros que serían reducidos por una matriz de choque presentada en la Tabla 9, de la misma sección.

Con una serie de parámetros seleccionados se encontró una forma de seleccionar los diseños óptimos mediante una matriz de choque representada en la Tabla 11, en la sección de recolección de datos. Esta matriz permitió juzgar cada diseño respecto a cada uno de los parámetros y evaluar de manera cuantitativa los mismos.

Los diseños óptimos seleccionados fueron el diseño #3 y diseño#6 presentados en la Tabla 8.

Una vez seleccionados los diseños se prosiguió a modelar estos en el programa de SolidWorks, para tener un correcto plano de trabajo pasando así a la construcción de estos. Dichos modelos se presentan en las figuras 15 y 16 a continuación:

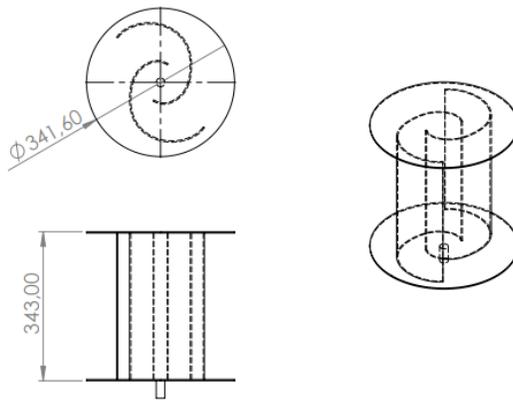


Figura 15. Modelo de diseño #6 en SolidWorks

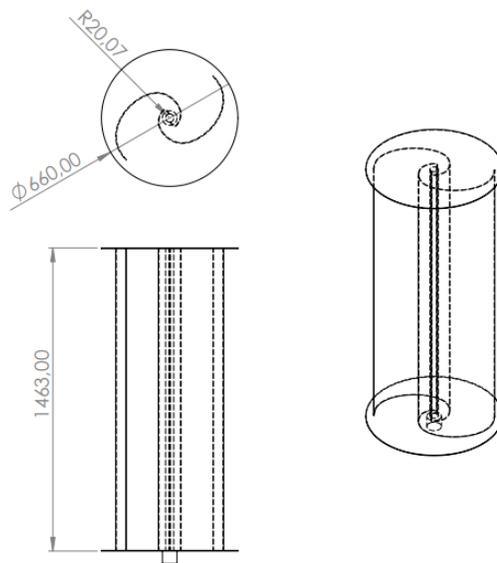


Figura 16. Modelo de Diseño #3 en SolidWorks

Teniendo como objetivo principal realizar y poder demostrar de manera física los diversos dispositivos simulados, y teniendo en cuenta el riesgo de los investigadores además la escasez de materiales durante la pandemia, se optó por realizar 1 dispositivo base con la capacidad de ser desmontable, adaptable a otros diseños de alabes y que a su vez fuera una réplica de los diseños originales con materiales reciclables.

Al tener claro lo anterior se decidió buscar el materiales asequibles para realizar el diseño del alabe. Este fue un tubo de PVC de 4 pulgadas, y madera prensada para realizar los dos discos del diseño#3, además de esto se optó por utilizar como eje del diseño#6 una barra de madera prensada.

Por último se realizó la base del diseño, al final se optó por usar una base echa en madera prensada y unirle mediante tornillos de punta fina una base soporte tipo L de acero esto para darle mayor seguridad al dispositivo y firmeza a la turbina.

Los diseños obtenidos se ven reflejados en las Figuras 17 y 18 a continuación:



*Figura 17. Prototipo diseño #6*



*Figura 18. Prototipo diseño #3*

Nota: Cabe resaltar que por causa de la pandemia y el cambio en los materiales de construcción el rendimiento de los dispositivos y respuesta podrá verse afectado en futuras tomas de resultados.

## **6.2. DISEÑO DEL DISPOSITIVO FINAL**

En este ítem se presenta la versión final del prototipo a escala de las turbinas de eje vertical seleccionadas con anterioridad. Se desglosa cómo fueron construidos y sus diversas características.

### **6.2.1. TURBINAS EÓLICAS DE EJE VERTICAL MODELADAS**

En esta sección se muestra el modelamiento de la turbina eólica diseñada en SolidWorks, ya que se considera necesario evaluar tanto virtual como experimentalmente a la misma. Su acople a los diseños seleccionados no es

100% preciso, por lo que una comparación tanto física como numérica es necesaria.

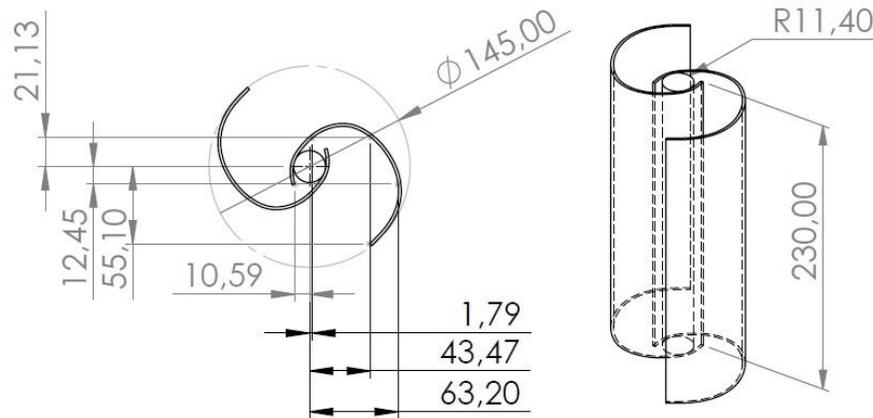


Figura 19. Modelo Construido de diseño 3 en Solidworks

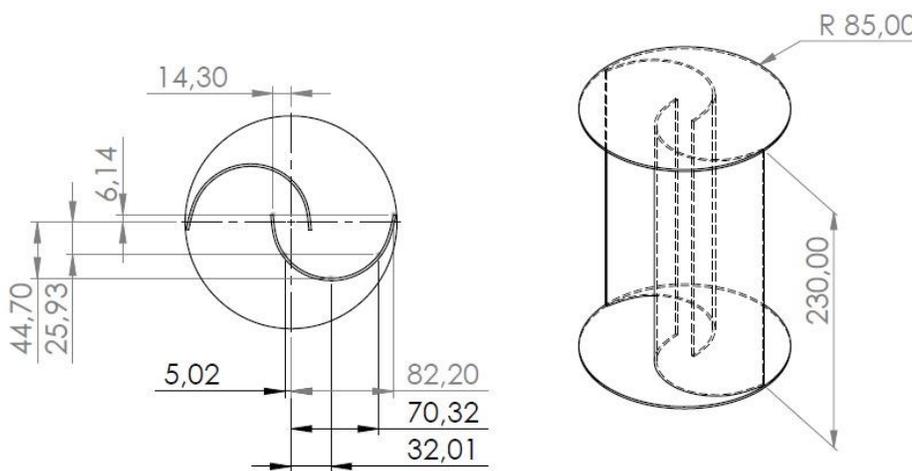


Figura 20. Modelo Construido de diseño 6 en Solidworks

Una vez modeladas las turbinas reales tras su construcción, se llevaron a simular para tener la capacidad de comparar tanto de manera física como numérica los diseños.

### Modelamiento CFD:

Se procede a emplear los modelos simulados en SolidWorks, vistos en la figura 19 y 20, para ser importados a la herramienta computacional ANSYS en la cual se genera la geometría de los fluidos que rodean la geometría sólida de la turbina.

### Geometría de la simulación:

Se importan los modelos simulados desde SolidWorks a ANSYS, en este proceso se crean los respectivos planos en los que trabajará el prototipo y se crean las dos áreas de dominio que empieza con un círculo un poco más amplio que la circunferencia de la turbina y otro rectángulo que tiene medidas exactas para la simulación.

En base a los dominios previamente realizados, estos son creados por individual debido a que la simulación lo exige así con el fin de poder simular uno de los dominios de manera estática (el rectángulo) y el otro dominio (circular) de manera que se pueda influenciar por el movimiento.

### Mallado:

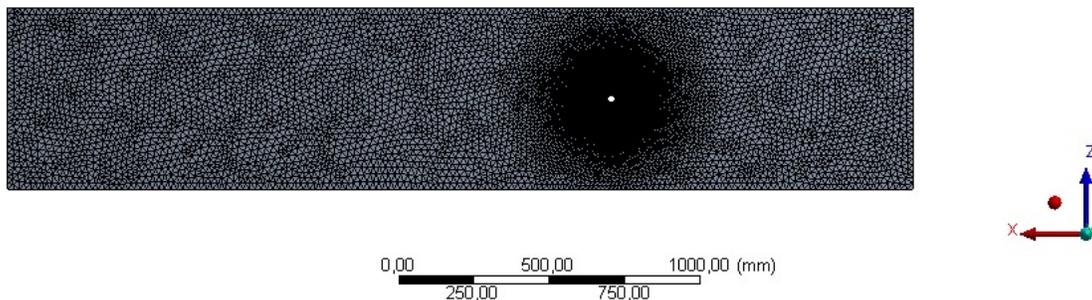


Figura 21. Mallado Completo

En la figura número 21 se da a conocer un plano completo del mallado, se puede ver que entre más se acerca al círculo el mallado se hace cada vez más pequeño. Esto es debido a que se escogió un tamaño de mallado de 3mm a 20mm, creciendo a su vez a una escala del 5%, con el propósito de estudiar milimétricamente el comportamiento del fluido en la simulación, específicamente en el área de la turbina donde su patrón posee la menor dimensionalidad.

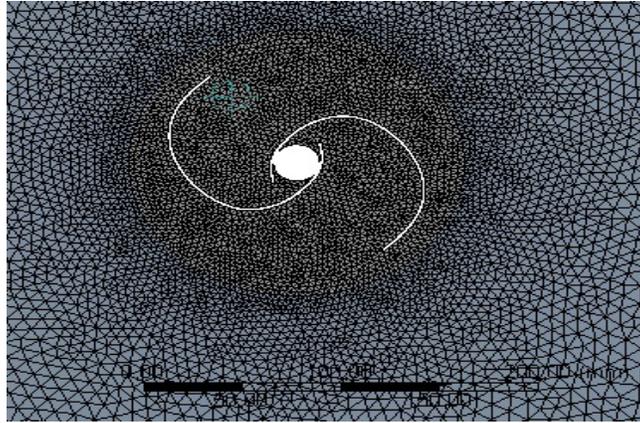


Figura 22. Mallado acercamiento 1

En la figura número 22 se puede ver el estilo de mallado seleccionado para la simulación, es de tipo Tetragonal y de los más adaptables a cualquier sistema. Esta opción de mallado simula un ambiente más cercano a la realidad a la hora de estudios de fluido, a causa de la naturaleza de su patrón.

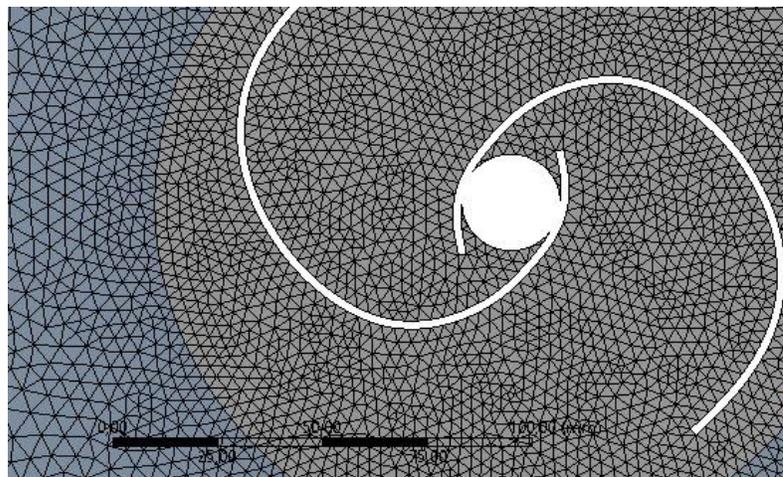


Figura 23. Mallado acercamiento 2

En la figura número 23 se muestra la diferencia entre los dos dominios que se realizaron y la convergencia entre estos de manera perfecta, esto permite una correcta lectura en la frontera de ambas mallas, entregando precisión al estudio.

Dentro del dominio del círculo se usó un tamaño de mallado de 3 milímetros, al poseer un tamaño milimétrico menor, en el área de la turbina, permite a los investigadores un estudio eficiente del comportamiento fluidodinámico alrededor de la turbina.

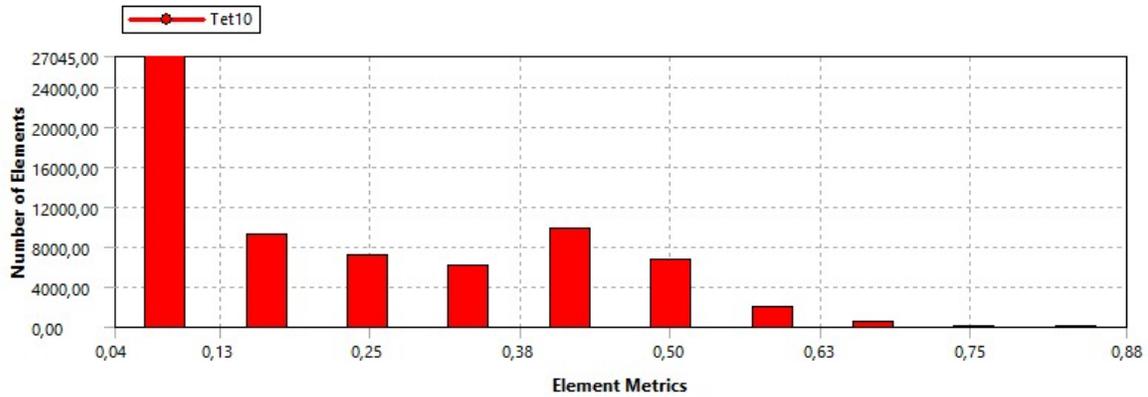


Figura 24. Calidad de Mallado

En la figura número 24 se muestra una gráfica de calidad de mallado, ésta se mide de tal forma que entre más tiendan a 0 los elementos, la calidad de mallado será mejor.

