



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA TURBINA DARRIEUS-SAVONIUS
COMO ALTERNATIVA A LA ILUMINACIÓN DE LA PLANTA
FÍSICA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**

Autor: Ramírez S. David H.
C.I.: 26.069.749

Urb. Yuma II, calle N° 3. Municipio San Diego.
Teléfono: (0241) 8714240 (master) – Fax: (0241) 8712394



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
CARRERA: INGENIERÍA MECÁNICA**

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA TURBINA DARRIEUS-SAVONIUS
COMO ALTERNATIVA A LA ILUMINACIÓN DE LA PLANTA
FÍSICA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**

Trabajo de Grado presentado para Optar al Título de

INGENIERO MECÁNICO

Autor: Ramírez S. David

Tutora: Prof. Ing. Alicia Y. de Pizella

San Diego, Marzo de 2021



FI-N-007-2020-3CR (TG)

Valencia, 24 de marzo de 2021

Ciudadano:
Ramírez Sandoval, David Humberto.
CI. 26.069.749
Presente-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° **04-2021** de fecha **21-01-2021** aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado ***DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA TURBINA DARRIEUS-SAVONIUS COMO ALTERNATIVA A LA ILUMINACIÓN DE LA PLANTA FÍSICA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ*** presentado por usted (es) como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación de la Ing. Alicia Yánez de Pizzella C.I: 4.598.880 como Tutora Académica que lo asesorara en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,

Dr. Francisco Gelanzé Sevilla.
Decano

c.c. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (1).

GF/aa



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

APROBACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Alicia de Pizzella, portadora de la cédula de identidad N.º 4.598.880, en mi carácter de tutora del trabajo de grado presentado por la ciudadano Ramírez S. David H., portador de la cédula de identidad N.º 26.069.749, titulado: **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA TURBINA DARRIEUS-SAVONIUS COMO ALTERNATIVA A LA ILUMINACIÓN DE LA PLANTA FÍSICA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**, presentado como requisito parcial para optar al título de **INGENIERO MECÁNICO**, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los 25 días del mes de Marzo de dos mil veintiuno.

Ing. Alicia de Pizzella
C.I 4.598.880

AGRADECIMIENTOS

Primeramente gracias a Dios por creer en mí, por darme la fuerza y oportunidad de poder llegar hasta este momento de mi vida, mis victorias llevan tu estandarte.

A mi madre, quien ha sido pilar del fundamento y disciplina que me han traído hasta este momento, que la vida me permita agradecerte por tanto.

A mi familia, por el apoyo, el esfuerzo y fe que han puesto en mí durante este recorrido. Es un orgullo contar con personas que siempre están apostando para que las cosas salgan bien y desarrolle mis talentos.

A mis profesores, en especial a la Prof. Alicia de Pizzella. Todos son ejemplo de lucha, compromiso y dedicación. La admiración que siento por ustedes, que se siguen desempeñando con el mismo corazón en las circunstancias que atravesamos es digna de admirar, son la verdadera luz en las tinieblas.

Al personal en general que sirve en nuestra planta física, pues todos ellos han sido parte del proceso y agradezco siempre su buen servicio.

ÍNDICE

CONTENIDO

Pp.

ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE GRAFICO.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
RESUMEN.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO

I EL PROBLEMA.....	
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Formulacion de problema.....	4
1.3 Objetivos de la investigación.....	5
1.3.1 Objetivo General	5
1.3.2 Objetivos Específicos	5
1.4 Justificación del problema	5
1.5 Alcance de la investigación	6
1.6 Limitaciones	6
II MARCO TEÓRICO.....	
2.1 Antecedentes de la investigación	8
2.2 Bases teóricas	12
2.2.1 Las Turbinas de Viento	12
2.2.2 Velocidad del Viento.....	13
2.2.3 El Triángulo de Velocidades	13
2.2.4 Clasificación de la Instalación de Acuerdo a las Normas COVENIN	14
2.2.5 Energía Disponible en el Viento	15
2.2.6 El Límite de Betz.....	16
2.2.7 Efecto de Arrastre.....	17
2.2.8 Rotor Bajo Arrastre	18
2.2.9 Turbinas Bajo Efectos de Sustentación	20
2.2.10 Turbina Savonius.....	22
2.2.11 Turbina Darrieus	23
2.2.12 Generador Híbrido Darrieus-Savonius	24

2.2.13 Velocidades en un Rotor	26
2.2.14 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).....	27
2.2.16 Wheater Spark	28
2.2.15 Solid Works 2020.....	27
2.3 Definición de términos	28
III MARCO METODOLÓGICO.....	
3.1 Tipo de investigación.....	30
3.2 Diseño de investigación.....	30
3.3 Nivel de investigación	31
3.4 Población	31
3.5 Muestra	32
3.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	32
3.7 Fases de la investigación	33
IV RESULTADOS.....	
4.1 Estudiar los Parámetros que Intervienen en el desenvolvimiento de la Turbina para la Localidad Seleccionada.....	34
4.1.1 Velocidad del Viento en San Diego Edo. Carabobo	34
4.1.2 La Velocidad del Viento Según la Altitud	36
4.1.3 Las Características Inmobiliarias	38
4.1.4 La Velocidad Representativa en la Locación de la Turbina.....	40
4.1.5 Potencia efectiva del viento en la localidad	41
4.1.6 Consumo eléctrico del sistema de iluminación de la planta física ingeniería mecánica	42
4.2 Modelamiento de una turbina Darrieus-Savonius usando herramientas digitales de última generación para mejor precisión del diseño.....	44
4.2.1 Parámetros iniciales del diseño	45
4.2.2 Rotor bajo arrastre	46
4.2.3 Selección del rotor Savonius	50
4.2.4 Rotor bajo sustentación	60
4.2.5 Determinación de la forma del rotor Darrieus.....	64
4.2.6 Propuesta de rotor Darrieus-Savonius Simple	69
4.2.7 Cálculos para parametrización del conjunto	71
4.2.7.1 Datos y fórmulas aplicadas	71
4.2.7.2 Rotor Savonius	71
4.2.7.3 Rotor Darrieus	72
4.3 Valorización de la capacidad de la turbina Darrieus-Savonius para sustentar la iluminación de los salones y áreas comunes en la planta física de Ingeniería Mecánica	72

4.3.1 Resultados en Flow Simulation de SolidWorks	73
4.3.2 Resultados sobre el rotor combinado	74
4.3.3 Incidencia del número de perfiles en el rotor Darrieus	75
4.3.4 Propuesta de turbina Darrieus-Savonius en Tándem	78
4.3.5 Selección del tamaño del modelo según simulación	81
CONCLUSIONES	84
RECOMENDACIONES	87
REFERENCIAS	88
ANEXOS	92
A Gunhamburg turbinas eólicas.....	93
B CP vs TSR para distinto número de palas.....	94
C Vista típica de materiales usados en alabes eólicos.....	95
D TURBINA EÓLICA HIBRIDA EOLO-3000.....	96
E CATALOGO PANELES CIRCULARES HAMMER.....	97

LISTADO DE FIGURAS

FIGURA	Pp.
1. Triangulo de velocidades.....	13
2. Ejemplos de CD.....	18
3. Ejemplo básico de rotor llano.....	18
4. Coeficientes de arrastre para semiesferas.....	19
5. Ejemplo simple de rotor Savonius.....	19
6. Ejemplo de las fuerza de sustentación en un flap.....	21
7. Cl de algunas configuraciones de Flaps.....	22
8. Rotor Savonius.....	23
9. Distintas configuraciones del rotor Darrieus.....	23
10. Ejemplos de turbinas Darrieus-Savonius.....	25
11. Coeficiente de potencia en rotores bajo zonas de arrastre y sustentación.....	26
12. Simulación aerodinámica en un coche F1.....	28
13. El promedio de la velocidad media del viento por hora (línea gris oscuro), con las bandas de percentil 25° a 75° y 10° a 90°.....	35
14. Velocidad del viento y dirección sobre la Universidad José Antonio Páez.....	35
15. Velocidad del viento para la localidad de San Diego entre enero-abril..	36
16. Gradiente de velocidad del viento según condiciones dadas.....	37
17. Direcciones del viento durante el año para San Diego Edo. Carabobo...	38
18. Imagen área de la planta física UJAP.....	40
19. Coeficientes de arrastre CD de varios cuerpos bidimensionales.....	45
20. Rotor Savonius de doble s.....	51
21. TSR vs Rendimiento aerodinámico.....	52
22. Dimensiones experimentales del rotor Savonius.....	53
23. Vista isométrica del rotor Savonius.....	53
24. Bosquejo de la modificación.....	57
25. Cotas básicas en un perfil NACA.....	61
26. Perfiles para aplicaciones en aerogeneradores.....	62
27. Sistema coordenado usado para describir la curva adaptada.....	65
28. Tabulación de parámetros normalizados para el ajuste de Troposkien...	65
29. Conjunto Darrieus-Savonius diseñado.....	70
30. Ejemplo de turbina eje horizontal en tándem.....	78
31. Distancia L representativa.....	79

LISTADO DE GRÁFICOS

GRÁFICO	Pp.
1. Simulación vectorial del viento impactando a 3 m/s en el eje x.....	54
2. Zonas de mayor presión sobre los alabes a 3m/s.....	55
3. Campo vectorial de la velocidad desde el eje superior.....	55
4. Campo vectorial con líneas desde el eje Y.....	56
5. Simulación del perfil mejorado.....	58
6. Isométrica del rotor con perfil suavizado con las condiciones de perímetro.....	59
7. Simulación vectorial del campo velocidad a 3 m/s sobre rotor mejorad....	59
8. Cl/Cd vs Angulo de ataque para el perfil seleccionado.....	63
9. Perfil E387 con 100 mm de cuerda y 8,5 grados de ataque.....	66
10. Modelo geométrico de alabe E387.....	66
11. Presiones sobre la cara externa del alabe.....	68
12. Presiones sobre la cara interna del alabe.....	68
13. Parametrización de límites del modelo por túnel de aire en SolidWorks...	73
14. Simulación en túnel de aire del modelo Darrieus-Savonius a 3 m/s.....	74
15. Simulación del rotor a 17,99 rad/s y 3 m/s.....	75
16. Ct vs Azimuth realizando en airfoiltools.....	76
17. Rotor combinado con 3 perfiles en el rotor Darrieus.....	77
18. Análisis del torque en el rotor con eje X como eje de velocidad.....	77
19. Simulación con puntos internos y externos de alabe.....	80
20. Iteraciones de las variables con modelo en Tandem.....	81
21. Modelo seleccionado en tándem.....	82
22. Simulación de modelo en tándem con eje X como eje de velocidad, estudio de torque sobre cuerpo central en Y.....	83