0.4 indica excelente calidad de mallado.

0.25 muy buena calidad de mallado.

0.50 buena calidad de mallado.

De 0.50 para adelante se considera media calidad de mallado.

Statistics	
Nodes	139559
Elements	68388

Figura 25. Numero de Nodos y elementos

En total se indican que hay 68388 elementos que conforman la simulación, observando un rango de trabajo entre 0.25 y 0.4 (rango principal en el que se encuentra la turbina), indicado en la tabla anterior. Es decir que los datos en la turbina están siendo medidos por 44045 elementos aproximadamente, demostrando que la calidad de los datos será excelente.

Condiciones de frontera:

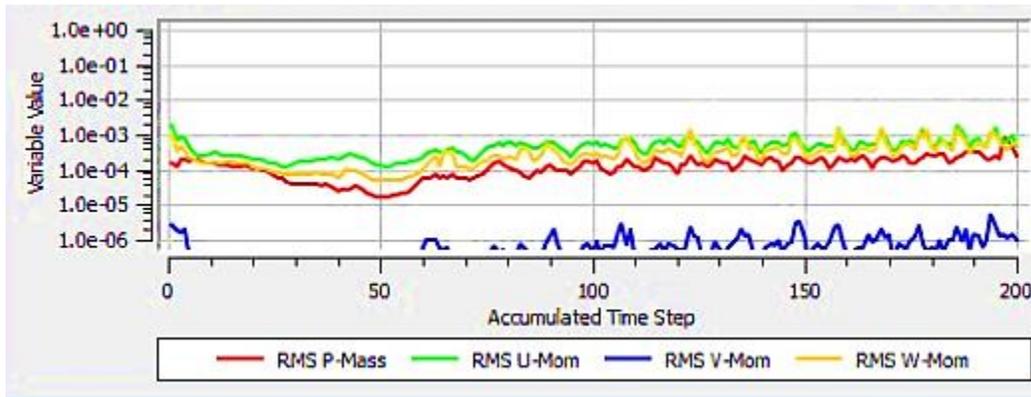


Figura 26. Momento y Masa

En la figura número 26 se analiza cómo los datos estuvieron en una escala entre  $e^{-3}$  y  $e^{-4}$ , valores destacables que indican una buena simulación. Además, v-mom estuvo en una escala de  $e^{-6}$  lo cual indica que estos datos serán más precisos.

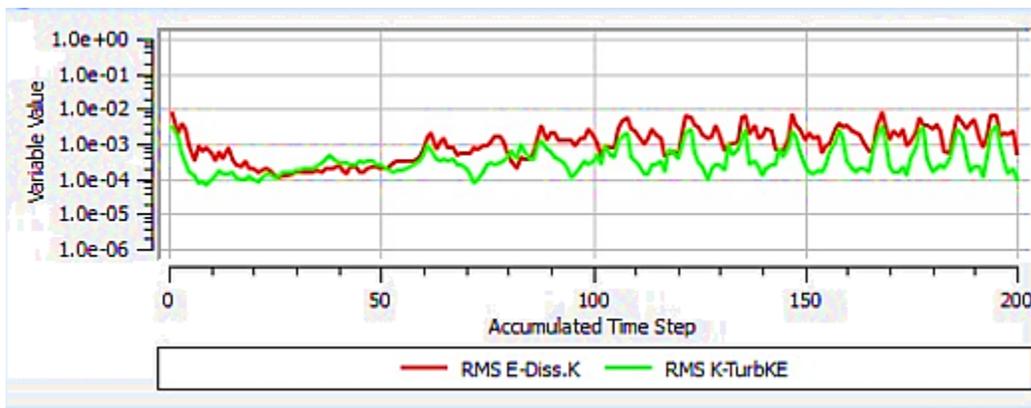


Figura 27. Turbulencia

Los niveles de turbulencia también presentaron valores favorables en la simulación debido a su ubicación en rangos de valores entre  $e^{-2}$  y  $e^{-4}$

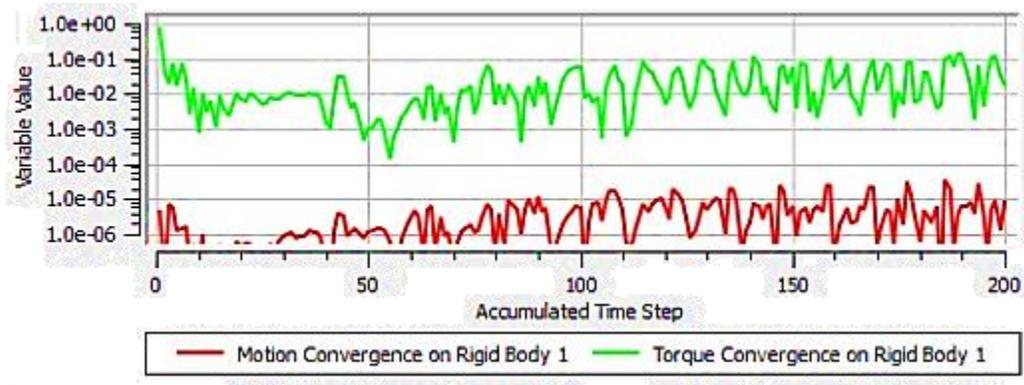


Figura 28. Rigid body

En la figura número 29 se puede notar un ligero error de  $e^{-01}$  en el torque. No obstante, después se logra estabilizar, a diferencia del movimiento que se mantiene en un rango de  $e^{-05}$  y  $e^{-06}$  lo cual lo vuelve más preciso.

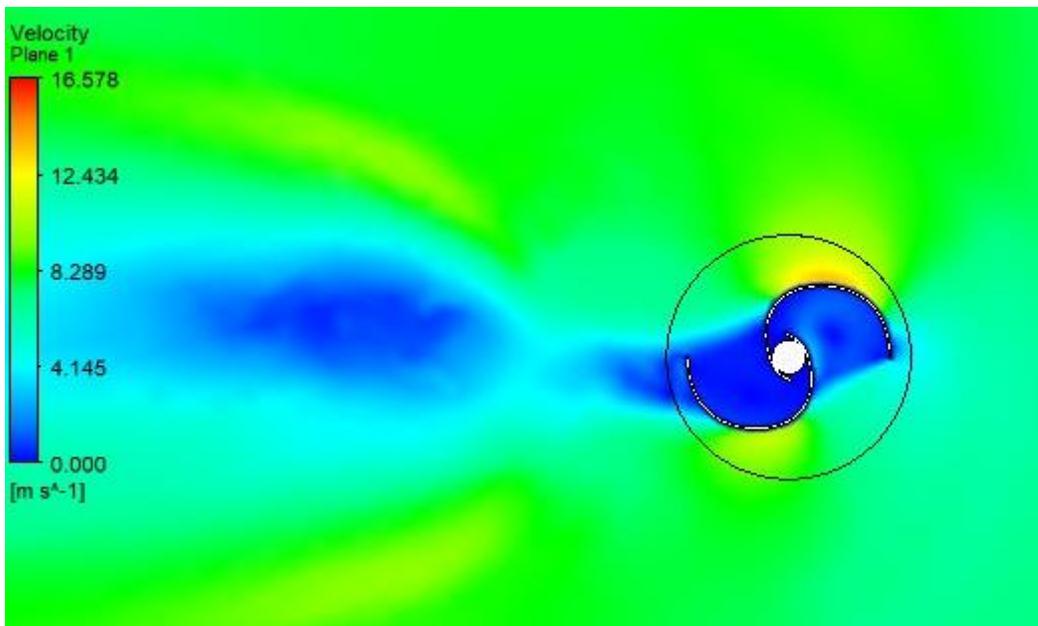


Figura 29. Simulación de turbina diseño #3

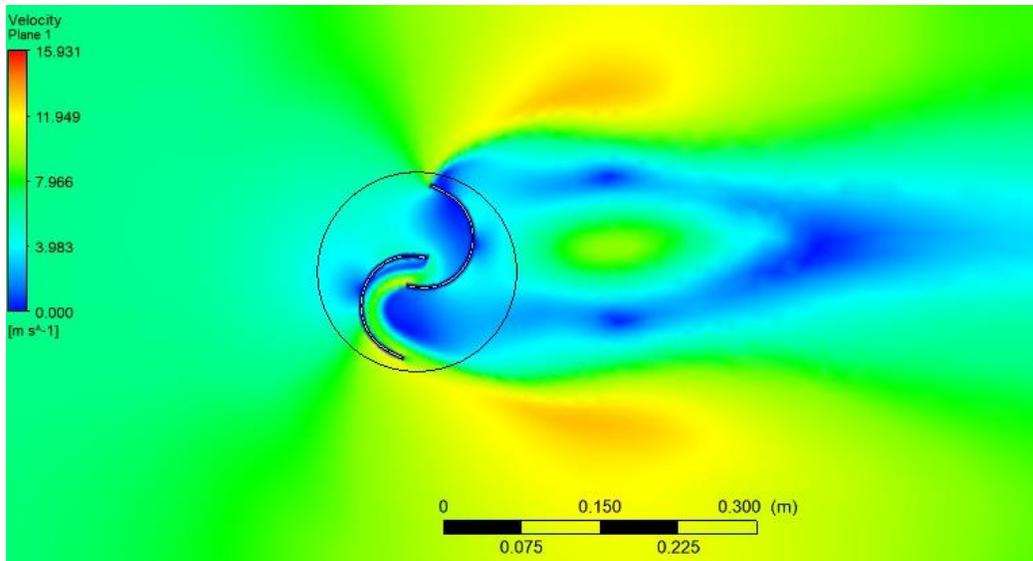


Figura 30. Simulación de turbina diseño #6

Por ultimo en las figuras 29 y 30 son directas desde las simulaciones de ambas turbinas, mediante el programa ANSYS. A su izquierda podemos observar una escala del plano de velocidades mostrando desde la imagen la velocidad, que toma el viento en diferentes áreas conforme circula por la turbina de la turbina; datos que serán de vital importancia en próximos análisis.

## 6.2.2. TURBINAS EÓLICAS DE EJE VERTICAL FINALES

Tras las simulaciones de los prototipos realizadas para tomar validez numérica de los datos, se pasó a un debido ajuste de los prototipos. Esto nos dejó los diseños finales preparados para la toma respectiva de datos finales, a continuación, en las figuras 31 y 32 podremos apreciar el resultado de esto:



*Figura 31. Turbina Eolica Diseño #3 Final*



*Figura 32. Turbina Eolica Diseño #6 Final*

Mas figuras con acercamientos al dispositivo serán encontradas en los anexos de la investigación. A continuación, se presentan las dimensiones que poseen las turbinas eólicas de eje vertical armadas a raíz de la investigación realizada:

Tabla 8. Dimensiones del dispositivo.

<b>Sección</b>	<b>Medida</b>
Largo de alabe #3	23cm
Diámetro de alabe # 3	14,5
Largo de alabe #6	23cm
Diámetro de alabe # 6	17cm
Base	40cmx40cmx1.5cm
Sujeción de acero superior	26cm
Largo de soporte de madera	48cm
Medidas de soporte inferior	12cmx12cmx12
Alto Recubrimiento del motor	4cm
Diámetro superior del recubrimiento del motor	6cm
Diámetro inferior del recubrimiento del motor	7cm
Largo del eje inferior	3cm
Diámetro superior del eje inferior	2mm
Diámetro inferior del eje inferior	1.5cm

### 6.3. MATERIALES

#### 6.3.1. Motor motorreductor 6V

El motor moto reductor es una pieza fundamental a la hora de construir el dispositivo, pues este es quien permite transformar la potencia del viento que hace girar la turbina en energía eléctrica. Para este trabajo se utilizó un micromotor reductor metálico 100: 1LP 6V, sus características podrán encontrarse en la siguiente tabla [80]:

Tabla 9. Dimensiones del Motorreductor

<b>Tamaño</b>	10mmx12mmx35mm
---------------	----------------

<b>Peso</b>	4,5g
<b>Diámetro de eje</b>	3mm
<b>Relación de engranajes</b>	100,37 : 1
<b>Velocidad máxima a 6V</b>	120rpm
<b>Consumo de corriente a 6V</b>	40mA
<b>Corriente de parada a 6V</b>	360mA
<b>Torque de parada a 6V</b>	0,86 kgf*cm

### **6.3.2. Tubos PVC**

El tubo PVC de 4 pulgadas fue utilizado para el diseño de los alabes de la turbina. Tras un debido corte a la mitad de la circunferencia, éste se fue calentado y doblado de manera tal que asemejase a las curvaturas presentadas en los planos anteriores. Las características livianas y resistentes del tubo PVC lo hicieron ideal como material seleccionado para los alabes, esperando así el mayor aprovechamiento del viento posible sin agregar mucho peso al diseño.

### **6.3.3. Maderas y soportes**

Se puede denotar en el dispositivo el gran uso de madera en su esqueleto. El soporte del dispositivo esta hecho mayoritariamente de dicho material, tanto prensado como MDF. Las láminas de madera prensada fueron utilizadas como base y tapa para el diseño #6, mientras que la MDF se utilizó como base del soporte y motor en el dispositivo. Además en el diseño #3 se empleó para su eje por la simplicidad que representa a la hora de la construcción, al igual que el soporte superior que sostiene a las turbinas.

### **6.3.4. Aceros y cableado**

Por último, se encuentran las uniones del dispositivo, mediante el uso de tornillos de 5 mms, tuercas, remaches, tornillos punta fina y demás, fue posible la correcta unión de la base, el soporte superior, las turbinas, alabes, entre otros. Además, se

utilizó UTP para conectar y afianzar de mejor manera la toma de medidas de voltaje y corriente para las futuras pruebas.

#### 6.4. RECOLECCIÓN DE DATOS

Primeramente se realizó un proceso de selección entre una vasta cantidad de trabajos, tanto externos como propios de la universidad, para juzgar cuales debían ser las variables más importantes a la hora de optar por un diseño. Para ello se realizó la correspondiente lectura de cada uno y distinción de las variables consideradas como importantes individualmente.

Tabla 10. Trabajos a seleccionar

Trabajo	Autores y Variables a Considerar
1. Numerical study of two-bucket Savonius wind turbine cluster.	<b>Autores:</b> Mohammed Shaheen, Mohammed El-Sayed y Shaaban Abdallah. <b>Variables:</b> Dimensiones, análisis de fases, potencia, torque, posiciones.
2. Selección y simulación mecánica de una turbina eólica para generación de energía e iluminación en la carretera barranquilla-ciénaga km 19	<b>Autores:</b> Santiago José Miranda Velásquez <b>Variables:</b> Propósito de la turbina, energía mínima generada, rango de velocidad, tamaño máximo permitido según especificaciones.
3. Modelado computacional del comportamiento fluidodinámico de una turbina eólica bioinspirada	<b>Autores:</b> Franklin José Velásquez Bermúdez y Álvaro José Caballero Gutiérrez. <b>Variables:</b> Cantidad de hélices, velocidades del viento, geometría, eficiencia en funcionamiento demostrada teóricamente.
4. Numerical analysis on overall performance of SAVONIUS turbines adjacent to a natural draft cooling tower	<b>Autores:</b> M. Goodarzi y R. Caimanes. <b>Variables:</b> Planos dimensionales, potencia, velocidad, transferencia de calor.
5. An inverse method for optimization of geometric parameters of a SAVONIUS style wind turbine	<b>Autores:</b> Sakuta Roy, Ranjan Das y Ujjwal K. Saha. <b>Variables:</b> Planos dimensionales, potencia, velocidades, torque, diversos usos.
6. Flow field and performance study of vertical axis Savonius type SST wind turbine	<b>Autores:</b> Abdullah Al-Faruk y Ahmad Sharifian <b>Variables:</b> Métodos de construcción, cantidad de calor utilizable para mejorar la eficiencia, ciclo de vida.
7. Parametric numerical study of savonius wind turbine	<b>Autores:</b> R.mereu, D. federici y G. Ferrari. <b>Variables:</b> Geometría del diseño a estudiar, estudios fluidodinámicos de los dispositivos.

8. Blade shape optimization of the SAVONIUS wind turbine using a genetic algorithm	<p><b>Autores:</b> C.M. Chan, H.I. Bai y D.Q. He.</p> <p><b>Variables:</b> Potencia, rotor, programa de simulación, diagrama de control, coeficientes de corriente, posiciones</p>
9. Design and numerical investigation of SAVONIUS wind turbine with discharge flow directing capability	<p><b>Autores:</b> Motaba Tahami, Ali Rabbani, Alibakhsh Kasaeian, Mehdi Mehrpooya y Mojtaba Mirhosseini.</p> <p><b>Variables:</b> Dimensiones, planos, potencia, torque, porcentaje de error, modelo 3D.</p>
10. Performance analysis of a single stage modified savonius hydrokinetic turbine having twisted blades	<p><b>Autores:</b> Anuj kumar y Research scholar.</p> <p><b>Variables:</b> Relación de aspecto, relación de solapamiento, diámetro del rotor, altura del rotor, diámetro de la placa terminal, ángulo de giro, factor de forma de cuchilla.</p>
11. A computational study of the effects of the radius ratio and attachment angle on the performance of a darrieus-savonius combine wind turbine	<p><b>Autores:</b> Xiaoting lang, Sauchung fu, Baoxing ou, Chili wu, Christopher Y.H y Kaihong pi.</p> <p><b>Variables:</b> Radio del rotor combinado, ubicación del rotor, S Rotor D interior, tipo de pala del rotor, superposición del rotor S, tipo de rotor, perfil aerodinámico del rotor, longitud de cuerda de D-rotor.</p>
12. CFD Study of savonius wind turbine: 3D model validation and parametric analysis	<p><b>Autores:</b> R.mereu, D. federici y G. Ferrari.</p> <p><b>Variables:</b> Geometría de la turbina, comportamiento fluido dinámico, validación de parámetros anteriores en simulación.</p>
13. Theoretical study on the prediction of the hydrodynamic performance of a Savonius turbine based on stagnation pressure and impulse momentum principle	<p><b>Autores:</b> Vilma Patel, T.I. Eldho y S.V. Prahu</p> <p><b>Variables:</b> Tipo de fluido, estudio por segmento, dimensiones, velocidades, potencia, torque, rotor.</p>
14. Performance parameters of savonius type hydrokinetic turbine	<p><b>Autores:</b> Anuj kumar y Rp sainir</p> <p><b>Variables:</b> Eficiencia, capacidad de arranque automático, forma del rotor, forma de superficie aerodinámica, tamaño de hoja, problemas en la corriente del río, requisitos para componentes sellados, capacidad de instalación.</p>
15. Performance study of ducted nozzle SAVONIUS water turbine comparison conventional SAVONIUS turbine	<p><b>Autores:</b> A.H. El Batran, Yasser M. Ahmed y Ahmed S. Shehata</p> <p><b>Variables:</b> Dimensiones, fluido, velocidades, TSR, análisis por partes, factor de potencia.</p>
16. Experimental and computational evaluation of SAVONIUS hydrokinetic turbine for low velocity condition with comparison to SAVONIUS wind turbine at the same input	<p><b>Autores:</b> N.K. Sarma, A. Biswas y R.D. Misra</p> <p><b>Variables:</b> Tipo de fluido, material, número de hélices, torque, nivel de refinamiento, poder, velocidad, geometría.</p>
17. CFD analysis of an innovative combined lift and drag (CLD) based modified SAVONIUS water turbine	<p><b>Autores:</b> M. Basumatary, A. Biswas y R.D. Misra</p> <p><b>Variables:</b> Tipo de fluido, posiciones, potencia, ratio</p>
18. CFD performance enhancement of a low cut-in speed current vertical tidal turbine through the nested hybridization of SAVONIUS and DARRIEUS	<p><b>Autores:</b> Saif ed-Din Fertahi, T. Bouhal, Omar Rajad, T. Kosko, A. Arid, T. El Rafiky y A. Jamil, A. Ben Bassou</p> <p><b>Variables:</b> Tipo de turbina, velocidades, torque, potencia, dimensiones, tipo de fluido</p>

Posteriormente, en base a una discusión y análisis de los resultados, se decidieron los parámetros más importantes de acuerdo con la repetitividad de estos:

- Geometría.
- Velocidad de arranque.
- Dimensiones.
- Tipo de Fluido.
- Cantidad de calor.
- Material de construcción.
- Torque vs Potencia.
- Rotor vs potencia.
- Eficiencia.
- TSR.

A continuación, se procedió a la realización de una matriz de choque entre dichos parámetros para reducir su cantidad y juzgar el nivel de importancia de los mismos, lo cual se verifica en la siguiente tabla:

Tabla 11. Matriz de choque

Parámetros	Geometría	Cantidad de calor	Dimensiones	Rotor	T vs V angular	TSR	V de arranque	Fluido	Material	Total
Geometría	-	3	5	5	4	5	3	3	2	30
Cantidad de calor	3	-	1	2	4	1	1	1	3	16
Dimensiones	5	1	-	5	4	2	1	2	4	24

Rotor	5	2	5	-	4	4	5	4	4	33
T vs V Angular	4	4	4	4	-	5	5	4	5	35
TSR	5	1	2	4	5	-	4	1	3	25
V de Arranque	3	1	1	5	5	4	-	4	3	26
Fluido	3	1	2	4	4	1	4	-	4	19
Material	2	3	4	4	5	3	3	4	-	28

Por consiguiente, se presentan los niveles de importancia a juzgar en la matriz para el análisis de resultados y selección de los parámetros.

Tabla 12. Nivel de importancia matriz de choque

Numeración de importancia	
1	Sin importancia
2	Poca importancia
3	Media importancia
4	Importante
5	Muy importante

De acuerdo con ello se seleccionaron los siguientes como parámetros a juzgar en los diseños para su debida selección:

- Torque vs Velocidad Angular.
- Geometría.
- Materiales.
- Rotor.

Aunado a lo anterior, se seleccionaron los diseños a construir de acuerdo con la presente tabla de selección:

Tabla 12 Selección de diseños

Diseños	T vs V	Rotor	Geometría	Materiales	Total:
1	5	2	5	0	12
2	4	3	3	0	10
3	1	3	5	3	12
4	-	-	-	-	-
5	5	2	4	1	12
6	5	2	4	2	13
7	5	2	4	0	11
8	4	2	3	0	10
9	5	2	4	1	12
10	5	2	3	0	10
11	5	3	3	0	11
12	5	2	5	0	12

Nota: Los diseños están ordenados de acuerdo con la tabla 8 de trabajos a seleccionar al inicio de este ítem. Los diseños del 13 en adelante fueron descartados por el tipo de fluido que manejaban o implicaciones extras que presentaron una dificultad para los investigadores.

A continuación, se presentan de manera resumida los criterios de puntuación de la tabla, estos en base al estudio de 4 trabajos generales que podrán encontrar en los anexos:

- Criterio Potencia:

En este parámetro se plantea el tomar el coeficiente de potencia de los diversos trabajos, referenciados en los anexos, para obtener un coeficiente neto. Este se utiliza a su vez para la comparación con los diseños a juzgar y de allí obtener un valor que sume en la tabla. Si el trabajo posee un Cp mucho mejor del mínimo aceptado será calificado con un 0 en la tabla.

$$C_{pt} = C_{p1} + C_{p2} + C_{p3} + C_{p4} \text{ Ecuación 27}$$

$$C_{pp} = C_{pt} / 4 \text{ Ecuación 28}$$

$C_{pp} = 0,195$

Nota: Los Cp1 al 4 fueron referenciados en los anexos, son coeficientes de potencia encontrados en los 4 trabajos estudiados para analizar debidamente este parámetro en la tabla.

Tabla 13. Criterio de selección Cp

Cp	- 0.015	-0.01	$C_{pp} \pm 0.005$	+0.01	+0.015
Valor de tabla	1	2	3	4	5

- Criterio Rotor:

En este parámetro se juzgo el tipo de rotor que posee el diseño de la turbina con respecto a su calidad y frecuencia de uso en los trabajos, de los anexos, como guía para así poder elegir el diseño que demuestre mejores valores para su posterior comprobación.

Tabla 14. Criterio de selección Rotor

Parámetro	Darreus	Savonius	Optimizado
Valor de tabla	1	2	3

- Criterio Geometría:

Dependiendo de la cercanía presentada en la comparación de diseños entre los trabajos, referenciados en los anexos, con los trabajos a juzgar, estos recibirán una puntuación:

Tabla 15. Criterio de selección Geometría

Parámetro	No parecido	Poco Parecido	Parecido	Muy Parecido	Demasiado Parecido
Valor de Tabla:	1	2	3	4	5

- Criterio Material:

Este parámetro se utilizó para comparar los materiales utilizados por los trabajos, referenciados en los anexos, con los materiales utilizados en los trabajos a juzgar. En su defecto, si los trabajos no incluyen un material serán juzgados con un 0 en la tabla.

Tabla 16. Criterio de selección material

Parámetro	Sin Material	Peor Material	Material	Mejor Material
Valor de tabla	0	1	2	3

Una vez puntuados los diferentes diseños se procedió a seleccionar dos de ellos:

El diseño #6 Flow field and performance study of vertical axis Savonius type SST wind turbine, el cual fue propuesto por los autores Abdullah Al-Faruk y Ahmad Sharifian y posee un interesante método de uso por el aprovechamiento del remolino interno que se genera en sus hélices [81]. Por otra parte, la segunda opción se trata de un prototipo de la Universidad Autónoma del Caribe de entre los varios diseños, con el propósito de comparar y validar los datos presentados por

los estudiantes tanto con su prototipo virtual como con el diseño físico anterior; éste es el diseño bioinspirado #3, el cual se seleccionó debido a su puntaje en la tabla [20].