LISTADO DE TABLAS

TABLAS	Pp.
1. Potencia disponible para un día promedio de cada mes en San Diego.....	42
2. Consumo unitario nominal de artefactos eléctricos y electrónicos.....	43
3. CPd para valores del 1 al 0.....	48
4. CPd para valores del 0,4 al 0,3.....	48
5. Resultados de la simulación 1 a 3 m/s.....	56
6. Resultados de la simulación del rotor mejorado a 3 m/s.....	60
7. Número de Reynolds en función de la velocidad.....	62
8. Resultados de las presiones sobre el perfil E-387.....	68
9. Resultados de simulación a distinta escala.....	81
10. Dimensiones y características seleccionadas.....	83

NOMENCLATURA

Símbolo



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA TURBINA DARRIEUS-SAVONIUS
COMO ALTERNATIVA A LA ILUMINACIÓN DE LA PLANTA
FÍSICA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**

Autores: David Humberto Ramírez Sandoval

Tutor: Ing. Mecánico. Alicia Yáñez

Año: Abril 2021

RESUMEN

La presente investigación tuvo como propósito diseñar y simular una turbina Darrieus-Savonius como alternativa de generación eléctrica para la planta física de Ingeniería Mecánica de la Universidad José Antonio Páez, ubicada en el Municipio San Diego, del estado Carabobo. En este sentido, el problema de la deficiente distribución de electricidad en el país y el deterioro paulatino del sistema eléctrico nacional, sirvió como escenario para ofrecer alternativas de solución, de modo que, se buscó dar una respuesta viable a la demanda de energía eléctrica a nivel local, pero con la posibilidad de que sea implementada en otros sectores, así, la energía eólica, que es un recurso renovable, sirva para generar electricidad y satisfacer la demanda de algunas comunidades, esta turbina genera alrededor de 1500 y 2500 watts, suficientes para cubrir la iluminación de salones de clase y pasillos de la institución objeto de estudio. La investigación fue de campo bajo la modalidad proyecto factible, con un diseño documental, de campo y experimental y un nivel de investigación descriptivo. La metodología aplicada para el diseño de la turbina permitió alcanzar los resultados, la turbina fue dimensionada de acuerdo a los requerimientos de la planta física, obteniéndose un modelo eficaz que satisface la exigencia. Se concluye entonces, que el diseño y simulación de la turbina eólica vertical siguiendo los principios eólicos de Albert Betz, permitió prever el comportamiento del flujo en los dos modelos de rotores estudiados, considerando así modificaciones necesarias que mejoraran su funcionamiento. SolidWorks 2020 demuestra ser una herramienta que brinda un análisis de fácil interacción, prestó al proyecto la calidad en el diseño de cada elemento, su ensamblaje y su posterior simulación con éxito.

Descriptor: Energía Eólica, Turbina Darrieus-Savonius, Generación de Electricidad.

INTRODUCCIÓN

En Venezuela, la crisis económica ha tocado diversas áreas de interés para la población, los servicios públicos han sufrido los embates de esta crisis siendo el sistema eléctrico nacional uno de los más afectados. En tal sentido, todos los estados que conforman la República Bolivariana de Venezuela están atravesando por la distribución de un servicio eléctrico deficiente, donde los constantes cortes de electricidad han venido afectando todas las actividades normales como el comercio, la educación, la salud, la vida cotidiana, entre otros, por lo cual es necesario realizar propuestas que conlleven a paliar o mejorar esta situación.

El estado Carabobo no ha sido la excepción, esta entidad también viene sintiendo las consecuencias de la falta de energía eléctrica y el deterioro del sistema eléctrico nacional, debido a diversas razones tanto económicas como políticas, lo que se ha venido sintiendo gravemente en los últimos años. De igual modo, el Municipio San Diego de este estado del país, de igual modo enfrenta esta situación, la cual ha incidido en la calidad de vida de sus habitantes.

La Universidad José Antonio Páez, que funciona dentro de los límites de este municipio, se había visto en la necesidad de minimizar sus actividades académicas, las cuales se acentuaron con la aparición de la pandemia mundial del Covid-19, destacándose un deterioro en el suministro de energía eléctrica para esta casa de estudios, el cual es dependiente del servicio eléctrico estatal. Añadiendo también la falta de implementación de nuevas tecnologías renovables y vanguardistas que se disponen en otros países pero que en Venezuela no han surgido.

En este sentido, una solución a corto plazo utilizando la energía eólica es viable, tomando en cuenta que el viento es un recurso disponible para tal efecto, lo cual hace posible cubrir estas necesidades básicas de iluminación en algunos sectores de la sede de la universidad, ateniendo a las características ambientales y

geográficas de la zona donde se ubica el Municipio San Diego.

Por ello, este proyecto de investigación buscó ofrecer tal solución, considerando que es una investigación novedosa en la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad José Antonio Páez, se ofreció una opción innovadora pero factible y autosustentable, la cual también servirá como medio de enseñanza sobre la necesidad de tomar decisiones por la misma comunidad universitaria, ofreciendo alternativas para enfrentar la grave crisis del sistema eléctrico nacional en otras localidades del territorio nacional.

De manera que, para llevar a cabo la propuesta descrita anteriormente se utilizó una turbina Darrieus-Savonius que genere electricidad y solvante el problema de iluminación en salones de clase, pasillos y biblioteca de la planta física de la Carrera de Ingeniería Mecánica, por ello, la presente investigación tuvo como objetivo principal diseñar y simular una turbina Darrieus-Savonius como alternativa de generación eléctrica para la planta física de Ingeniería Mecánica. Para llevarla a cabo el estudio se estructuró en los siguientes cuatro (4) capítulos:

Capítulo I, el cual corresponde a todo lo relacionado con el Problema, planteamiento del mismo, su formulación, los objetivos del estudio, tanto el general como los específicos y su justificación, el alcance del estudio y las limitaciones.

El Capítulo II, se refiere al Marco Teórico, iniciando con los antecedentes de la investigación, donde se señalan los estudios realizados anteriormente sobre el tema en estudio, donde se expone lo referente a las bases teóricas, conceptos y definiciones de expertos que le dan justificación al problema planteado y la definición de términos.

En el Capítulo III, denominado Marco Metodológico; se puntualizan los métodos y técnicas a utilizar para llevar a cabo la investigación, se expone el tipo, diseño y nivel de la misma, la población, muestra utilizada y las técnicas e instrumentos de recolección de datos y las fases o procedimientos llevados a cabo.

El Capítulo IV, corresponde a los resultados, conclusiones y recomendaciones obtenidas del desarrollo de cada fase del proyecto.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del Problema

El hombre en su necesidad de proveerse de fuentes de energía, ha incursionado en el desarrollo tecnológico de alternativas de generación de energía eléctrica, algunas de ellas fundamentadas en los potenciales eólicos, a este criterio se le añade el total desaprovechamiento de las fuentes de energía renovables a escala nacional y la actual situación del servicio eléctrico venezolano. Esto obliga a evaluar las soluciones alternativas para satisfacer la demanda eléctrica del país.

Así pues, en relación al uso de las fuentes renovables de energía, se debe entender que los sistemas de generación alternativos ofrecen una gama de soluciones desde pequeñas a grandes magnitudes de la demanda de potencial eléctrico. Así, se puede mencionar que los países pioneros en el desarrollo de tecnologías aplicadas a las energías renovables, han demostrado que los proyectos en esta materia son esenciales para la vanguardia tecnológica y ambiental que representa el futuro de la industria eléctrica.

Igualmente, para tener una referencia de lo importante de este desarrollo, en la Revista Iberdrola (2019), se recoge que Dinamarca logró cubrir, durante el día del 22 de marzo del 2017, un 95% de su consumo energético gracias a los vientos favorables sobre los parques eólicos, lo que deja registro de un caso sobre la capacidad y ventajas de estas tecnologías en el desarrollo a nivel local y nacional.

Se puede afirmar que, a pesar de las posibilidades que las condiciones climáticas de Venezuela ofrecen a estas energías y la ventaja económica y estratégica que supone en reducción de combustibles, los entes gubernamentales no han mostrado mucho interés en su desarrollo, aun cuando la única energía limpia que

puede alcanzar un lugar preponderante en la sustitución de la generación energía eléctrica es la eólica.

Se puede señalar que la crisis de energía eléctrica en Venezuela ha ido agravándose de forma paulatina, llegando a casi paralizar sus actividades sociales, comerciales y económicas, lo que ha incidido gravemente en la calidad de vida de los venezolanos. Un ejemplo preciso es el apagón nacional de marzo del 2019 que paralizó a todo el país por casi una semana. Esto también se refleja en la sede de la Universidad José Antonio Páez ubicada en el Municipio San Diego, estado Carabobo, donde la crisis eléctrica ha llevado a minimizar en ocasiones las actividades académicas antes de la aparición de la pandemia por COVID-19. En las instalaciones de esta casa de estudios la iluminación es dependiente, tanto en pasillos como en los salones de clases, laboratorios y biblioteca, del servicio eléctrico del Estado.

Buscando ofrecer una solución a esta necesidad básica de iluminación y recepción de fluido eléctrico, partiendo de un recurso disponible, es decir, la energía cinética del viento con capacidad de cubrir esta demanda y que es totalmente renovable, ello puede ser viable, a pesar que es limitada por las características ambientales y geográficas donde se ubica la universidad, sin embargo, es un recurso totalmente aprovechable en la mayoría de las situaciones.

Por último, es importante recalcar que, por estar la planta física de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad José Antonio Páez sujeta a la distribución de electricidad suministrada por el sistema nacional, una propuesta como la que se plantea en la investigación proyectada, marcaría un hito en el desarrollo autosustentable de la universidad, con la concientización y participación de sus estudiantes, profesores y todo el personal que interviene en su funcionamiento.

1.2 Formulación del Problema

¿Qué elementos deben tomarse en cuenta para el diseño y simulación de una turbina Darrieus-Savonius, como alternativa factible para la iluminación de la planta física de Ingeniería Mecánica de la Universidad José Antonio Páez?

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1 Objetivo General

Diseñar y simular una turbina Darrieus-Savonius como alternativa de generación eléctrica para la planta física de ingeniería mecánica

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Estudiar los parámetros que intervienen en el desenvolvimiento de la turbina para la localidad seleccionada.

2. Modelar una turbina Darrieus-Savonius usando herramientas digitales de última generación para mejor precisión del diseño.

3. Valorar la capacidad de la turbina Darrieus-Savonius para sustentar la iluminación de los salones y áreas comunes en la planta física de ingeniería mecánica.

1.4 Justificación del Problema

En los últimos veinte años se ha comprobado que las energías alternativas se han convertido en formas energéticas que contribuyen con el desarrollo humano. Aunque en estos momentos la falta de una buena administración y el poco acceso a la energía eléctrica, ha traído como consecuencia una disminución en la calidad de vida de los habitantes de diversos países y ha incidido en el aumento de la pobreza a nivel mundial.

Desde el punto de vista práctico, la posibilidad de ofrecer alternativas de solución, a través de la propuesta del diseño y simulación de una turbina Darrieus-Savonius como alternativa de generación eléctrica, puede convertirse en la respuesta a la demanda de energía a nivel local y, posteriormente, ser implementada a nivel macro, por ello, el diseño y posible implementación de esta turbina permitirá cubrir parte de la demanda de energía eléctrica, en el caso de esta investigación fue específicamente para la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad José Antonio Páez, posibilitando cubrir la iluminación de salones de clase y pasillos, generando alrededor de entre 1500 y 2500 watts.

Desde la perspectiva social y económica, hay que destacar que el uso del recurso eólico, como fuente de energía eléctrica hasta la fecha en Venezuela, ha sido limitado, a pesar de contar con grandes extensiones de costas donde el viento presenta altas velocidades esto no ha sido explotado, para intentar, a través de esta energía renovable, subsanar en cierta medida la crisis que se presenta en el sistema eléctrico nacional.

Por lo tanto, el estudio ofrece soluciones a corto, mediano y largo plazo a esta problemática, al menos por sectores a través del aprovechamiento del recurso eólico. Igualmente, desde el punto de vista ambiental, permite reducir los costos en el impacto al ambiente, ya que los servicios y sistemas de generación de energía que emplean combustibles fósiles afectan notablemente el medio ambiente.

En cuanto al aspecto académico, este estudio permitió al investigador aplicar los conocimientos adquiridos en las cátedras que se ofrecen en el desarrollo de la carrera Ingeniería Mecánica y poner en práctica las habilidades en el uso de técnicas computacionales para el diseño y simulación de la turbina Darrieus-Savonius, como alternativa de generación eléctrica para la planta física de Ingeniería Mecánica de la Universidad José Antonio Páez.

1.5 Alcance de la Investigación

El alcance de la investigación se circunscribe al diseño y simulación, mediante herramientas computacionales, de un modelo de turbina Darrieus-Savonius de aprovechamiento eólico, cuya finalidad es convertirse en un prospecto para la generación de electricidad que incida en el beneficio de la planta física de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad José Antonio Páez, en el Municipio San Diego del estado Carabobo, Venezuela.

1.6 Limitaciones

El proyecto tiene características propias donde el tiempo es factor clave para el desarrollo, mejora y análisis del diseño. Es por esto que las características finales del diseño planteado se vieron afectadas por la disponibilidad de tiempo de desarrollo, ya

que es complejo poder realizar un estudio profundo de todas las variables que intervienen en el proceso de generación de la turbina.

Se realiza el proyecto buscando la mejor relación en desarrollo y limitación temporal. La turbina planteada es una turbina híbrida comúnmente desarrollada en programas especializados, debido a la falta de disponibilidad de licencias y requerimientos técnicos de estos software en Venezuela, se realizó el diseño en los programas más ventajosos que se pudieron encontrar disponibles para el país.

Aunado a las condiciones anteriores, existe también una carencia en el pensum de la universidad de una asignatura para el aprendizaje del manejo de softwares de dinámica de fluidos computacionales (CFD) y simulación de fluidos dinámicos sobre diseños CAD, en consecuencia, existió la necesidad de asesorías y capacitaciones externas.

1.6.1 Delimitación espacial

Este proyecto fue diseñado y orientado a tener una aplicación dentro de los límites de la Universidad José Antonio Páez, en el municipio San Diego Edo. Carabobo, Venezuela.

1.6.2 Delimitación temporal

Los datos usados para la definición de este proyecto se encuentran en los estudios meteorológicos tomando todos los meses en un intervalo de años 2019-2020 y hasta febrero 2021.

1.6.3 Delimitación temática

El proyecto se enfocó en la aplicación del análisis computacional para generar un diseño y la posterior simulación de un rotor de tipo Darrieus-Savonius, que alcanzo el objetivo de poder captar la energía eólica suficiente para abarcar una posterior iluminación base en la planta física de ingeniería mecánica de la Universidad José Antonio Páez usando una turbina eólica de eje vertical.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la Investigación

Vidal, C. (2019), realizó un trabajo de grado bajo el título “**Diseño de un Aerogenerador Savonius para uso Doméstico**”, optando al título de Ingeniero Mecánico de la Universidad Politécnica de Valencia, España. Fue una investigación de campo, modalidad proyecto factible donde se estableció como objetivo primordial diseñar de forma completa (mecánica, eléctrica y electrónica) un aerogenerador de eje vertical (de tipo Savonius) y de bajo coste para generar potencia eléctrica a baja tensión.

El autor de la investigación aclara que la intención de este proyecto no es conectar las cargas eléctricas (dispositivos de uso doméstico) directamente al aerogenerador, pues en tal caso sólo se podrían utilizar cuando hubiese viento con una velocidad destacable, asegurando que es preferible acumular toda la energía eléctrica producida durante el día en una batería y conectar los dispositivos a dicha batería, evitando así la necesidad de que el uso y la generación de la energía eléctrica sean simultáneos. Además, la velocidad del viento puede variar durante el día considerablemente, de forma que el mejor concepto de uso de la energía eólica en este ámbito doméstico es acumulando la energía.

Igualmente, el autor se propuso, como requisitos a cumplir para diseñar el aerogenerador, los siguientes: Seguridad y estabilidad mecánica, Resistencia de los materiales frente a la radiación solar, la lluvia y la humedad, Baja emisión de ruido, Velocidad del viento baja para que comience el arranque, Generación de tensión continua constante y estabilizada a 5 V y Punto de funcionamiento eficiente en la velocidad nominal.

Por último, entre las conclusiones alcanzadas con el diseño de un aerogenerador

de tipo Savonius para uso doméstico, se comprobó que entrega de media, entre 3 y 6 W de potencia y entre el 1% y el 2% del gasto energético de un hogar medio en electricidad. El equivalente a esta energía es la posibilidad de cargar entre 3,8 y 7,5 teléfonos móvil al día. Lamentablemente, el producto no puede competir económicamente con la energía que suministra la red eléctrica en España, pero es una buena alternativa para las zonas que no están suministradas por esta red eléctrica, tales como casas y albergues en zonas de alpinismo y senderismo o zonas rurales alejadas de los puntos de suministro de la red.

En este proyecto se realizó, finalmente, el diseño mecánico del aerogenerador y un circuito electrónico que adapta y estabiliza la tensión a 5 V para cargar una batería portátil y/o dispositivos electrónicos que se cargan a baja tensión, tales como los teléfonos móviles. El proyecto incluye aspectos mecánicos (el aerogenerador), eléctricos (modelado y elección del generador de corriente continua), electrónicos (circuito de adaptación de voltaje) y matemáticos (cálculo de la potencia media anual ponderada mediante la distribución probabilística de Weibull). Por este motivo, se considera a este proyecto como representativo del campo de la Ingeniería Mecatrónica aplicada a la generación de energía eléctrica.

Así mismo, Mendoza, N. (2017), en su trabajo de Maestría, titulado **“Diseño de un generador eólico de eje vertical tipo Darrieus helicoidal de 3 KW” para el Tecnológico Nacional de México**” detalla el procedimiento de diseño de una turbina eólica de eje vertical Darrieus de palas helicoidales específicamente para la zona de Pachuca en México. Para llegar a la meta establecida se utiliza una metodología de diseño la cual permita encarar las dificultades del proyecto. La investigación tuvo como objetivo general diseñar y construir un rotor eólico de eje vertical tipo Darrieus helicoidal de 3KW.

El estudio fue una investigación de campo, proyecto factible y para poder desarrollar el diseño del rotor se contemplaron las condiciones de trabajo a la que estuvo sometida la turbina. Dentro de los pasos clave para el desarrollo del diseño se

encuentran aspectos como la selección de la topología, determinar su aplicación hasta la construcción del prototipo los cuales se describen en cada uno de los apartados.

A manera de conclusión, el autor determinó que la selección de materiales adecuados para la fabricación de los componentes del rotor, cumple con las especificaciones planteadas además de estar disponibles dentro del mercado, y los análisis realizados por elemento finito por el software ANSYS obtuvieron buenos resultados, permitiendo sustentar el diseño del rotor, por lo que se dio continuación al desarrollo del diseño, se logró tener una idea más clara sobre el funcionamiento del rotor, detectar los puntos de mejora para proponer un diseño en el cual se solucionen.

Se logró mejorar el autoarranque gracias al diseño y al aumento de la solidez además de permitir observar futuras mejoras en los componentes. En la fase de fabricación surgieron diferentes conflictos en el diseño que se resolvieron cada uno logrando mejorarlo. Al efectuar las pruebas a ambos rotores se logró comprobar algunas de las cuestiones establecidas además de verificar el funcionamiento de cada uno, en el cual cada rotor tiene sus ventajas y desventajas.

Sin embargo el prototipo tuvo un excelente funcionamiento logró cumplir los objetivos, aunque con una velocidad de giro baja atribuida al peso de los materiales, pero aun así se mantiene constante y en un futuro, eso se puede solucionar con un multiplicador o cambiando un componente del rotor por un material más ligero. Fue posible observar que el generador tiene un óptimo autoarranque y puede aumentar su velocidad de giro sin hacer cambios bruscos, presenta poca oscilación en comparación del rotor de palas rectas. El proyecto queda abierto a mejoras como la implementación del sistema de generación, pues sólo se centró en el diseño del rotor.

Banega, J. y Moreno, N. (2016), publicaron un trabajo para optar al título de Ingeniero Mecánico, denominado **“Diseño aerodinámico de una VAWT adecuada a los perfiles de viento de Paraguaná mediante CFD”** para la Revista de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela. Fue un artículo arbitrado que tuvo como objetivo abordar el dimensionamiento de una VAWT tipo Darrieus adecuada a los

perfiles de viento de la Península de Paraguaná, mediante el uso del mencionado método numérico. Fue un estudio descriptivo-proyecto factible.