Con los prototipos del diseño #3 y #6 armados se pasó al periodo de pruebas con el objetivo de hallar el coeficiente de potencia generado por estos, las tablas 17 y 18 presentan los datos obtenidos:

Tabla 17. Datos del prototipo diseño #3

<b>Datos Prototipo Diseño # 3</b>				
Tiempo (seg)	Voltaje (Volt)	Corriente (A)	Potencia (Watts)	Cp
1	0,1	0,0106	0,00106	0,00015067
2	0,4	0,0217	0,00868	0,00123383
3	0,3	0,0196	0,00588	0,00083582
4	0,9	0,06	0,054	0,00767589
5	0,6	0,0133	0,00798	0,00113433
6	0,7	0,0411	0,02877	0,00408954
7	0,7	0,0435	0,03045	0,00432835
8	0,8	0,0555	0,0444	0,00631129
9	0,6	0,0382	0,02292	0,00325799
10	0,3	0,0309	0,00927	0,00131769
11	0,9	0,0565	0,05085	0,00722813
12	0,7	0,0398	0,02786	0,00396019
13	0,8	0,0888	0,07104	0,01009806
14	0,6	0,0307	0,01842	0,00261833
15	0,9	0,0631	0,05679	0,00807248
16	0,8	0,0578	0,04624	0,00657284
17	0,3	0,0359	0,01077	0,00153091
18	0,6	0,0483	0,02898	0,00411939
19	0,8	0,0491	0,03928	0,0055835
20	1,1	0,08	0,088	0,01250886

Tabla 18. Datos del prototipo diseño #6

<b>Datos Prototipo Diseño # 6</b>				
Tiempo (seg)	Voltaje(Volt)	Corriente (A)	Potencia (Watts)	Cp
1	0,1	0,0156	0,00156	0,00018914
2	0,5	0,0297	0,01485	0,00180045
3	0,9	0,0646	0,05814	0,00704902
4	0,1	0,06	0,006	0,00072745
5	0,3	0,0133	0,00399	0,00048376
6	0,4	0,0623	0,02492	0,00302136
7	0,5	0,0536	0,0268	0,00324929
8	1,1	0,0673	0,07403	0,00897556
9	0,9	0,0329	0,02961	0,00358998
10	1,5	0,0702	0,1053	0,01276681
11	0,6	0,0601	0,03606	0,004372
12	0,2	0,0146	0,00292	0,00035403
13	1	0,0712	0,0712	0,00863245
14	2,1	0,0493	0,10353	0,01255221
15	0,9	0,0646	0,05814	0,00704902
16	1,4	0,0486	0,06804	0,00824932
17	1	0,0543	0,0543	0,00658345
18	3	0,0889	0,2667	0,03233531
19	1,7	0,0717	0,12189	0,01477822
20	3,2	0,0656	0,20992	0,02545117

A continuación, se presentan la recolección de datos de los diseños de los prototipos simulados, sus momentos de inercia y diversas variables recolectadas por el programa ANSYS tras su debida simulación:

Tabla 19. Momentos de inercia diseño #3

<b>Momento de inercia 3 (gramo*milímetro cuadrado)</b>	
Coordenada	Valor
lxx	5988137.26
lxy	0.00
lxz	71351.81
lyx	0.00
lyy	547307.53
lyz	0.00
lzx	71351.81
lzy	0.00
lzz	6248707.63

Tabla 20. Momentos de inercia diseño #6

Momento de inercia 6 (gramo*milímetro cuadrado)	
Coordenada	Valor
lxx	6889879.89
lxy	0.00
lxz	165293.31
lyx	0.00
lyy	1046245.92
lyz	0.00
lzx	165293.31
lzy	0.00
lzz	7141088.61

Tabla 21. Tabla de datos Diseño #3 simulado

Diseño 3 Bioinspirado Simulado						
Tiempo (seg)	Torque (J)	V angular (rad/s)	V tangencial (m/s)	Potencia (Watts)	Cp	TSR
0	0	0	0	0	0	0
0,1	0,0000454	139,4	9,761	0,00632876	0,000899609	1,394428571
0,2	0,00003305	140,3	9,819	0,004636915	0,000659119	1,402714286
0,3	0,00002302	144,7	10,13	0,003330994	0,000473488	1,447142857
0,4	0,00001911	144,6	10,12	0,002763306	0,000392793	1,445714286
0,5	0,00001998	143,8	10,07	0,002873124	0,000408403	1,438571429
0,6	0,0000218	143	10,01	0,0031174	0,000443126	1,43
0,7	0,00002393	141,9	9,931	0,003395667	0,000482681	1,418714286
0,8	0,0000245	141,1	9,876	0,00345695	0,000491392	1,410857143
0,9	0,00002444	140,7	9,85	0,003438708	0,000488799	1,407142857
1	0,00002523	139,7	9,782	0,003524631	0,000501013	1,397428571
2	0,00003574	143,5	10,04	0,00512869	0,000729023	1,434285714
3	0,00006632	154,7	10,83	0,010259704	0,001458377	1,547142857
4	0,00008253	171,1	11,98	0,014120883	0,002007228	1,711428571
5	0,0002593	199,8	13,99	0,05180814	0,007364325	1,998571429
6	0,0001056	171,5	12,01	0,0181104	0,002574323	1,715714286
7	0,0000181	159,6	11,18	0,00288876	0,000410626	1,597142857
8	0,0002578	193,3	13,53	0,04983274	0,007083529	1,932857143
9	0,00002877	174,7	12,23	0,005026119	0,000714443	1,747142857
10	0,0003136	211,4	14,8	0,06629504	0,009423581	2,114285714

11	0,000007248	150	10,5	0,0010872	0,000154541	1,5
12	0,00009794	197	13,79	0,01929418	0,002742592	1,97
13	0,0003632	226,4	15,85	0,08222848	0,011688457	2,264285714
14	0,0002259	190,2	13,31	0,04296618	0,006107475	1,901428571
15	0,00003975	170,9	11,96	0,006793275	0,000965637	1,708571429
16	- 0,000008205	166,4	11,65	-0,001365312	-0,000194074	1,664285714
17	-0,00001634	161,3	11,29	-0,002635642	-0,000374646	1,612857143
18	-0,00000574	166,7	11,67	-0,000956858	-0,000136014	1,667142857
19	0,00002526	175,6	12,29	0,004435656	0,000630511	1,755714286
20	0,0001704	184	12,88	0,0313536	0,004456792	1,84

Tabla 22. Tabla de datos diseño #6 simulado

Diseño 6 Tornado Simulado						
Tiempo (seg)	Torque(J)	V angular (rad/s)	V tangencial (m/s)	Potencia (Watts)	Cp	TSR
0	0	0	0	0	0	0
0,1	0,0002098	137,7	11,71	0,02888946	0,00350262	1,67285714
0,2	0,0002984	164,2	13,96	0,04899728	0,00594054	1,99428571
0,3	0,000292	161,5	13,73	0,047158	0,00571754	1,96142857
0,4	0,0002879	159,3	13,54	0,04586247	0,00556047	1,93428571
0,5	0,000286	156,4	13,3	0,0447304	0,00542321	1,9
0,6	0,0002805	156,5	13,3	0,04389825	0,00532232	1,9
0,7	0,0002789	156,8	13,33	0,04373152	0,00530211	1,90428571
0,8	0,0002837	155,3	13,2	0,04405861	0,00534177	1,88571429
0,9	0,0002955	154,3	13,12	0,04559565	0,00552812	1,87428571
1	0,0003126	155,1	13,19	0,04848426	0,00587834	1,88428571
2	0,0004582	159,5	13,35	0,0730829	0,00886074	1,90714286
3	0,0002777	170,7	14,15	0,04740339	0,00574729	2,02142857
4	0,0002248	125,9	10,7	0,02830232	0,00343144	1,52857143
5	0,000429	145	12,33	0,062205	0,00754187	1,76142857
6	0,0001944	124,1	10,55	0,02412504	0,00292497	1,50714286
7	0,000342	186,2	15,83	0,0636804	0,00772076	2,26142857
8	0,0004194	172,8	14,69	0,07247232	0,00878671	2,09857143
9	0,0002624	146,3	12,43	0,03838912	0,00465438	1,77571429
10	0,0001997	122,5	10,41	0,02446325	0,00296598	1,48714286
11	0,0001822	121,5	10,32	0,0221373	0,00268398	1,47428571
12	0,0002234	132,9	11,3	0,02968986	0,00359967	1,61428571
13	0,0002952	164,6	13,99	0,04858992	0,00589115	1,99857143

14	0,0004403	143	12,15	0,0629629	0,00763376	1,73571429
15	0,0001912	137,1	11,65	0,02621352	0,00317819	1,66428571
16	0,0002962	164,8	14,01	0,04881376	0,00591829	2,00142857
17	0,0002054	153	13,01	0,0314262	0,00381018	1,85857143
18	0,0004283	177,6	15,1	0,07606608	0,00922242	2,15714286
19	0,0001944	122,8	10,44	0,02387232	0,00289433	1,49142857
20	0,0001795	138,4	11,76	0,0248428	0,003012	1,68

Tras la correcta simulación se realizaron breves cambios y ajustes al diseño para la correcta presentación del diseño final, con esto los investigadores pasaron a tomar nuevamente las medidas pertinentes para hallar el nuevo coeficiente de potencia arrojado por las turbinas:

Tabla 23. Tabla de datos diseño #3 Final

Tabla de datos Diseño # 3 Final				
Tiempo (seg)	Voltaje(Volt)	Corriente (A)	Potencia (Watts)	Cp
1	0,1	0,00224	0,000224	3,18407E-05
2	0,64	0,006	0,00384	0,000545841
3	0,71	0,0125	0,008875	0,001261547
4	0,66	0,0214	0,014124	0,002007671
5	0,76	0,0641	0,048716	0,006924789
6	0,61	0,0217	0,013237	0,001881588
7	0,66	0,0144	0,009504	0,001350956
8	0,71	0,0501	0,035571	0,005056279
9	0,81	0,00621	0,0050301	0,000715009
10	0,92	0,062	0,05704	0,008108013
11	0,63	0,0018	0,001134	0,000161194
12	0,64	0,02	0,0128	0,00181947
13	1,3	0,0545	0,07085	0,010071051
14	0,91	0,048	0,04368	0,006208941
15	0,66	0,0151	0,009966	0,001416628
16	0,63	0,02316	0,0145908	0,002074025
17	0,5	0,0552	0,0276	0,003923232
18	0,69	0,019	0,01311	0,001863535
19	0,71	0,0062	0,004402	0,000625727
20	0,7	0,0448	0,03136	0,004457701

Tabla 24. Tabla de datos diseño #6 Final

Tabla de datos Diseño # 6 Final				
Tiempo (seg)	Voltaje (Volt)	Corriente (A)	Potencia (Watts)	Cp

1	1	0,00728	0,00728	0,00088264
2	1,1	0,01285	0,014135	0,00171376
3	1,2	0,0223	0,02676	0,00324444
4	1,2	0,03	0,036	0,00436472
5	1,3	0,00865	0,011245	0,00136337
6	1,4	0,03115	0,04361	0,00528737
7	1,5	0,0268	0,0402	0,00487394
8	1,7	0,03365	0,057205	0,00693566
9	1,8	0,01445	0,02601	0,00315351
10	1,9	0,0321	0,06099	0,00739457
11	1,8	0,03805	0,06849	0,00830388
12	1,7	0,0493	0,08381	0,01016131
13	1,8	0,0386	0,06948	0,00842391
14	1,9	0,01265	0,024035	0,00291406
15	2	0,0323	0,0646	0,00783225
16	1,9	0,0243	0,04617	0,00559775
17	2	0,02115	0,0423	0,00512855
18	2	0,01045	0,0209	0,00253396
19	2	0,0165	0,033	0,00400099
20	2,1	0,0198	0,04158	0,00504125

## 6.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presentaran las gráficas y coeficiente de potencias respectivos por cada una de las tomas de datos de prototipos, simulaciones y diseños finales, con el propósito de observar claramente el comportamiento fluidodinámico en todos los casos:

### 6.5.1. ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS POR EL PROTOTIPO

En este ítem muestra el análisis de las tablas de resultados de los prototipos al graficar la potencia generada por cantidad de tiempo, en las figuras 33 y 34 podremos observar respectivamente la de cada diseño, #3 y #6:



Figura 33. Grafica de Potencia vs Tiempo Prototipo Diseño #3



Figura 34. Grafica de Potencia vs Tiempo Prototipo Diseño #6

Las anteriores graficas describen el comportamiento de la potencia a lo largo del tiempo, en estas se ve reflejado oscilaciones y picos de potencia esto debido a pequeñas fluctuaciones en la velocidad del viento (y/o variables alternas), además de esto cabe recalcar que se denota un aumento progresivo en el diseño #6 alcanzando valores de gran magnitud en comparación a el diseño # 3.