Así pues, los autores, por medio de la omni-direccionalidad de las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT), proponen el diseño aerodinámico de un aerogenerador tipo Darrieus de perfiles rectos y simétricos, apoyado en la dinámica de fluidos computacional (CFD). Mediante un análisis estadístico y de probabilidad de una muestra de 8.420 datos de las velocidades del viento registradas en la estación meteorológica de Punto Fijo, se determinó la velocidad de diseño y la longitud máxima de los álabes.

Los resultados del estudio permitieron proponer un modelo 2D de CFD de una turbina eólica de eje vertical tipo H-Darrieus, evaluando el desempeño aerodinámico de su rotor frente a las condiciones ofrecidas por los perfiles de viento de la Península de Paraguaná, zona costera de mayor potencial eólico disponible en Venezuela. Apoyándose en los softwares libres de Gmsh y Open FOAM se logró el planteamiento del dominio computacional rotor-estator con interfaz rotativo y modelo de turbulencia k-w SST.

Finalmente, los autores simularon la turbina con diferentes geometrías variando el tipo de perfil y el número de álabes, como los parámetros más influyentes en la eficiencia energética del sistema. Los resultados obtenidos demuestran que tanto los perfiles NACA0015 como 0018 ofrecen las mejores características para el diseño. En términos de la curva de potencia, el modelo NACA0018 es más conveniente por su relación sustentación/arrastre, desempeñando un papel favorable en el arranque de la turbina debido a su sustentación negativa (para un ángulo de paso de 0°) en el inicio de su revolución, requiriendo de un agente externo para su accionamiento.

Concluyen también que a partir de 3 perfiles por rotor, no se genera un incremento apreciable en el coeficiente de potencia (menor al 1%), donde para los modelos ensayados de 2 y 4 álabes se evidenciaron cambios importantes en el arrastre aerodinámico. Estas características identificadas permiten señalar que la mejor opción para el diseño aerodinámico de una VAWT Darrieus, adecuada a los perfiles de

viento de Paraguaná, debe apuntar hacia un rotor de 3 álabes con perfiles NACA0018.

Por último, Carantoña O. (2009), presentó un reporte de facultad titulado **“Análisis del Comportamiento Aerodinámico de Perfiles empleados en Aerogeneradores de Baja Potencia”** donde establece las relaciones que existen entre distintos perfiles para turbinas eólicas, concretó que un perfil E-387 muestra el mejor rendimiento para turbinas de generación de baja potencia.

En el reporte se muestra el análisis para la selección de cinco perfiles aerodinámicos: S-822, E-387, MH-106, SG-6040 y S-8036; a ser usados en aerogeneradores de baja potencia. A cada perfil se le realizó un estudio de su coeficiente de sustentación C_l , coeficiente de arrastre C_d y la relación entre ambos C_l/C_d , todo esto en función de distintos valores y para un intervalo de números de Reynolds comprendido entre 100.000 y 500.000.

El estudio fue una investigación experimental, donde el autor concluyó mediante un cuadro comparativo donde se resaltan las características más importantes de los cinco perfiles, a fin de facilitar el proceso de selección según las necesidades. Mostrando la importancia de los gráficos de curvas para comparar estos perfiles y observar los beneficios individuales.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1. Las Turbinas de Viento

La formación de vientos es una transformación de la energía solar y es el resultado del calentamiento desigual de la atmósfera por el sol, las irregularidades de la superficie terrestre y la rotación de la tierra. Los patrones de flujo del viento y las velocidades varían mucho en las distintas geografías del planeta y son modificados por cuerpos de agua, vegetación y diferencias de terreno. Los seres humanos usan este flujo de viento, o energía de movimiento, para muchos propósitos: navegar, volar una cometa, e incluso generar electricidad. Martil (2019), afirma que:

El término energía eólica describe el proceso por el cual el viento se utiliza para generar energía mecánica o electricidad. Las turbinas eólicas convierten la energía cinética en el viento en energía mecánica. Esta potencia mecánica puede utilizarse para tareas específicas (como moler grano o bombear agua) o un generador puede convertir esta energía mecánica en electricidad (p. s/n).

Así que, una turbina eólica aprovecha la velocidad del viento para generar electricidad mediante la rotación de un eje impulsado por alabes diseñados para cumplir esta función. Aunque el aprovechamiento de la energía eólica data de fechas bastante antiguas, cuando se usaban molinos de viento para procesar granos, a principios del siglo XX fue que se empezaron a realizar proyectos eólicos, pero la energía eólica nace como tal, en términos más recientes, para 1970 cuando se empezaban a proyectar y aplicar las primeras turbinas de generación, marcando una pauta histórica que ha cambiado el mundo para siempre.

2.2.2. Velocidad del Viento

Garriga J. (2012) pública para EoliCat que:

Las turbinas eólicas requieren de vientos ventajosos para su utilidad. Los aerogeneradores empiezan a funcionar cuando el viento alcanza una velocidad de 3 a 4 metros por segundo y llega a la máxima producción de electricidad con vientos de unos 13 a 14 metros por segundo en turbinas de alta capacidad”. Si el viento es muy fuerte, por ejemplo de 25 metros por segundo como velocidad media durante 10 minutos, los aerogeneradores se paran por cuestiones de seguridad, esto en los generadores más aplicados en la industria eléctrica, generadores de eje horizontal (p. s/n).

Según los análisis meteorológicos de agencias como Meteored, los vientos para San Diego, en el Edo Carabobo, suelen variar entre 2,16 metros por segundo hasta un máximo de 6,4 metros por segundo según la estación climatológica y condiciones meteorológicas.

2.2.3 El Triángulo de Velocidades

El triángulo de velocidades es una herramienta gráfica usado en el estudio de turbomaquinas se refiere al triángulo formado por tres vectores de velocidad (ver figura 1)

c: velocidad absoluta del fluido

w: velocidad relativa del rotor respecto al fluido

u: velocidad lineal del rotor

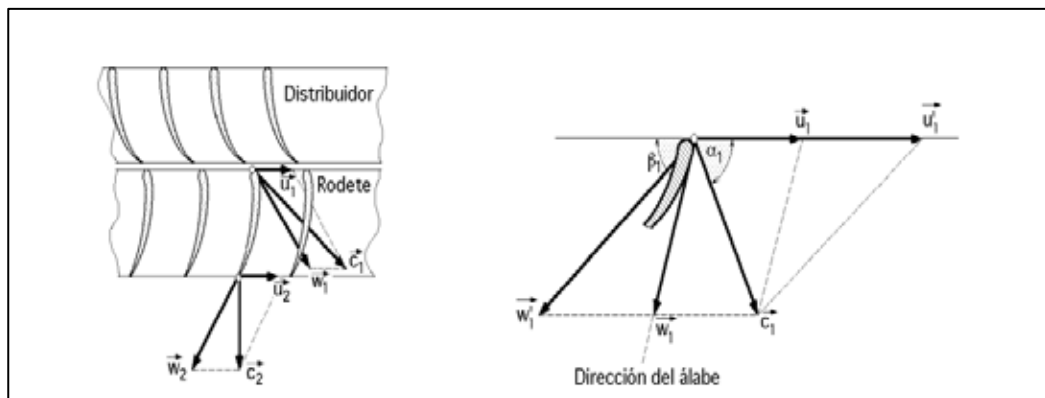


Figura 1. Triángulo de velocidades.
Fuente: Ingenieríaética

Las velocidades se relacionan de la siguiente manera:

Ec. 1

La presencia de estas velocidades permitirá obtener otras cargas producto del viento en el diseño final de la turbina.

2.2.4 Clasificación de la Instalación de Acuerdo a las Normas COVENIN (2003).

Según la norma COVENIN (2003), atendiendo a la naturaleza de los principales efectos que el viento puede ocasionar en las construcciones, éstas se clasifican según las características de la geometría expuesta a la acción del viento en los varios tipos. En este sentido, las turbinas eólicas verticales concuerdan con el tercer tipo de construcción definido por la norma, que dice: "TIPO III".

Este Tercer Tipo describe lo siguiente: Pertenecen a este tipo aquellas construcciones especialmente sensibles a las ráfagas de corta duración las cuales favorecen la ocurrencia de oscilaciones importantes. Comprende las construcciones definidas como Tipos I y II cuya relación de esbeltez sea mayor de 5. Construcciones como torres, antenas atirantadas y en voladizos, tanques elevados, parapetos y vallas. La fuerza que impacta en la superficie (A_f) basados en la norma para construcciones tipo 3, abiertas, estará regida por:

Ec. 2

Q_z : Presión dinámica.

G_h : Factor de respuesta anti ráfaga.

C_f : Relación de dimensión.

A_f : Área expuesta.

2.2.5 Energía Disponible en el Viento

Según Albert Betz (1919). “El viento aplicable a las turbomaquinas generadoras, debe estar en movimiento, por lo tanto, debe considerarse que tiene una energía cinética”, la cual se define como:

$$\text{Ec. 3}$$

Aplicando Bernoulli a la entrada y a la salida de la turbina obtendremos:

$$\text{Ec. 4}$$

Dado que las alturas a la entrada y salida son las mismas entonces $Z_1=Z_2$, despejando y agrupando los términos obtenemos de la ecuación 4:

$$\text{Ec. 5}$$

En términos de dimensiones obtendremos de la ecuación 5:

$$\text{Ec. 6}$$

Simplificando...

— —

Ec. 7

Esto dice que para el caso de la turbina generadora de eje vertical sólo se involucra la velocidad del viento y, dado que se aplica la conservación de la masa en la entrada y salida de la máquina ya que esta no genera variación sobre ella, se puede ir directamente a los enunciados de Betz, quien simplificó y enunció los cálculos para determinar la cantidad de potencia disponible:

—

Ec. 8

En esta ecuación V se simboliza la velocidad antes de la turbina para el viento.

2.2.6 El Límite de Betz

La física impide que se pueda extraer toda la energía del viento, la velocidad final, una vez aprovechada, la energía cinética no puede ser igual a cero. El viento, al paso por la turbina, se frena, saliendo del mismo con una velocidad menor que con la que ha entrado. En la práctica se aprovecha un 40% de la potencia eólica disponible. La máxima potencia eólica aprovechada la define el Límite de Betz. La ecuación 8 indica que la potencia eólica disponible es proporcional a la densidad del aire, al área expuesta perpendicularmente al flujo de viento y al cubo de la velocidad del mismo.