También utilizando la información de las Tablas 17 y 18 podemos hallar un Coeficiente de potencia promedio de ambos Prototipos mediante la siguiente formula:

Con esto los Coeficientes de Potencia promedio de los diseños respectivamente serían:

$$C_p = \frac{P}{P_t} \quad \text{Ecuación 29}$$

$$P = T * w \quad \text{Ecuación 30}$$

$$P_t = \frac{\rho A_s \bar{v}^3}{2} \quad \text{Ecuación 31}$$

$$C_{p3} = 0.0046314$$

$$C_{p6} = 0.008111$$

### 6.5.2. ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS POR EL DISPOSITIVO FINAL

A continuación, tras haber obtenido los resultados de los diseños prototipo, se pasó a analizar los resultados de las tablas 21 y 22, los cuales responden a los datos simulados en el programa ANSYS:

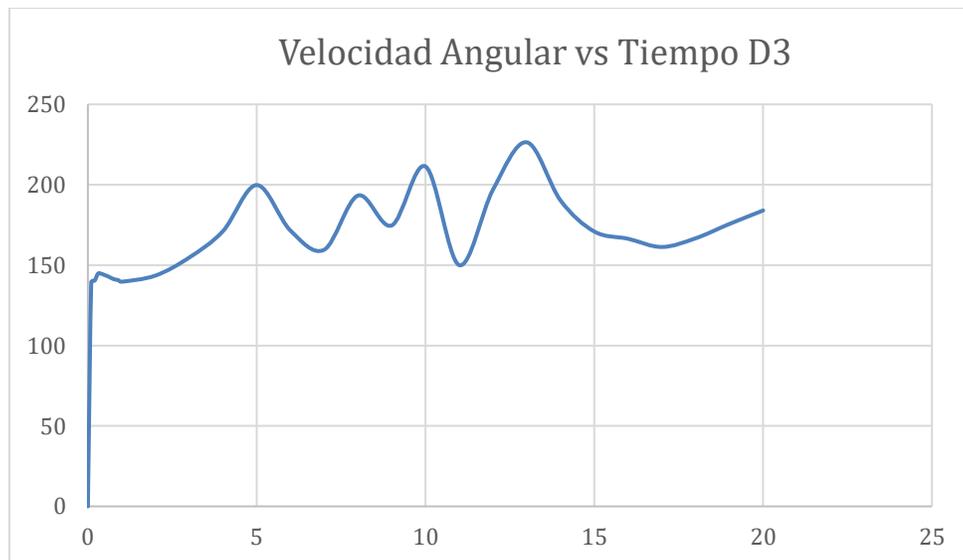


Figura 35. Velocidad Angular vs Tiempo Diseño #3 Simulados

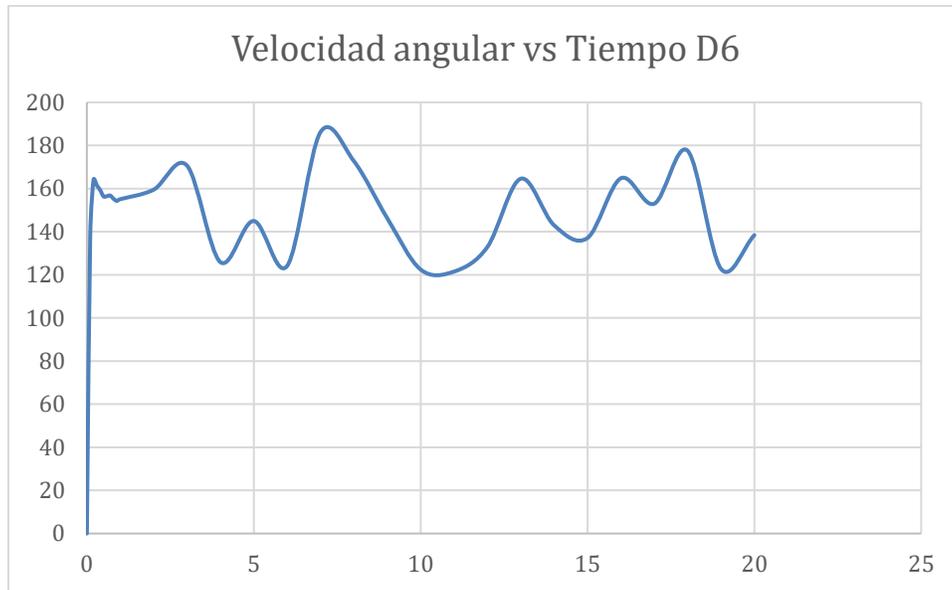


Figura 36. Velocidad Angular vs Tiempo Diseño #6 Simulados

En las figuras 35 y 36 se presentan las gráficas de la Velocidad angular vs el tiempo, de cada diseño de turbina respectivamente. Se puede analizar que ambas presentan una gran oscilación de valores, sin embargo el diseño #3 alcanza valores más altos que el diseño #6, sin embargo el diseño #6 es ligeramente más constante en su velocidad.

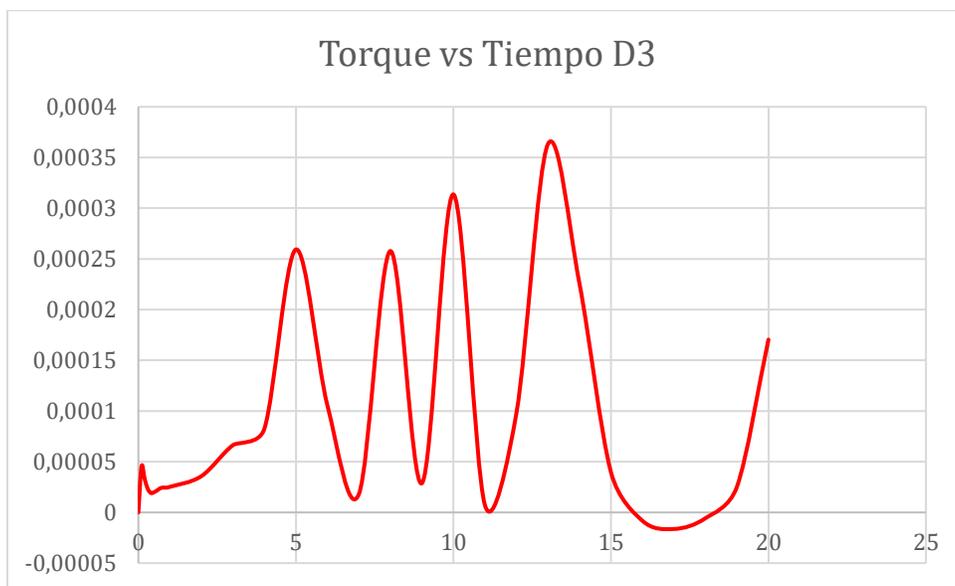


Figura 37. Torque vs Tiempo Diseño #3 Simulados

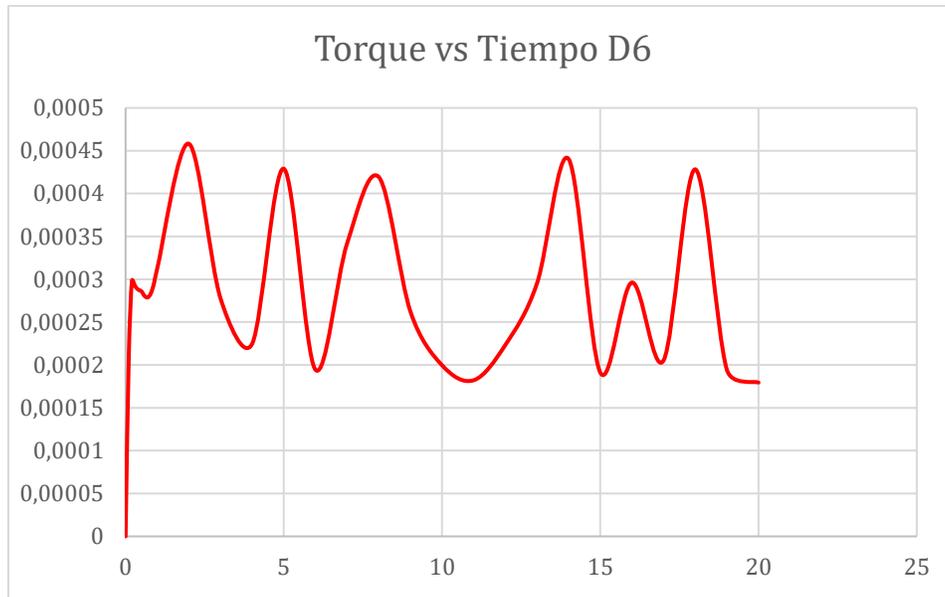


Figura 38. Torque vs Tiempo Diseño #6 Simulados

En las figuras 37 y 38 se presentan las gráficas del Torque vs el tiempo, de cada diseño de turbina respectivamente. Se logra observar un torque mucho mayor por parte del diseño #6, además de que su grafica no oscila hasta valores tan bajos como lo hace el diseño #3, logrando ser bastante estable por cantidad de tiempo. El diseño #3 además posee una menor cantidad de picos por tiempo que tiendan a un gran valor, así mismo sus caídas conforme al tiempo son más extensas.

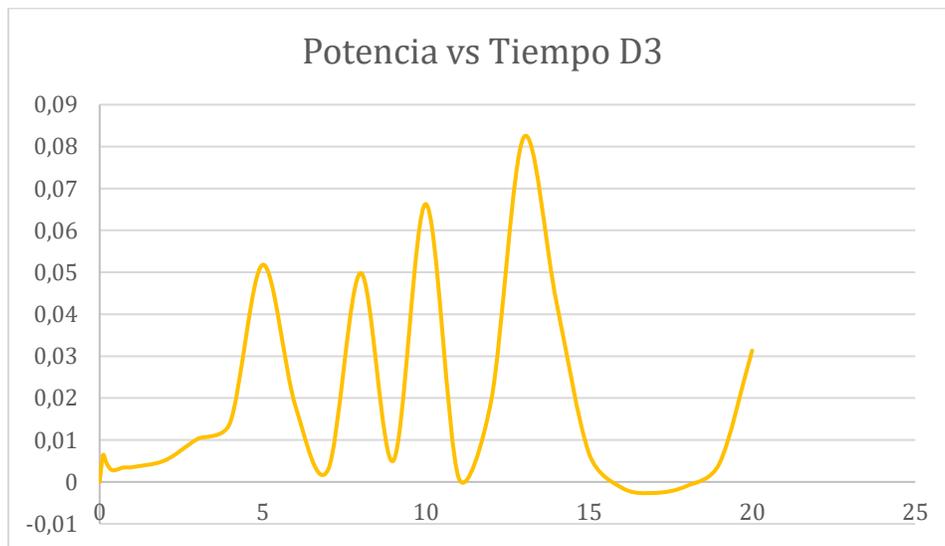


Figura 39. Torque vs Tiempo Diseño #3 Simulados

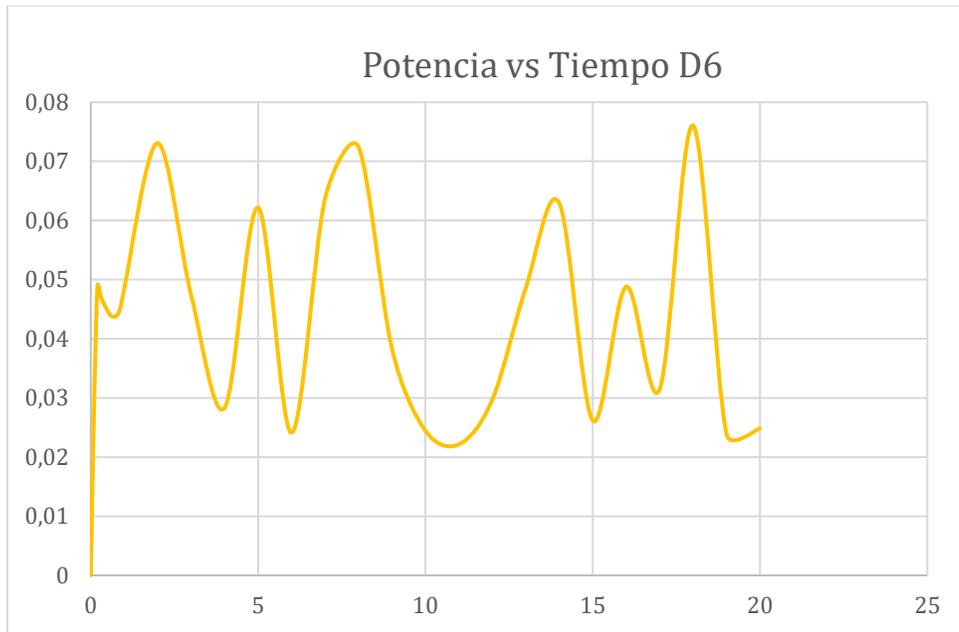


Figura 40. Torque vs Tiempo Diseño #6 Simulados

En las figuras 39 y 40 se presentan las gráficas del Torque vs el tiempo, de cada diseño de turbina respectivamente. El modelo #6 tiene más picos acercándose a 8 a pesar de oscilar más estas oscilaciones no decaen tanto como en el modelo #3 que a pesar de tener un pico de subida de aproximadamente de 8.5 también tiene varios picos de bajada significativos.

Tras la revisión de las anteriores gráficas, se presentan los Coeficientes de potencia promedios de cada uno de los diseños respectivamente, utilizando las mismas ecuaciones 29 a la 31 del análisis del prototipo. Con esto los  $C_p$  promedio simulados serian:

$C_{p_{pa3}}$ : 0,002915387

$C_{p_{pa6}}$ : 0,00516722

Además gracias a la herramienta de simulación ANSYS pudimos encontrar el TSR promedio de ambas turbinas tras el tiempo transcurrido, para ello utilizamos la siguiente ecuación:

$$TSR = \frac{\vec{v}_p}{\vec{v}} \quad \text{Ecuación 32}$$

Donde  $\vec{v}_p$  es igual a la velocidad tangencial de la turbina en el momento, y  $\vec{v}$  es igual a la velocidad del viento, con esto los TSR promedio de cada turbina serian:

$$TSR_{p3} = 1,754014286$$

$$TSR_{p6} = 1,79542857$$

Con las simulaciones analizadas se pasó a las tablas 23 y 24 de pruebas de dispositivo final, en donde se pudieron hallar las figuras de potencia vs tiempo 41 y 42, que responden a cada diseño respectivamente:

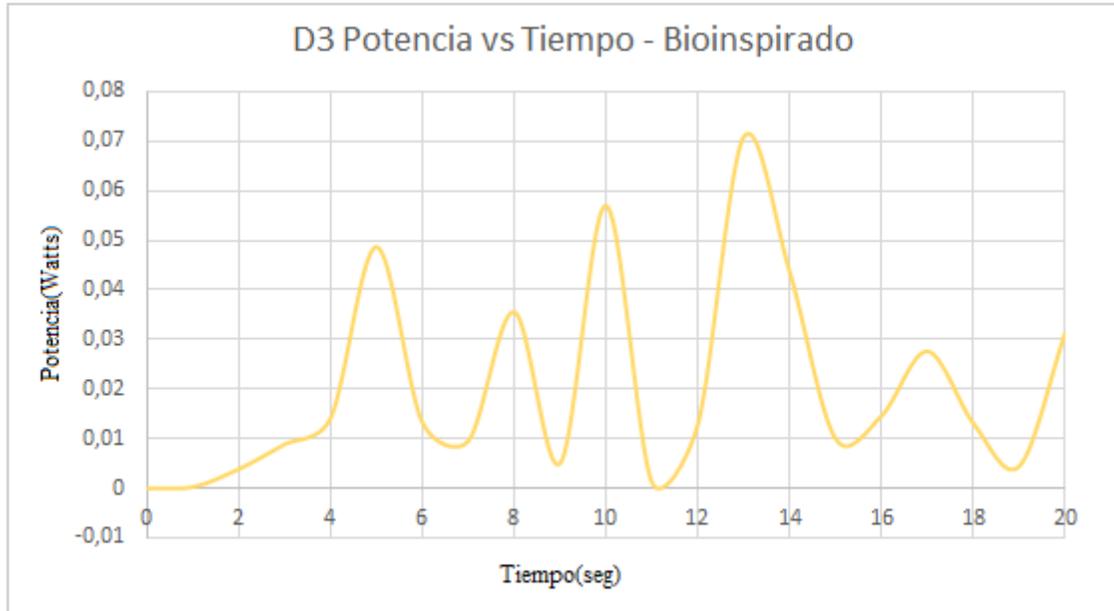


Figura 41. Grafica de Potencia vs Tiempo Diseño Final #3

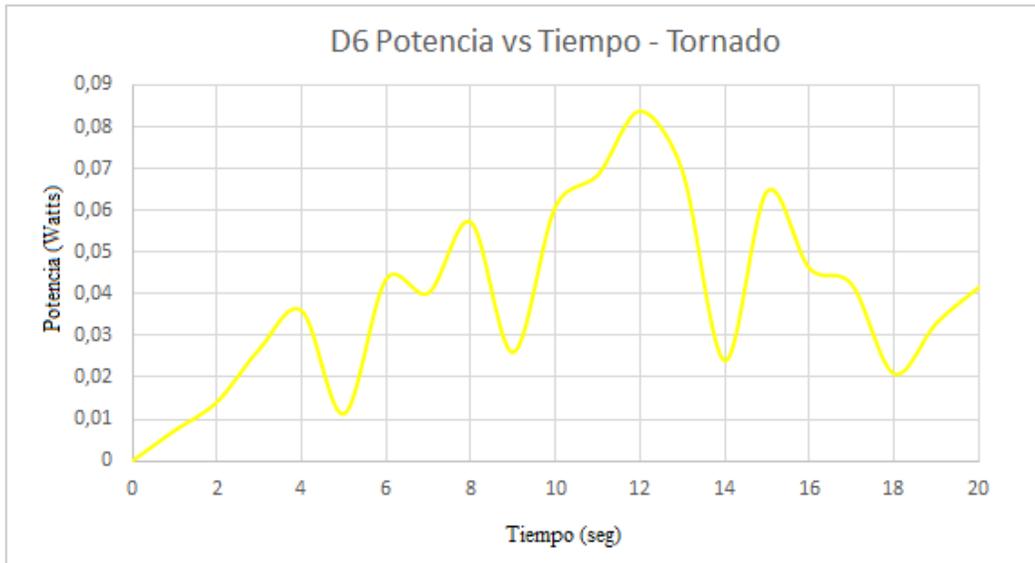


Figura 42. Grafica de Potencia vs Tiempo Diseño Final#6

Como se puede observar en la Figura 41 el diseño #3 presenta un menor crecimiento de potencia con respecto al tiempo, a diferencia del diseño #6 que posee un crecimiento prácticamente uniforme con una poca oscilación. A su vez el diseño #3 presenta un mejor arranque, sin embargo la respuesta tras el segundo 7 del diseño #6 presenta una mejora proporcional mayor.

Por último se calculó los coeficientes de potencia finales de cada uno de los diseños, utilizando nuevamente las ecuaciones 29 a la 31 para explicar cómo se hallan:

$$C_{p_{pf3}} = 0,003025252$$

$$C_{p_{pf6}} = 0,004957596$$

Con los datos del coeficiente promedio del diseño final se logra una aproximación mayor a los valores numéricos arrojados por las simulaciones en el software ANSYS. Haciendo la debida comparación de valores, el diseño #3 posee un porcentaje de error del 3,768% de acuerdo a la simulación, y el diseño #6 de un 4,056% respectivamente.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los parámetros de selección se determinaron mediante el uso de tablas y matrices de choque, permitiendo así filtrar únicamente 4 parámetros a utilizar de una gran variedad encontrados al inicio de la investigación, con la finalidad de seleccionar mediante los mismos los 2 diseños óptimos.

Mediante una matriz de choque utilizando los 4 parámetros seleccionados anteriormente, se seleccionaron 2 diseños a trabajar. Estos fueron estudiados a profundidad para armar así sus modelos CAD en el sistema SolidWorks y obtener los planos. Posteriormente a ello, se realizó la construcción de los prototipos, sus modelamientos CAD y simulaciones de los modelos mediante la herramienta ANSYS, para la debida obtención de datos numéricos. Por último se construyó un dispositivo final con el cual se realizaron pruebas experimentales.

Los datos se obtuvieron en 3 grupos diferentes; prototipos, simulaciones y diseños finales. Si bien el comportamiento del prototipo trataba de seguir el ideal de la simulación, los datos arrojados presentaron una gran diferencia debido a la fase en la que se encontraba el dispositivo, ya que diferentes variables externas y causas de su misma construcción afectaron la toma de datos de los investigadores, y se denotaban a la hora de la comparación de su coeficiente de potencia promedio, donde el porcentaje de error crecía demasiado.

El dispositivo final presenta una mayor similitud en el comportamiento respecto a la simulación, además de esto se logró acercar la escala de datos entre ambos produciendo un porcentaje de error de 3,7% en el diseño #3, y 4,05% en el diseño #6, en el coeficiente de potencia promedio.

En conclusión se puede observar un correcto comportamiento fluido dinámico por parte de los diseños, a pesar de la diferencia considerable en las medidas en relación a los diseños originales (Anexos), indicando así, que estos pueden ser aplicados en un ambiente real para la generación de energía limpia, ya que la herramienta computacional utilizada posee un correcto grado de similitud de

acuerdo a las pruebas experimentales, con un porcentaje de error menor del %5 en ambas turbinas.

Se recomienda, realizar la construcción de un prototipo más fiel o idéntico a las medidas originales de los diseños y de esta forma poder implementarlos en situaciones reales donde se pueda aprovechar la ganancia de energía presentada por los mismos, por ejemplo, en zonas no interconectadas del país, como ayuda a los sistemas eléctricos, entre otros, beneficiando así a al sector social.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] Salaet, S., y Roca, J. (2010, 01 de junio). Agotamiento de los combustibles fósiles y emisiones de co2: algunos posibles escenarios futuros. [Material disponible en línea] Recuperado el 17 de septiembre de 2019 de <https://www.redalyc.org/pdf/391/39113124001.pdf>.

[2] Quintero, M. e Isaza, F. (2013, 07 de julio). Dependencia hidrológica y regulatoria en la formación de precio de la energía en un sistema hidro dominado: caso sistema eléctrico colombiano. [Material disponible en línea] Recuperado el 18 de septiembre de 2019 de <https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/633/574>.

[3] Guaque, E. y Torres, G. (2014). Análisis aerodinámico de una microturbina eólica de eje vertical para la generación de energía eléctrica en una zona urbana de Bogotá, Colombia. [Material disponible en línea] Recuperado el 04 de Septiembre de 2019 de <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/7819>.

[4] Pinilla, A. Ministerio de minas y Energía y el Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas: Manual de energía eólica: Edición UPME, 2003, p57. Recuperado el 04 de Septiembre de 2019 de <http://bva.colech.edu.mx/xmlui/bitstream/handle/123456789/HASH6be8e1631f042393fa4b1f/en002.pdf?sequence=3>.

[5] Ayhan, D. y Saglam, S. (2012). A technical review of building-mounted wind power systems and a sample simulation model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 16, N° 1, p.1040-1049*. [Material disponible en línea] Recuperado el 04 de Septiembre de 2019 de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032111004783>.

[6] Mateus, A. (2016) "Crisis energética en Colombia." *Revista UD, TIA Tecnología, investigación y academia*, Vol. 4, N° 2, p. 74. [Material disponible en línea] Recuperado el 16 de Septiembre de 2019 de <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/tia/article/view/10411>.

[7] Gómez, L. (2016). Valoración de opción real en proyectos de generación de energía eólica en Colombia. [Material disponible en línea] Recuperado el 04 de Septiembre de 2019 de <https://www.revistaespacios.com/a16v37n26/16372626.html>.

[8] Orduz, O. y Suarez, J. (2011). Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para generación a baja potencia. [Material disponible en línea] Recuperado el 04 de Septiembre de 2019 de <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2011/137798.pdf>.

[9] Benavides, G., Mejía, C. y Ciro, J. (2007). Estimación del potencial de energía eólica en una ubicación urbana del noroccidente de la ciudad de Medellín. [Material disponible en línea] Recuperado el 04 de Septiembre de 2019 de <https://es.scribd.com/document/263527321/Libro-Join-2011-120-132>.

[10] Polo, J., Rodríguez, J y Sarmiento, A. (2008). Potencial de generación de energía a lo largo de la costa colombiana mediante el uso de corrientes inducidas por mareas. *Revista de Ingeniería*, (28), p.99-105. [Material disponible en línea] Recuperado el 04 de Septiembre de 2019 de <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n28/n28a14.pdf>.

[11] Miranda, S. (2019). Selección y simulación mecánica de una turbina eolica para generacion de energia e iluminacion en la carretera barranquilla-ciénaga km-19. *Trabajo de grado*. [Material disponible en línea] Recuperado el 04 de Septiembre de 2019 de <https://www.coursehero.com/file/52494377/Tesis-1-06-19docx/>.

[12] Buendía, A. (2014). Caracterización y evaluación económica para la inversión en plantas menores a 20 MW conectadas al Sistema Interconectado Nacional (SIN) de Colombia a partir de fuentes de energías renovables eólica y solar. *Disertación Doctoral, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín*. [Material disponible en línea] Recuperado el 04 de Septiembre de 2019 de <http://bdigital.unal.edu.co/21166/1/32070066.2014.pdf>.

[13] In the loop (2016). Energía eólica en Colombia y sus beneficios. [Material disponible en línea] Recuperado el 17 de Septiembre de 2019 de <https://www.intheloop.com.co/eficiencia-energetica/energia-eolica-beneficios/>

[14] André, F., Castro, L. y Cerda, E. (2012). Las energías renovables en el ámbito internacional. [Material disponible en línea] Recuperado el 25 de Septiembre de 2019 de [https://www.researchgate.net/publication/277269010\\_Las\\_energias\\_renovables\\_en\\_el\\_ambito\\_internacional](https://www.researchgate.net/publication/277269010_Las_energias_renovables_en_el_ambito_internacional).

[15] Isaac, I., González, J., y Biechl, H. (2008). La energía eólica en Alemania: experiencias a tener en cuenta para el caso colombiano. [Material disponible en línea] Recuperado el 25 de Septiembre de 2019 de <https://revistas.upb.edu.co/index.php/investigacionesaplicadas/article/view/154>.

[16] Vásquez, M. (2007). Diseño de una turbina eólica de eje vertical con rotor mixto. *Trabajo de grado*. [Material disponible en línea] Recuperado el 25 de Septiembre de 2019 de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2007/bmfciv335d/sources/bmfciv335d.pdf>.

[17] Antezana, J. (2004). Diseño y construcción de un prototipo de generador eólico de eje vertical. *Universidad de Chile*. Recuperado el 25 de Septiembre de

2019 de <https://docplayer.es/16649999-Diseno-y-construccion-de-un-prototipo-de-generador-eolico-de-eje-vertical.html>.

[18] Molina, K., Ortega, D., Martínez, M., Pinto-Hernández, W., y González-Estrada, O. (2018). Modelado de la interacción fluido estructura (FSI) para el diseño de una turbina eólica HAWT. *Revista UIS Ingenierías*, Vol. 17, N° 2. [Material disponible en línea] Recuperado el 25 de Septiembre de 2019 de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/8256>.

[19] Lugo, D. y Bejarano, L. (2015). Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de 60W, para el suministro eléctrico de zonas urbanas. *Paper. Universidad Distrital Francisco José de Caldas*. [Material disponible en línea] Recuperado el 25 de Septiembre de 2019 de <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/3397/2/LugoGarciaDanielEnrique2016.pdf>.

[20] Velasquez, F. y Caballero, A. (2015). Modelado computacional del comportamiento fluidodinámico de una turbina eólica bioinspirada. *Trabajo de Grado. Universidad Autónoma del Caribe*.

[21] Roy, S., Ranjan, D. y Ujjwal, S. (2018). An inverse method for optimization of geometric parameters of a Savonius Style wind turbine. *Energy Conversion and Management Vol. 155, N° 1, p. 116-127*. [Material disponible en línea] Recuperado el 25 de Septiembre de 2019 de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417310208>.

[22] Avila, J. (2018). Análisis y optimización aerodinámica del prototipo de turbina eólica tipo savonius implementado en la facultad tecnológica. *Trabajo de grado*.