La potencia eólica disponible es la máxima potencia que se podría extraer al viento si se pudiese convertir toda su energía cinética en energía útil. El límite de Betz, los rozamientos aerodinámicos y mecánicos, rendimientos del generador eléctrico, etc. sólo permitirán en la práctica, en el mejor de los casos, un 40% de la potencia eólica disponible. Para Arcos (2019):

Existe un límite superior para la potencia eólica aprovechada, según el cual ningún aerogenerador puede extraer del viento una potencia superior a la fijada por este límite. Este es el definido por la Teoría de Betz y, aunque este teorema se demuestra para máquinas de eje horizontal (tipo hélice), sus conclusiones son aplicables a las de eje vertical. De hecho, el rendimiento de estas últimas se acostumbra a referir a la potencia máxima aprovechada dada por el límite de Betz (p. s/n).

Una turbina eólica puede convertir en energía mecánica como máximo un 59,26 % de la energía cinética del viento que incide sobre ella. La teoría de Betz es una simplificación, ya que no tiene presente algunos aspectos existentes en la práctica como resistencia aerodinámica de las palas, pérdida de energía por turbulencia de la estela, la compresibilidad del aire y la propia interferencia entre las palas.

2.2.7. Efecto de Arrastre

Según Cengel (2004). “El arrastre es considerado como la oposición o resistencia que producen el flujo de un fluido y el movimiento de un cuerpo que se desplaza a través de éste”. Esta resistencia al movimiento, producto del fluido circundante, varía en función de la forma de dicho cuerpo. Si bien existen diferentes alternativas para observar este fenómeno, tienen en común que el flujo de trabajo es externo, o sobre cuerpos, algunas de estas formas son:

Un cuerpo en movimiento que pasa a través de un flujo quieto, como por ejemplo; un proyectil en tierra.

En flujo de un fluido que pasa a través de un cuerpo en estado de reposo, como el movimiento del aire en los edificios de una ciudad.

Un cuerpo y un fluido en movimiento que se desplazan en sentidos contrarios que permitan este arrastre, como un avión desplazándose a contra flujo.(ver figura 2)

La fuerza de arrastre se puede definir en función al número de Reynolds como:

Ec. 9

Se define el coeficiente de arrastre:

$$\frac{\text{---}}{\text{---}}$$

Ec. 10

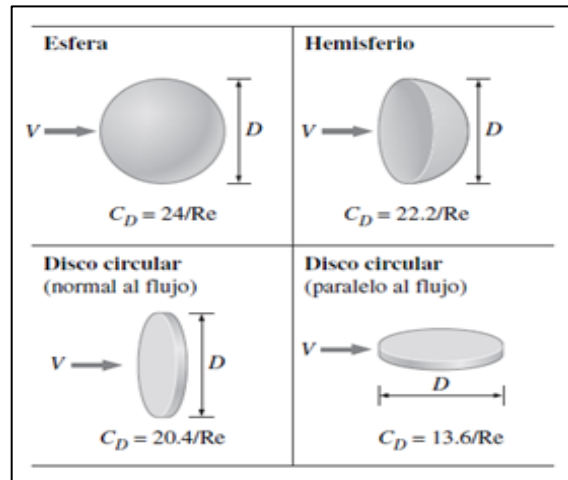


Figura 2. Ejemplos de C_D , flujo de aire.
Fuente: Cengel

2.2.8 Rotor Bajo Arrastre

Para Cengel (2004). Al tomar el efecto de arrastre en un rotor se debe considerar que éste también está girando y dadas las circunstancias, su potencia de salida está influenciada por su factor de arrastre.

Ec. 11

Lo que es igual a:

Ec. 11.1

Ahora, suponiendo que el rotor que existe bajo este parámetro es totalmente simétrico con una configuración simple como se ve en la figura 3:

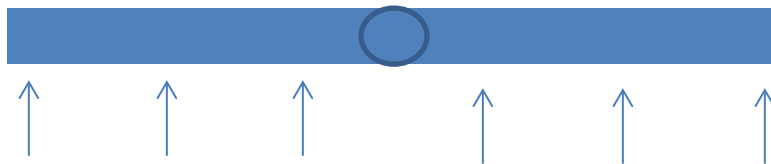


Figura 3. Ejemplo básico de rotor llano.
Fuente: Ramirez (2021).

Con el ejemplo de la figura 3 se muestra que no sería posible generar potencia, ya que las placas son iguales, la P_{ds} sería igual a cero. Pero existe la configuración para cuerpos esféricos o semiesféricos, por ejemplo, un rotor basado en el diseño de

Savonius no presenta esta falla. El diseño de este rotor contempla el uso de planchas en forma de cascarón semicircular, para lo cual, Cengel ofrece unos coeficientes (en Reynold de 10^4) de arrastre de 2.3 para su lado cóncavo y 1.2 para su lado convexo (ver figura 4) así mismo se comportaría un rotor Savonius como el de la figura 5.

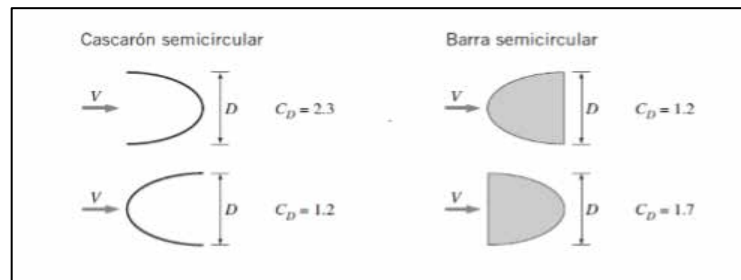


Figura 4. Coeficientes de arrastre para semiesferas.

Fuente: Çengel

Ahora, repitiendo el procedimiento anterior, se tiene:

Ec. 12

Sustituyendo los CD correspondientes:

Ec. 12.1

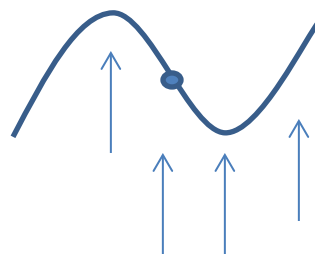


Figura 5. Ejemplo simple de rotor Savonius.

Fuente: Ramirez (2021).

Finalmente:

Ec. 13

Ec. 14

Donde 1,1 es el coeficiente de arrastre para este tipo de configuración.

El factor de potencia (C_d) para cuerpos de arrastre viene representado como la relación de la potencia por la fuerza de fricción en el cuerpo entre la potencia del viento circundante.

$$\frac{P}{F \cdot v} \tag{Ec. 15}$$

El coeficiente de potencia (C_p) es un parámetro adimensional, que expresa la cantidad de potencia que una turbina es capaz de extraer del viento. Por lo tanto, C_p es la razón de la potencia extraída del viento con respecto a la potencia disponible. La potencia generada por la energía del viento viene dada por:

$$P = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p \tag{Ec. 16}$$

Donde S es el área del rotor.

La potencia extraída de la turbina viene dada como:

$$P = M \omega \tag{Ec. 17}$$

Donde M es el momento total generado por la turbina donde combinando la ecuación 16 y 17 obtenemos:

$$\frac{1}{2} \rho S v^3 C_p = M \omega \tag{Ec. 18}$$

2.2.9 Turbinas Bajo Efectos de Sustentación

Las turbinas de eje vertical Darrieus y todas aquellas de eje horizontal, son máquinas basadas en la fuerza sustentación, el proceso para obtener las características aerodinámicas de este tipo de turbinas es complicado, para llevar a cabo su estudio, comúnmente se utiliza la dinámica de fluidos computacional, sin embargo, hay modelos como el de teoría del disco actuador, modelo del cilindro vórtice del disco actuador y la teoría del rotor de alabe. Dentro de esos, el más conocido es el de teoría del disco actuador, ya que fue utilizado para calcular el límite teórico de eficiencia de una turbina, conocido como Límite de Lanchester-Betz.

Se entiende por sustentación a aquellos cuerpos que, sometidos a un flujo de fluido, comienzan a ganar elevación por una fuerza normal a su forma. La sustentación es una propiedad necesaria para hacer que los aviones vuelen y esta depende de la forma del cuerpo, la velocidad relativa de este respecto al fluido, la densidad del fluido y la masa del cuerpo. Se expresa en un coeficiente adimensional llamado coeficiente de sustentación que se expresa mediante:

Ec. 19

Donde F_l es la fuerza de sustentación sobre el cuerpo, A es el área del cuerpo vista desde planta y V_r es la velocidad relativa del fluido, el C_l puede variar según la configuración y geometría del flap como se muestra en la figura 7.

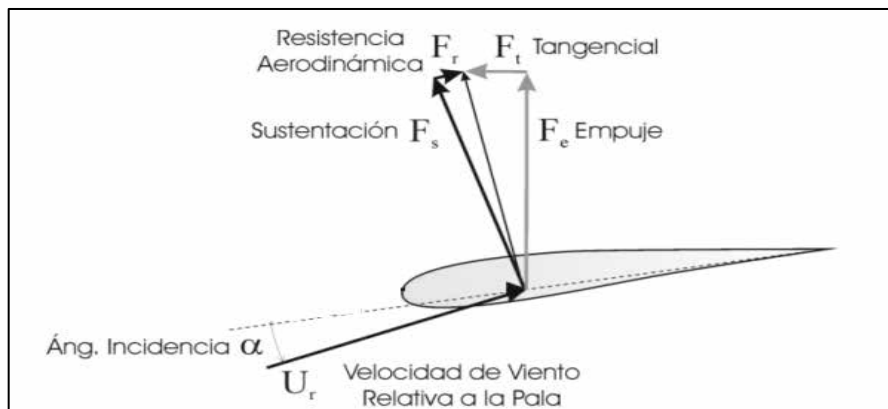


Figura 6. Ejemplo de las fuerza de sustentación en un flap.

Fuente: www.kimerius.com

Por lo tanto, sumando a la fuerza de sustentación la fuerza de arrastre que se estudió anteriormente, se obtiene la resultante de estas dos fuerzas, conocida como fuerza aerodinámica la cual presenta una componente tangencial y una normal (ver figura 6). Cada una de ellas cumple una función distintita: La componente tangencial actúa en el sentido del movimiento de las palas, siendo la responsable de la aparición del par motor en el eje de la turbina, mientras que la componente normal, o fuerza de empuje, no realiza ningún trabajo y debe soportarla la torre del aerogenerador.

En las palas de la turbina eólica se busca maximizar las diferencias de presiones, evitar la formación de torbellinos y favorecer la circulación del aire sobre la superficie de éstas. Por ende, se escogen perfiles de palas tales que sean lo más convenientes aerodinámicamente. La cantidad de palas también es variable dependiendo el tipo de turbina, por lo general, la elección del número de palas se basa en el principio que establece que el más bajo número de palas produce los giros más rápidos del rotor. Las turbinas eólicas más comunes en el mundo son las que presentan tres palas, debido a que:

No generan ningún momento de inercia al girar y por consiguiente no induce esfuerzos sobre la estructura.

Presentan un giro más suave y uniforme debido a las propiedades de su momento de inercia.

Pese a girar a menor velocidad que los rotores mono y bipala, disminuyen los esfuerzos de la fuerza centrífuga, el nivel de vibraciones y la producción de ruido.

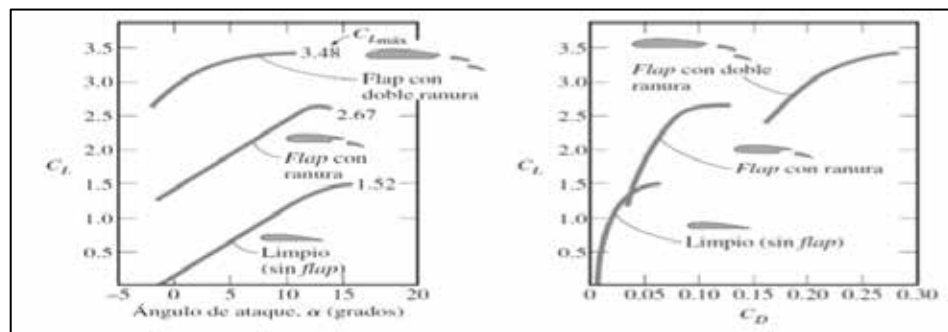


Figura 7. Cl de algunas configuraciones de Flaps.

Fuente: Cengel

2.2.10 Turbina Savonius

Esta turbina extrae la energía del viento por medio de dos semicilindros ahuecados desplazados. El torque de giro se produce por el cambio de momento del viento que pasa a través de ella, como también del efecto aerodinámico que origina una reacción perpendicular a una corriente de aire, cuando un cilindro gira dentro de

ella, efecto que se conoce con el nombre de Magnus. Tiene un buen torque de partida, pero su eficiencia es más baja comparada con el rotor Darrieus. También al igual que ésta última, no necesita orientarse con respecto al viento para poder girar.

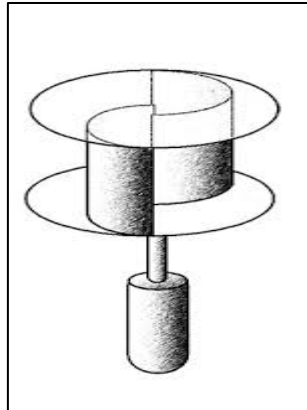


Figura 8. Rotor Savonius.

Fuente: saberes y ciencia

2.2.11 Turbina Darrieus

La única turbina de eje vertical que ha sido comercialmente fabricada a todos los volúmenes es la máquina Darrieus, que debe su nombre al ingeniero francés Georges Darrieus, quien patentó el diseño en 1931. La máquina Darrieus se caracteriza por sus palas en forma de C, que le hacen asemejarse a un batidor de huevos. Normalmente se construye con dos o tres álabes.

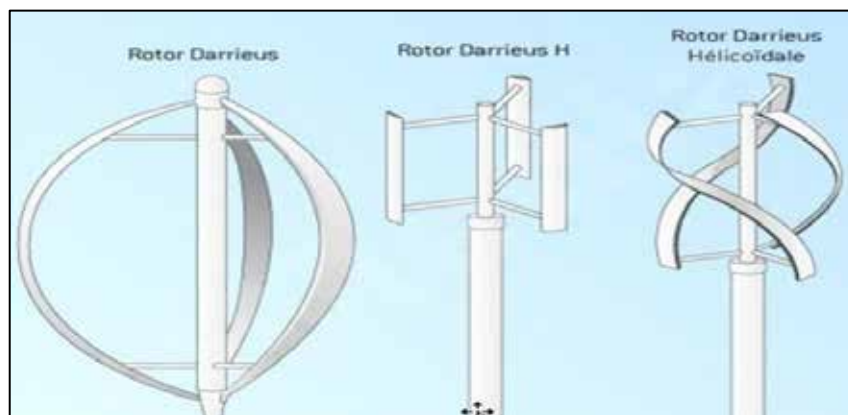


Figura 9. Distintas configuraciones del rotor Darrieus.

Fuente: Wikipedia.

2.2.12 Generador híbrido Darrieus-Savonius

Existen algunas aplicaciones prácticas donde se mezclan rotores Darrieus y Savonius para aumentar la eficiencia de la máquina. Puesto que la máquina con rotor Darrieus cuenta con problemas al arrancar, al incorporar un rotor Savonius que no cuenta con ese problema, podría sustituir al motor de arranque. Es por esta razón que se pretende diseñar la turbina en base a este principio, buscando la mejor eficiencia para este tipo de turbina.

Los rotores híbridos son solución energética que satisface las necesidades dinámicas de los rotores existentes de generación para cumplir con las condiciones de arranque y velocidad de operación, como el Darrieus-Savonius. Los aerogeneradores de eje vertical tienen la ventaja de adaptarse a cualquier dirección del viento, se les conoce como Panémonos (todos los vientos), esto se debe a que el diseño que tiene los hace funcionar por una diferencia de coeficiente de arrastre entre las dos partes de sus hélices. Esta diferencia de resistencia al viento hace que el rotor sea propenso a girar sobre su eje. A excepción del rotor Darrieus, los aerogeneradores de eje vertical operan con vientos de baja velocidad donde difícilmente superan las 200 RPM.

Se emplean para generar potencias que van de los 200 watts a los 4 mega watts. En estricto rigor, no necesitan de una torre, lo cual permite un fácil mantenimiento. Generalmente se caracterizan por tener altos torques de partida. Patentado por G. J. M. Darrieus en 1931, este modelo es el más popular de los aerogeneradores de eje vertical. Nace por la necesidad de evitar la construcción de hélices sofisticadas como las que se utilizan en los aerogeneradores de eje horizontal, consta de unas finas palas o alerones cuya aerodinámica similar a la de un ala de avión, al poseer una forma parecida a una cuerda para saltar llamada Catenaria o de tipo Troposkien, hace que los alerones del Darrieus experimenten una fuerte fuerza centrífuga.

Al trabajar en pura tensión hace que los alerones sean simples y económicos. Su eficiencia es cercana a la de los de eje horizontal, posicionándolo en uno de los de mayor eficiencia de eje vertical. Pero el problema que presenta es la dificultad para arrancar por sí mismo, teniendo que recurrir a un sistema de arranque secundario

aunque una vez en funcionamiento alcanza velocidades de rotación muy elevadas y es capaz de mantenerse debido a la aerodinámica de sus palas. El modelo de rotor Savonius es muy simple.

Consiste en un cilindro hueco partido por la mitad, en el cual sus dos mitades han sido desplazadas para convertirlas en una S, las partes cóncavas de la S captan el viento, mientras que los reversos presentan una menor resistencia al viento, por lo que girarán en el sentido que menos resistencia ofrezcan. Para evitar la sobre presión en el interior de las zonas cóncavas que se origina al no poder salir el aire, perjudicando el rendimiento, el sistema se mejora separando ambas palas y dejando un hueco entre ambas para que exista un flujo de aire.

Debido a la gran resistencia al aire que ofrece este tipo de rotor, solamente puede ser utilizado a bajas velocidades. Es por tanto útil para aplicaciones de tipo mecánico. Si se acopla un rotor Savonius a un rotor Darrieus como sistema de arranque con la finalidad de vencer la inercia de partida, se obtiene una turbina como la que se muestra en la figura 10, de esta manera el Darrieus obtiene la velocidad de operación para empezar a otorgar potencia. Este tipo de turbina, formado por dos rotores que compensan sus deficiencias, es simple, robusta y barata respecto a los otros tipos utilizados en generación eólica y puede construirse de manera casera.

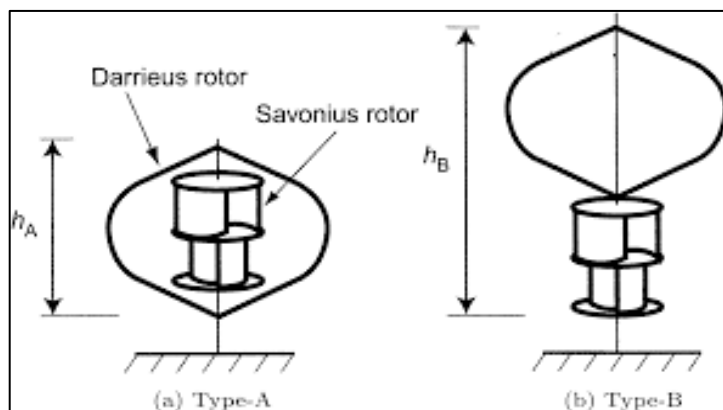


Figura 10. Ejemplos de turbinas Darrieus-Savonius.
Fuente: Electrical Engineering in Japan, Vol. 150, No. 4, 2005.

Una manera más útil para determinar y comparar la eficiencia del aerogenerador es utilizar la relación C_p . Es un término que sustituye al número de revoluciones por minuto de la turbina; sirve para comparar el funcionamiento de diferentes máquinas eólicas, por lo que también se le suele denominar velocidad específica. Y se define con la siguiente ecuación:

Ec. 20

Dónde:

r = radio del generador (m)

ω = velocidad angular (rad / s)

v = velocidad del viento (m / s)

El TSR es una buena manera también para analizar, el comportamiento del C_p , de cada tipo de aerogenerador lo que se relaciona directamente en la figura 11.