[23] Escáñez, D. (2013). Diseño y fabricación de los álabes de un micro-aerogenerador de baja potencia. *Trabajo de grado. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.*

[24] Khoharo, H., Kumar, L., y Jamal, M. (2018). Modeling and Comparative Performance Analysis of Different Bladed Vertical Axis Wind Turbine (VAWT). Paper. [Material disponible en línea] Recuperado el 26 de Octubre de 2019 de [https://www.researchgate.net/publication/330181591\\_Modeling\\_and\\_Comparative\\_Performance\\_Analysis\\_of\\_Different\\_Bladed\\_Vertical\\_Axis\\_Wind\\_Turbine\\_VAWT](https://www.researchgate.net/publication/330181591_Modeling_and_Comparative_Performance_Analysis_of_Different_Bladed_Vertical_Axis_Wind_Turbine_VAWT)

[25] Hosseini, A., y Goudarzi, N. (2019). Design and CFD study of a hybrid vertical-axis wind turbine by employing a combined Bach-type and H-Darrieus rotor systems. Paper. *Journal of Energy Conversion and Management.* [Material disponible en línea] Recuperado el 30 de Marzo de 2019 de <https://ir.linkedin.com/in/arian-hosseini-332257138>

[26] Islam, M., Fartaj, A., y Cariveau, R. (2008). Analysis of the Design Parameters Related to a Fixed-Pitch Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine. Paper. University of Windsor. Recuperado el 1 de Octubre de 2008, de <https://ezproxy.uac.edu.co:2082/action/doSearch?content=articlesChapters&countTerms=true&target=default&field1=AllField&text1=+vertical+axis+wind+turbine+design&field2=AllField&text2=&Ppub=&Ppub=&AfterYear=&BeforeYear=&earlycite=on&access=>

[27] Mejía, R., nodo Valledupar, T., Mejía, A. y Córdoba, Á. Diseño y validación de aerogenerador de eje vertical para generación de energía limpia design and validation of vertical axis wind turbine for clean energy generation. *Congreso Internacional De Energías* (p. 99).

[28] González, A., Geovo, L., y González, Y. (2016). Diseño y modelamiento de un aerogenerador Vawt Darrieus tipo H para la zona costera del departamento de

Córdoba. [Material disponible en línea] Recuperado el 26 de Octubre de 2019 de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5980560>

[29] González, A., Geovo, L., y González, Y. (2016). Diseño y modelamiento de un aerogenerador Vawt Darrieus tipo H para la zona costera del departamento de Córdoba. [Material disponible en línea] Recuperado el 26 de Octubre de 2019 de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5980560>

[30] Dobrev, I., Khelladi, S., & Massouh, F. (2012). Experimental study of yawed inflow around wind turbine rotor .Retrieved 29 May 2012,from <https://ezproxy.uac.edu.co:2082/doi/full/10.1177/0957650912445015>

[31] Kostro, G., Kutt, F., Michna, M., y Ronkowski, M. (2017, 27 de julio). Low speed permanent magnet synchronous generator for vertical axis wind turbine. *Paper. IEEE Conference Publication*. [Material disponible en línea] Recuperado el 03 de Octubre de 2019 de <https://ieeexplore.ieee.org/document/7993575>.

[32] Aravind, C., Rajprasad R., Rajparthiban, R., Grace, I., Teymourzadeh, R. y Norhisam, M. (2013, 07 de Febrero). Mathematical toolbox and its application in the development of laboratory scale vertical axis wind turbine. *Paper. IEEE Conference Publication*. [Material disponible en línea] Recuperado el 03 de Octubre de 2019 de <https://ieeexplore.ieee.org/document/6450362>.

[33] Jahangir, M. e Iqbal, M. (2009, 19 de Junio). Design and development of hybrid vertical axis turbine. *Paper. IEEE Conference Publication*. Material disponible en línea] Recuperado el 03 de Octubre de 2019 de <https://ieeexplore.ieee.org/document/5090311>.

[34] Pinilla, A. (1997, julio). Manual de aplicación de energía eólica. Material disponible en línea] Recuperado el 25 de septiembre de 2019 de

<http://www.ingenieroambiental.com/3008/energ%25c3%258da%2520e%25c3%2593lica.pdf>.

[35] Escudero, J. (2008). Manual de energía eólica. Segunda edición, p.68. S.A. Mundi-Prensa Libros. ISBN: 9788484763635.

[36]Energía Eólica: Uma Ferramenta Para Conviver Com O Semiárido. (2015). *Energía Eólica*. doi: 10.18068/issn 2015.ealsa 033

[37]Velocidad de flujo caudal volumétrico flujo de masa - nartejadou.gq. (s.f.). Recuperado 24 octubre, 2019, de <https://nartejadou.gq/velocidad-de-flujo-caudal-volum-trico-flujo-de-masa>

[38] Mírez, J. (2011, 16 de agosto). J277: Representación de potencia y energía extraíble de viento en turbinas eólicas. [Material disponible en línea] Recuperado el 24 de octubre de 2019 de <https://jmirez.wordpress.com/2011/07/02/j277-representacion-de-potencia-y-energia-extraible-de-viento-en-turbinas-eolicas/>.

[39] Balduzzi, F., Bianchini, A., Carnevale, E., Ferrari, L. y Magnani, S. (2012, septiembre). Feasibility analysis of a Darrieus vertical-axis wind turbine installation in the rooftop of a building. *Revista Applied Energy*, Vol. 97, p. 921-92. [Material disponible en línea] Recuperado el 24 de Octubre de 2019 de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261911008026>.

[40] Hansen, M. y Sterling, L. (2000). Aerodynamics of Wind Turbines. Segunda Edición. Earthscan. ISBN: 1844074382.

[41] Escudero, J. (2008). Manual de energía eólica. Segunda edición, p.69. S.A. Mundi-Prensa Libros. ISBN: 9788484763635.

[42] Celso, T. (2012) "Desempeño aerodinámico de turbinas eólicas de eje vertical en función de temperatura de superficie de álabe." Tesis Postgrado. Santiago, Chile: Universidad de Chile - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. [Material disponible en línea] Recuperado el 24 de octubre de 2019 de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/112558>.

[43] Rodríguez, J. (1985). Coeficiente de potencia en molinos savonius. Revista ingeniería e investigación Vol. 3, N°4, p.62-67. [Material disponible en línea] Recuperado el 24 de octubre de 2019 de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ingainv/article/view/19535>.

[44] Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH) (s.f.). Velocidad media de los vientos en la costa caribe. [Material disponible en línea] Recuperado el 24 de octubre de 2019 de <https://www.cioh.org.co/meteorologia/Climatologia/ResumenBarranquilla4.php>

[45] ANSYS Inc. (2019, 22 de marzo). Software para simulación de modelos. [Material disponible en línea] Recuperado el 24 de octubre de 2019 de <https://www.ansys.com/>

[46] ANSYS Inc. (2019, 25 de septiembre). Fluids. [Material disponible en línea] Recuperado el 24 de octubre de 2019 de <https://www.ansys.com/products/fluids>

[47] Lopez L. y Muñoz J.L. (2004) Estudio de la Turbulencia a través del Modelo k-e, Mediante un Código Tridimensional con Esquemas de Alto Orden. *Información Tecnológica-Vol. 15 N° 2-2004, págs.: 25-28*. [Material disponible en línea] Recuperado el 13 de mayo de 2020 [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-07642004000200005](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642004000200005)

[48] ANSYS, Inc (2020) Manual de ecuaciones del algoritmo. [Material disponible en línea] Recuperado el 13 de mayo de 2020 <file:///C:/Users/ramses/Downloads/Rigid%20body1.pdf>

[49] Creus, A. (2012). Aerogeneradores. Cano Pina. Ebook, p.73. ProQuest Ebook Central. [Material disponible en línea] Recuperado el 24 de octubre de 2019 de <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecauacsp/detail.action?docID=3226586>.

[50] Creus, A. (2012). Aerogeneradores. Cano Pina. Ebook, p.79. ProQuest Ebook Central. [Material disponible en línea] Recuperado el 24 de octubre de 2019 de <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecauacsp/detail.action?docID=3226586>.

[51] Vilchez, G. y Ramón E. (2010). Desarrollo de un pequeño aerogenerador para las condiciones de la península de Paraguaná. *Ebook. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría*. [Material disponible en línea] Recuperado el 24 de Octubre de 2019 de <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecauacsp/detail.action?docID=3202448>.

[52] Jaén, González, Antoni, et al. *Tecnología energética y medio ambiente II*, Universitat Politècnica de Catalunya, 2006. ProQuest Ebook Central, <https://ezproxy.uac.edu.co:2117/lib/bibliotecauacsp/detail.action?docID=3229296>.

[53] Qingkai, H. Q. Han, Wei, J. W. Jing, & Han, Q. H. Qingpeng. (s.f.). Torsional Dynamics of Gear-Rotor System in Wind Turbine Gearbox Chapter 2. Recuperado 24 octubre, 2019, de <https://ezproxy.uac.edu.co/login?qurl=https://link.springer.com%2fbook%2f10.1007%2f978-981-10-2747-5>

[54] Cucó, Pardillos, Salvador. *Manual de energía eólica: desarrollo de proyectos e instalaciones*, Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, 2017. ProQuest Ebook Central, <https://ezproxy.uac.edu.co:2117/lib/bibliotecauacsp/detail.action?docID=4849764>.

[55] Orduz, O. y Suárez, J. (2011, 28 de febrero). Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para generación de baja potencia. *Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander, Facultad de ingenierías físico – mecánicas*. [Material disponible en línea] Recuperado el 25 de septiembre de 2019 de <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2011/137798.pdf>.

[56] Roth G. (2003). *Meteorología: Formaciones nubosas y otros fenómenos meteorológicos, situaciones meteorológicas generales, pronósticos del tiempo*. Ediciones Omega. ISBN 84-282-1319-4.

[57] Atlas del País Vasco (1993).

[58] Orduz berdugo, Oscar iván y Suárez perez, Julián Edgardo: Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para generación a baja potencia, Bucaramanga, 2011, 172 h, trabajo de grado (Ingeniero Mecánico), Universidad Industrial de Santander, Facultad de ingenierías físico – mecánicas,

[59] Moragues J. y Rapallini A. (2003). *Energía Eólica*. Instituto Argentino de Energía “General. Mosconi”

[60] Correa, J. (1996). *Guía para Diseño de Generadores Eólicos Verticales Tipo Savonius*. Trabajo de grado. Escuela politécnica Superior del Litoral, facultad de ingeniería en mecánica. [Material disponible en línea] Recuperado el 14 de octubre de 2019 de [http://www.cib.espol.edu.ec/Digipath/D\\_Tesis\\_PDF/D-28499.pdf](http://www.cib.espol.edu.ec/Digipath/D_Tesis_PDF/D-28499.pdf).

[61] Arbeláez, N. y Ochoa, D. (2013). *Diseño de detalle de un generador eólico tipo Savonius*. Trabajo de grado. Escuela de ingeniería de Antioquia. [Material disponible en línea] Recuperado el 14 de octubre de 2019 de [https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/332/7/ArbelaezNatalia\\_2013\\_Dise%C3%B1oDetalleGenerador.pdf](https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/332/7/ArbelaezNatalia_2013_Dise%C3%B1oDetalleGenerador.pdf).

[62] E. catedu, «e-educativa.catedu,» [En línea]. Available: [http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/1000/1088/html/21\\_componentes\\_de\\_un\\_aerogenerador.html](http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/1000/1088/html/21_componentes_de_un_aerogenerador.html).

[63] Santibañez, V. (2015, 1 de junio). Efecto de la inclinación de los álabes en una turbina de eje vertical tipo Darrieus. Trabajo de grado. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Mecánica. [Material disponible en línea] Recuperado el 14 de octubre de 2019 de <https://docs.google.com/document/d/1QoTT6KRT1p0jYEE0IIDEU7763n6ereAIGMPjx-sQtw/edit>.

[64] Sathyajith, M. (2006). Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics. Springer. ISBN: 978-3-540-30906-2.

[65] H. Beri y Y. Yao. (2011). Numerical Simulation of Unsteady Flow to Show Self-starting of Vertical Axis Wind Turbine Using Fluent. Journal of Applied Sciences Vol. 11, N° 6, p.962-970. [Material disponible en línea] Recuperado el 25 de octubre de 2019 de <https://scialert.net/abstract/?doi=jas.2011.962.970>.

[66] Rocha, D., López, D. y Gómez, E. (2010, 16 de agosto). Los sistemas bioinspirados y su enfoque en la solución de necesidades en la ingeniería. Artículo de revisión. Revista UD, Redes de ingeniería. Vol. 1, N°2, p. 22-29. [Material disponible en línea] Recuperado el 25 de octubre de 2019 de <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/REDES/article/view/7157/8814>

[67] Ashwill, T., Sutherland, H. y Berg, D. (2012) A Retrospective of VAWT Technology. Informe técnico. Sandia National Laboratories. [Material disponible en línea] Recuperado el 25 de octubre de 2019 de <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Retrospective-of-VAWT-Technology-Ashwill-Sutherland/7da8f04816d9542887f367c19c47b537f8f60d6f>.

[68] Escudero, J. (2008). Manual de energía eólica. Segunda edición, p.48. S.A. Mundi-Prensa Libros. ISBN: 9788484763635.

[69] Escudero, J. (2008). Manual de energía eólica. Segunda edición, p.50. S.A. Mundi-Prensa Libros. ISBN: 9788484763635.

[70] Escudero, J. (2008). Manual de energía eólica. Segunda edición, p.102. S.A. Mundi-Prensa Libros. ISBN: 9788484763635.

[71] Wilson, J. y Buffa A. (2003). Física. Quinta edición, p.33. Pearson Educación. México. ISBN: 978-970-26-0851-6.

[72] Wilson, J. y Buffa A. (2003). Física. Quinta edición, p.4. Pearson Educación. México. ISBN: 0-13-067644-6.

[73] Wilson, J. y Buffa A. (2003). Física. Quinta edición, p.4. Pearson Educación. México. ISBN: 0-13-067644-6.

[74] Wilson, J. y Buffa A. (2003). Física. Quinta edición, p.35. Pearson Educación. México. ISBN: 0-13-067644-6.