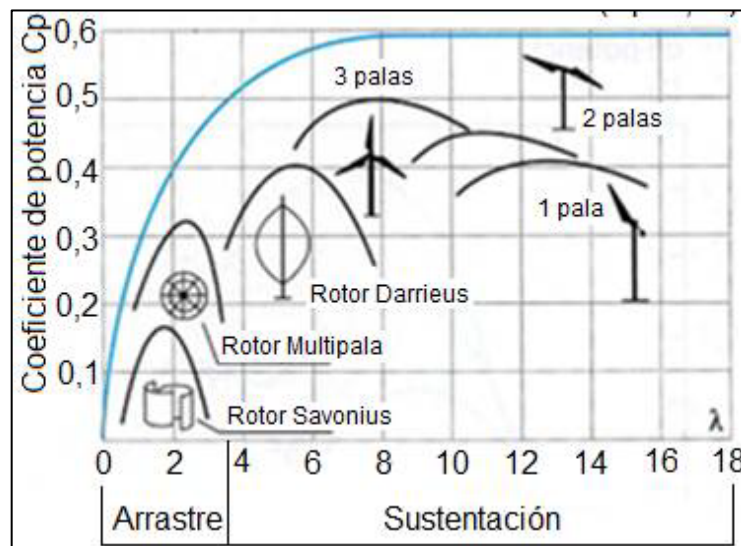


Figura 11. Coeficiente de potencia en rotores bajo zonas de arrastre y sustentación.

Fuente: Monografías.com

2.2.13 Velocidades en un Rotor

Uno de los grandes problemas de los aerogeneradores es su funcionamiento frente a la aleatoriedad del estímulo otorgado por el viento. El viento puede ir a

velocidades elevadas como muy lentas, en cortos periodos de tiempo y también puede ser constante o presentarse en forma de ráfagas. Las exigencias climáticas que sufren los aerogeneradores son notables.

Según Andrade E. (2009). “Para lograr una velocidad constante en el eje del generador se pueden utilizar diversas soluciones que van desde la sistemas mecánicos (caja de cambio) hasta la alteración del comportamiento aerodinámico del aerogenerador frente al viento (variación del Ángulo de ataque y diseño de pérdida aerodinámica de las mismas)”.

Para el diseño de las Turbinas eólicas es necesario definir las 3 velocidades características: Velocidad de arranque (V_a), es la velocidad a la cual la máquina comienza a funcionar; Velocidad de diseño o nominal (V_n), es aquella velocidad de la cual se puede obtener la mayor ganancia energética posible y alcanzando las condiciones de diseño; Velocidad de puesta en bandera (V_b) es la velocidad máxima de viento en que puede operar la máquina sin destruirse, sobre esta velocidad el aerogenerador se detiene. Se puede ver que las velocidades de arranque se encuentran entre los 3 ó 4 m/s, la velocidad nominal en el orden de los 7 u 8 m/s y la velocidad de máxima está a los 15 m/s, comunes para estos diseños.

2.2.14 Solid Works 2020

SolidWorks es un programa de diseño y simulación por excelencia preferido por los estudiantes de ingeniería en diferentes especialidades, es bien conocido que es un programa CAD que presenta características únicas y que se ha ido optimizando en sus prestaciones a través de los años. Según la página oficial del proveedor SOLIDWORKS® (2020) “Presenta muchas mejoras y optimizaciones, principalmente creadas como respuesta directa a las solicitudes de los clientes. Estas mejoras le permiten agilizar y aumentar la calidad del proceso de desarrollo de su producto, desde el diseño conceptual hasta la fase de fabricación” (p. s/n).

2.2.15 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

Es un área de investigación de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de fluidos,

adaptado a la tecnología moderna. Los ordenadores son utilizados para realizar millones de cálculos requeridos para simular la interacción de los líquidos y los gases con superficies complejas proyectadas por la ingeniería obteniendo resultados representativos (ver figura 12). Existe variedad de programas que pueden realizar simulaciones de tipo CFD, es recomendable siempre usar aquellos que sean más adaptables a cada situación específica.

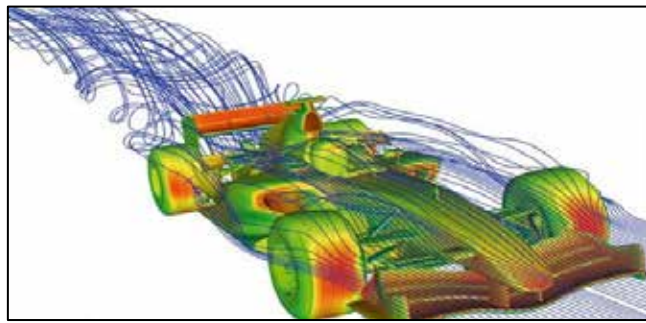


Figura 12. Simulación aerodinámica en un coche F1.

Fuente: OpenFoam

2.2.16 Wheater Spark

WeatherSpark.com ofrece informes detallados del clima típico para 145.194 ubicaciones en todo el mundo. Partiendo de la información satelital de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio o por sus siglas en inglés NASA. El portal de Wheater Spark es una herramienta útil y práctica que ofrece informes de los registros y también proporciona pronósticos según análisis matemático y climatológico.

Cedar Lake Ventures, Inc. es una pequeña empresa poseedora de Wheater Spark con sede en el área de Minneapolis, Estados Unidos. Desarrollan, poseen y operan una cartera de sitios web, herramientas interactivas basadas en la web, software de escritorio y API web.

2.3 Definición de términos

CAD: Es la abreviación de diseño asistido por computadora por sus siglas en inglés (Computer-aided design).

FLAP: Es la traducción de “solapa”, aunque en inglés el término es ampliamente usado para referirse a un alerón.

Catenaria: En física y geometría, es la curva que asume una cuerda idealizada cuando está anclada en sus extremos y gira alrededor de su eje largo a una velocidad angular constante. También es conocida en otros idiomas como Troposkien.

RPM: Es una magnitud física que sus siglas definen revoluciones por minuto, es decir, la cantidad de giros completos que da un elemento en un intervalo de tiempo.

Anemómetro: Instrumento para medir la velocidad de circulación de un fluido gaseoso, en especial del viento.

Parque Eólico: Son agrupaciones de más de un aerogenerador, formando entre todos un conjunto de generación.

Veleta: es un dispositivo giratorio que consta de una placa que gira libremente, un señalador que indica la dirección del viento y una cruz horizontal (opcional) que indica los puntos cardinales.

TSR:
relación entre la velocidad tangencial de la punta de una pala y la velocidad real del viento, v . La relación velocidad punta está relacionada con la eficiencia, con la variación óptima con diseño de hoja.

Aerodinámica: La aerodinámica es la rama de la mecánica de fluidos que estudia las acciones que aparecen sobre los cuerpos sólidos cuando existe un movimiento relativo entre estos y el fluido que los baña, siendo este último un gas y no un líquido, caso este que se estudia en hidrodinámica.

Cóncavo: Que tiene, respecto del que mira, forma curva más hundida en el centro que en los bordes.

Convexo: Que tiene, respecto del que mira, forma curva más prominente en el centro que en los bordes.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de Investigación

La realización de este proyecto reside en el campo de los proyectos factibles. En este sentido, el Manual de Trabajos de Grado de Maestrías y Tesis Doctorales de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador (UPEL) (2012), define el proyecto factible como un estudio “que consiste en la investigación, elaboración y desarrollo de una propuesta de un modelo operativo viable para solucionar problemas, requerimientos o necesidades de organizaciones o grupos sociales” (p.7). La propuesta que lo define puede referirse a la formulación de políticas, programas, tecnologías, métodos, diseños o procesos, que sólo tienen sentido en el ámbito de sus necesidades.

Bajo el concepto que la UPEL proporciona se engloba este proyecto, que busca solucionar problemáticas comunes en la actualidad del país por medio de la investigación y desarrollo de una propuesta de diseño, que pueda proveer electricidad a la planta física de la Escuela de Ingeniería Mecánica en la Universidad José Antonio Páez.

3.2 Diseño de Investigación

Altuve y Rivas (1998) aseguran que el diseño de una investigación, “... es una estrategia general que adopta el investigador como forma de abordar un problema determinado, que permite identificar los pasos que deben seguir para efectuar su estudio” (p. 231). El abordaje de este trabajo en el campo del diseño y la simulación lo incluyen en el tipo documental, de campo y experimental.

Se entiende por investigación documental según UPEL (2012) “El estudio de los problemas con el propósito de ampliar y profundizar el conocimiento de su naturaleza, con apoyo, principalmente, en trabajos previos, información y datos

divulgados por medios impresos, audiovisuales o electrónicos.” (p. 27). El uso de la información disponible será el pilar de esta investigación. Debido a que por su naturaleza, el diseño se basó y fundamentó en los datos desarrollados por otros autores.

3.3 Nivel de Investigación

La investigación se presenta como un estudio con un nivel descriptivo, debido a que el propósito es definir y argumentar la utilidad de las turbinas de generación eólica para la aplicación en áreas comunes, por medio de diseño y simulación, Sabino (2010), establece que:

Para la investigación descriptiva, su preocupación primordial radica en descubrir algunas características fundamentales de conjuntos homogéneos de fenómenos, utilizando criterios sistemáticos que permitan poner de manifiesto su estructura o comportamiento. De esta forma se pueden obtener las notas que caracterizan a la realidad estudiada. (p. 51).

Este tipo de diseño se cumple en esta investigación, pues se propuso indicar las características y procedimientos a seguir para el diseño y simulación de una turbina Darrieus-Savonius, como alternativa factible para la iluminación de la planta física de Ingeniería Mecánica de la Universidad José Antonio Páez.

3.4 Población

Según refiere Tamayo (2012), la población es la totalidad de un fenómeno de estudio, que incluye la totalidad de unidades de análisis que integran dicho fenómeno y que debe cuantificarse para realizar un determinado estudio, donde se integran un conjunto N de entidades que van a participar de una determinada característica y se le denomina población ya que constituye la totalidad del fenómeno adscrito a una investigación. Según esta referencia que se hace de lo dicho por Tamayo, anteriormente citado y el concepto de inclusión que éste refiere para poder seleccionarse una población, de manera que se establece que fue todo el proceso de diseño para rotores eólicos como fundamento de la generación eléctrica eólica.

3.5 Muestra

En cuanto a la muestra en este tipo de estudio, se puede definir la misma según Arias (2006), quien sostiene que “Es un subconjunto representativo y finito que se extrae de la población accesible” (p. 72), lo cual se reafirma por Bernal (2006), quien afirma que “Es la parte de la población que se selecciona y de la cual realmente se obtiene la información” (p. 133), de acuerdo a estos autores, y tomando en cuenta las características de la población, se selecciona como muestra la turbina de generación tipo Darrieus-Savonius, donde el rotor Darrieus será de tipo “c” y sobre la cual se trabajó y se buscó la información pertinente para realizar el diseño y simulación.