[75] Wilson, J. y Buffa A. (2003). Física. Quinta edición, p.40. Pearson Educación. México. ISBN: 0-13-067644-6.

[76] Ministerio de minas y energías de Colombia, recuperado el 23 de octubre de 2019 de: <https://www.minenergia.gov.co/decretos-modificatorios>

[77] Colciencias, Guía para la elaboración de acuerdos de confidencialidad y de delimitación de la propiedad intelectual entre instituciones de educación superior, centros de desarrollo tecnológico, centros de investigación y contribuyentes de

renta en el marco de las deducciones tributarias para i+d+i, Artículo 22 página 19, recuperado 24 de octubre de 2019

[78]Colciencias, Guía para la elaboración de acuerdos de confidencialidad y de delimitación de la propiedad intelectual entre instituciones de educación superior, centros de desarrollo tecnológico, centros de investigación y contribuyentes de renta en el marco de las deducciones tributarias para i+d+i. Artículo 23 página 20. [Material en línea] Recuperado 24 de octubre de 2019

[79] Colciencias, Guía para la elaboración de acuerdos de confidencialidad y de delimitación de la propiedad intelectual entre instituciones de educación superior, centros de desarrollo tecnológico, centros de investigación y contribuyentes de renta en el marco de las deducciones tributarias para i+d+i. Artículo 24 página 20. [Material en línea] Recuperado 24 de octubre de 2019

[80] Educacion@zambeca.cl (2020) información y especificaciones de uso de un Micromotor reductor metálico 100:1 LP 6V. Página web [Material disponible en línea] Material recuperado el 10 de mayo del 2020 de [https://www.zambeca.cl/tiendaOficial/index.php?route=product/product&product\\_id=583](https://www.zambeca.cl/tiendaOficial/index.php?route=product/product&product_id=583)

[81] Al-Faruk, A., & Sharifian, A. (2017). Flow field and performance study of vertical axis Savonius type SST wind turbine. Energy Procedia, 110, 235-242. [Material disponible en línea] Material recuperado el 10 de mayo del 2020 de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217301637>

[82] Sanusi, A., Soeparman, S., Wahyudi, S., & Yuliati, L. (2016). Experimental study of combined blade savonius wind turbine. International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), 6(2), 614-619 [Material disponible en línea] Material recuperado el 10 de Octubre del 2019 de [https://www.researchgate.net/profile/Arifin\\_Sanus/publication/305416408\\_Experim](https://www.researchgate.net/profile/Arifin_Sanus/publication/305416408_Experim)

[ental study of combined blade savonius wind turbine/links/59c513d50f7e9bd2c005459c/Experimental-study-of-combined-blade-savonius-wind-turbine.pdf](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148110001746)

[83] Mohamed, M. H., Janiga, G., Pap, E., & Thévenin, D. (2010). Optimization of Savonius turbines using an obstacle shielding the returning blade. *Renewable Energy*, 35(11), 2618-2626. [Material disponible en línea] Material recuperado el 11 de Octubre del 2019 de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148110001746>

[84] Kamoji, M. A., Kedare, S. B., & Prabhu, S. V. (2009). Experimental investigations on single stage modified Savonius rotor. *Applied Energy*, 86(7-8), 1064-1073. [Material disponible en línea] Material recuperado el 11 de Octubre del 2019 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261908002432>

[85] Wenehenubun, F., Saputra, A., & Sutanto, H. (2015). An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades. *Energy procedia*, 68, 297-304. [Material disponible en línea] Material recuperado el 12 de Octubre del 2019 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215005652>

## ANEXOS

Se presenta aquí los 4 trabajos utilizados para emplear debidamente los criterios de selección en la Tabla 11, ítem 6.4 del trabajo, recolección de datos. Los 4 trabajos se encontraran en las referencias 82 a la 85 de las bibliografías:

### Trabajos para referenciar:

1. Titulo: Experimental Study of Combined Blade Savonius Wind Turbine  
Autores: A. Sanusi, S. Soeparman  
Cp: Este trabajo plantea un aumento en el coeficiente de potencia 0.175 en el diseño no modificado y el modificado maneja 0.143 de Cp,  $Cp1 = 0.143$   
Material: placa de aluminio.

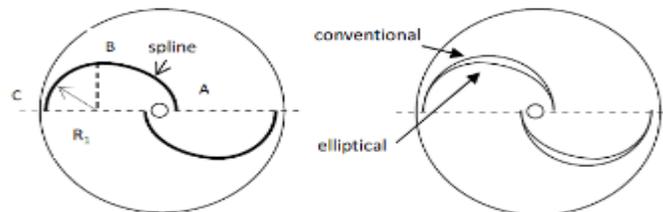


Figura 43. Trabajo Investigativo para selección de los diseños #1 Anexos [82]

2. Titulo: Optimization of Savonius turbines using an obstacle shielding the returning blade  
Autores: M.H. Mohamed, G. Janiga, E. Pap, D. Thévenin  
Cp: Este trabajo logra demostrar un coeficiente de potencia del 0.258, teniendo en cuenta que el base de una turbina savonius normal es de 0.18,  $Cp2 = 0.18$   
Material: No posee en la investigación.

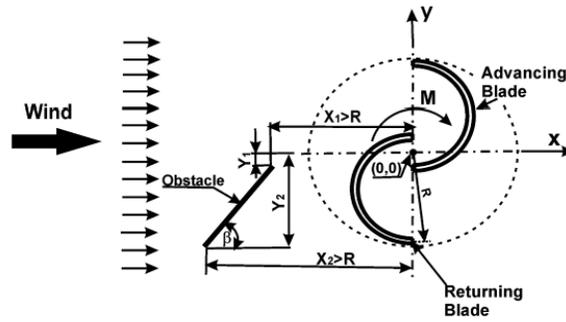


Figura 44. Trabajo Investigativo para selección de los diseños #2 Anexos [83]

3. Titulo: Experimental investigations on single stage modified Savonius rotor

Autores: M.A. Kamoji a , S.B. Kedare a , S.V. Prabhu b

Cp: El siguiente trabajo plantea un coeficiente de potencia de 0.21 teniendo en cuenta que este solo maneja pequeñas variaciones en el diseño de savonius,  $Cp3= 0.21$

Material: no tiene pero requiere menos que un estándar.

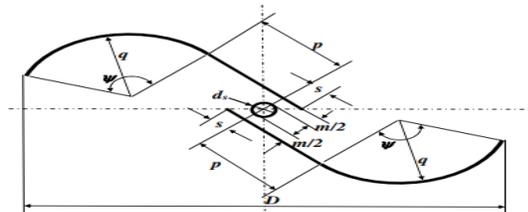


Figura 45. Trabajo Investigativo para selección de los diseños #3 Anexos [84]

4. Titulo: An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades Frederikus Wenehenubuna.

Autores: Andy Saputraa , Hadi Sutanto.

Cp: En este se registró un promedio de coeficiente de potencia y se realizó un rango entre 0,15 y 0,35,  $Cp4=0.25$

Material: no posee material en la investigación estudiada.

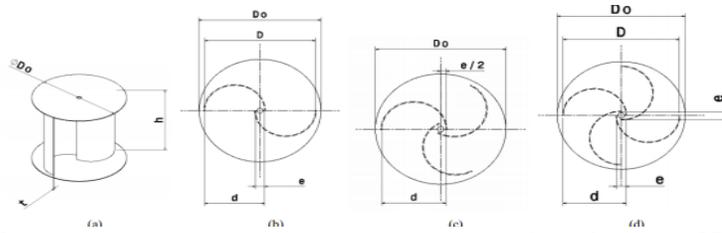


Figura 46. Trabajo Investigativo para selección de los diseños #4 Anexos [85]

A continuación se pueden encontrar los resultados del trabajo de grado de la Universidad Autónoma del Caribe, del cual obtuvimos, modelamos y estudiamos el diseño #3 en la investigación:

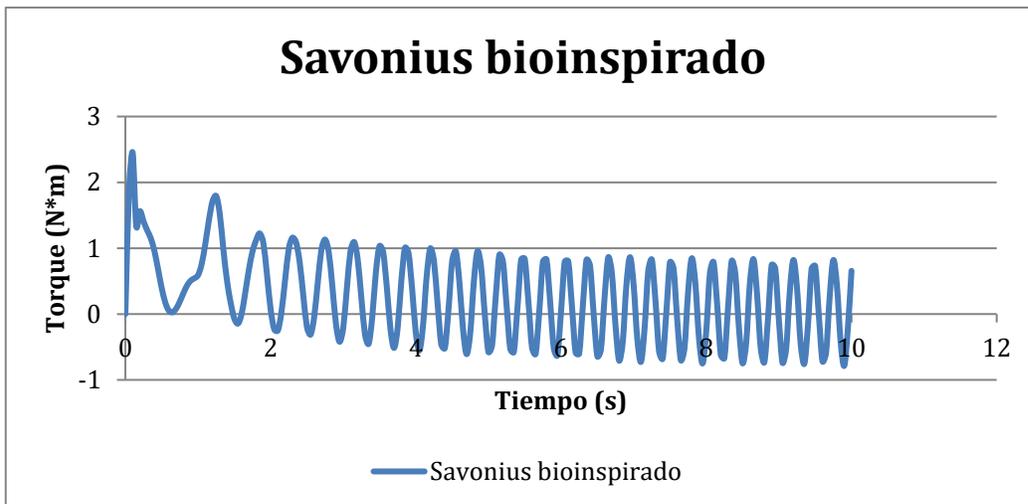


Figura 47. Torque vs Tiempo Bioinspirado [20]

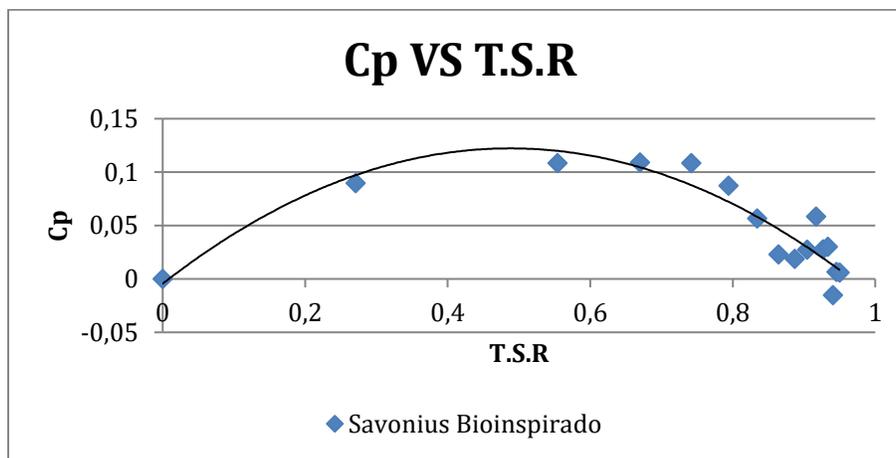


Figura 48. Cp vs TSR Bioinspirado [20]

El siguiente texto es extraído directamente de los análisis de resultados del Trabajo de Grado anterior:

“El valor máximo de  $C_p$  fue de 0,11 en un T.S.R. de 0,74. Frente a la turbina de dos aspas presenta mejor estabilidad en cuanto al  $C_p$  y esto tiene que ver directamente con los torque negativos que se generan mediante la simulación.” [20].

Los siguientes datos responden a los análisis realizados por Al-Faruk, A., y Sharifian, A. en el trabajo “Flow field and performance study of vertical axis Savonius type SST wind turbine” el cual utilizamos como base para el diseño #6 de turbina tornado a construir.

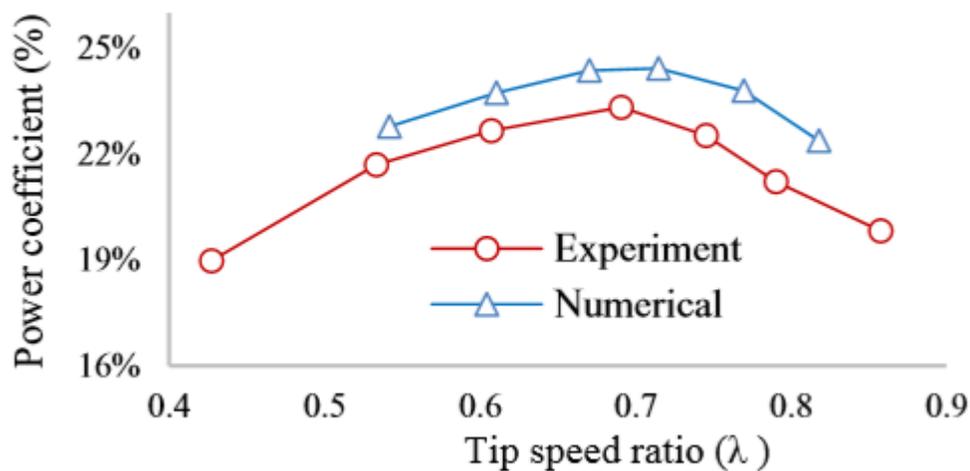


Figura 49.  $C_p$  vs TSR Tornado [82]

El siguiente texto es extraído y traducido del trabajo investigativo que da como resultado la Figura 49:

“La tendencia de las curvas  $C_p$  es casi idéntica como se muestra en la figura 49. El coeficiente de potencia máximo encontrado en el modelo de turbulencia SST es de alrededor del 24,5% con una relación de velocidad de punta de 0,71, mientras que fue del 23,3% en el experimento. Se puede concluir que se ha encontrado un buen acuerdo con sólo un error del 4,7%.” [82]



*Figura 50. Base de dispositivo*



*Figura 51. Soporte inferior de eje del dispositivo*



*Figura 52. Soporte superior L del eje del dispositivo*