3.6 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

En esta parte de la investigación se expresa la forma en que se recolectaron los datos relacionados con las variables involucradas. Las técnicas de recolección de datos según Arias (2006) “Son las distintas formas o maneras de obtener la información” (p. 146), el mismo autor señala que los instrumentos son medios materiales que se emplean para recoger y almacenar datos.

La investigación cuantitativa que se busca realizar requiere de aplicar un conjunto de tipos de técnicas de recolección de datos, debido a la naturaleza de la investigación y al campo experimental al que pertenece, el proyecto usa las técnicas básicas de: observación del fenómeno, uso de documentos y registros así como también se involucra la técnica Delphi. Según Arias (2012, p.69) “La observación es una técnica que consiste en visualizar o captar mediante la vista, en forma sistemática, cualquier hecho, fenómeno o situación que se produzca en la naturaleza o en la sociedad, en función de unos objetivos de investigación preestablecidos.”

En el caso de los instrumentos usados Tamayo y Tamayo (2012) define que: “Un instrumento de recolección de datos es cualquier recurso, dispositivo o formato (en papel o digital), que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información” (p. 69). El proyecto en cuestión aplica las técnicas de análisis, simulación y ensayo por medio de recursos electrónicos de investigación de softwares ingenieril. La documentación computacional es necesaria para la comparación entre autores y la

posterior comparación según la experiencia o características propias del proyecto.

3.7 Fases de la Investigación

La forma de lograr el diseño de la turbina eólica se hizo bajo el necesario cumplimiento de los procedimientos, con una serie de operaciones que se desglosaron en las siguientes etapas:

Fase I: Estudiar los parámetros que intervienen en el desenvolvimiento de la turbina para la localidad seleccionada.

Descripción: Durante esta fase de la investigación, se recolecta la información sobre las características meteorológicas de la localidad seleccionada, fundamentalmente la velocidad del viento en la zona, ya que por la omni-direccionalidad de operación que poseen estas turbinas no es necesario aplicarse en una dirección determinada. La forma ideal de recolectar esta información es por medio de un anemómetro directamente sobre el área de estudio, debido a la situación pandemia COVID-19 que restringe la presencia en áreas públicas, se usaron herramientas virtuales para la obtención de los datos.

Fase II: Modelar una turbina Darrieus-Savonius usando herramientas digitales de última generación para mejor precisión del diseño.

Descripción: Para el modelado 3D del rotor se usaron herramientas computacionales CAD, en este proyecto se aplica el software SolidWorks. Los planos, cotas y diseños previos son fuente de inspiración para el modelado de este proyecto partiendo de ellos para un nuevo desarrollo.

Fase III: Valorar la capacidad de la turbina Darrieus-Savonius para sustentar la iluminación de los salones y áreas comunes en la planta física de Ingeniería Mecánica.

Descripción: Mediante una simulación simple en software CFD se observó si la turbina cumple con una velocidad suficiente para poder proveer energía bajo los efectos meteorológicos de la localidad.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS

En el análisis e interpretación de resultados se efectuó el desarrollo de las fases del proyecto presentadas en el capítulo anterior, luego se realizaron las interpretaciones de los datos obtenidos.

4.1. Estudiar los Parámetros que Intervienen en el Desarrollo de la Turbina para la Localidad Seleccionada

Para lograr un planteamiento representativo fue necesario conocer los parámetros y utilidad que pueden llegar a tener estos generadores bajo las condiciones ideales de operación. Así como también los factores que afectan su funcionamiento, primordialmente el viento que es la fuente energética del proyecto.

4.1.1. Velocidad del Viento en San Diego Edo. Carabobo

La velocidad del viento es registrada, monitoreada y estudiada por diversos medios de información meteorológica durante todo el año las 24 horas de cada día, existen portales en la web que puede proveer esta información de forma gratuita. Algunos portales ofrecen informaciones que tienen varianzas respecto a los resultados de otros, en la figura 13 se observa al gráfico de velocidades de Wheeler Spark:

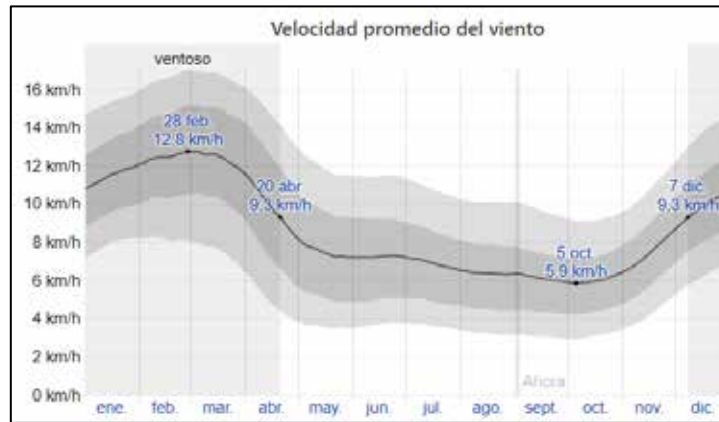


Figura 13. El promedio de la velocidad media del viento por hora (línea gris oscuro), con las bandas de percentil 25° a 75° y 10° a 90°.

Fuente: Wheater Spark

La grafica representada en la figura 13, de Wheater Spark indica que los meses más ventosos se encuentran entre enero y abril obteniendo para los días finales de febrero los vientos más altos con un promedio de 12,8 km/h y picos de 17,9 km/h para la localidad de San Diego Edo. Carabobo.

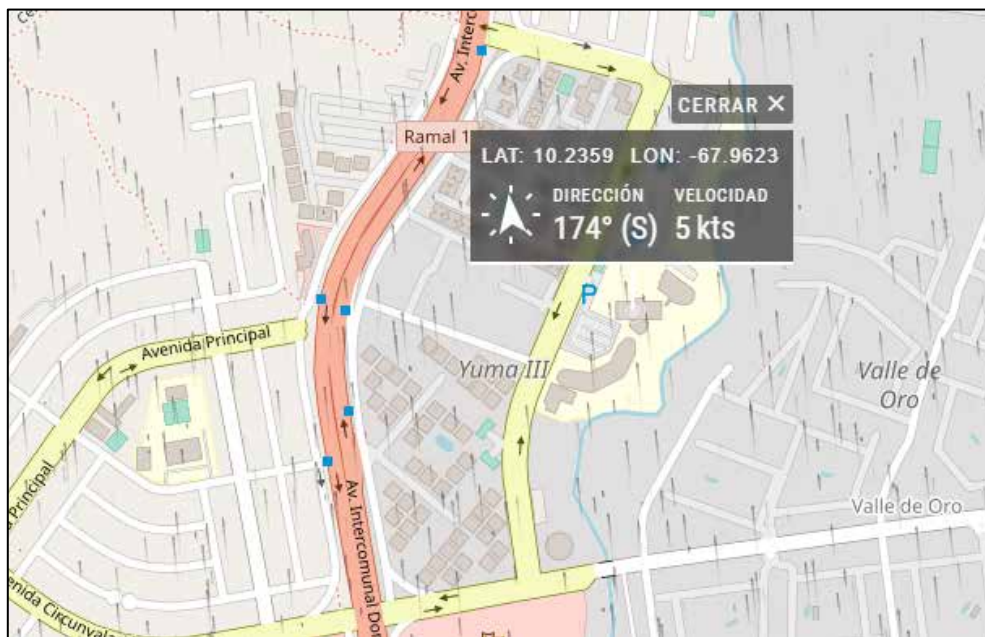


Figura 14. Velocidad del viento y dirección sobre la Universidad José Antonio Páez.

Fuente: Windfinder

La observación satelital permite un análisis en tiempo real de la meteorología para la ubicación seleccionada, el portal Windfinder permite observar de manera inmediata la velocidad del viento y dirección al momento de una consulta, tal cual como se observa en la figura 14, la información proporcionada por windfinder indica la velocidad promedio de cinco nudos lo que equivale a 9,25 Km/h. Sin embargo las bandas de variación que muestra WheatherSpark incluyen la variación que puede presentarse como en la figura 15.

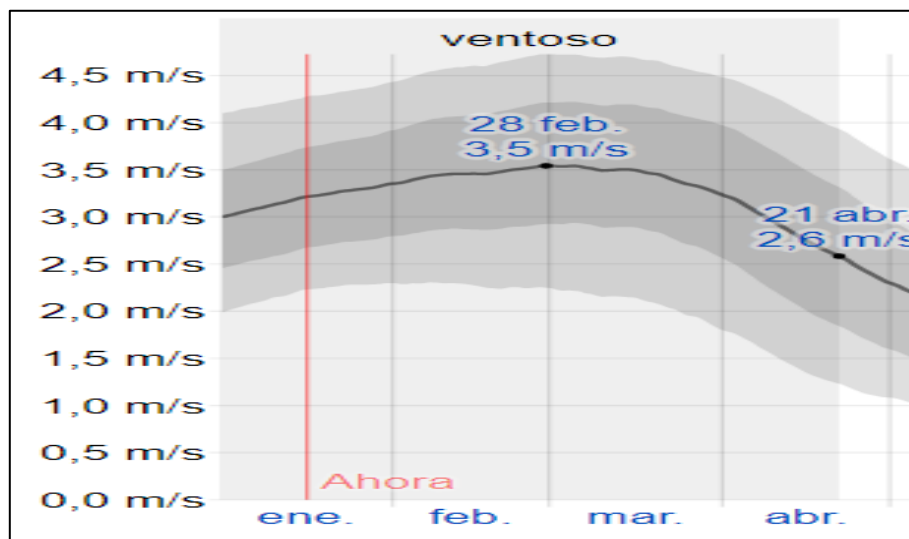


Figura 15. Velocidad del viento para la localidad de San Diego entre enero y abril.
Fuente: WheaterSpark

Sin embargo, para efectos prácticos, las velocidades promedio son recomendables para el estudio y efectos prácticos tomándose un promedio de 2,6 m/s para la zona según figura 13 y figura 15.

4.1.2. La Velocidad del Viento Según la Altitud

Se conoce que el viento más energético se encuentra a mayores alturas, este posee una menor densidad y mayor velocidad. Este incremento en su velocidad con respecto a la altura es de sumo interés para los estudios concernientes a la energía eólica, por ello, en la actualidad se buscan realizar turbinas cada vez más altas y colosales que puedan aprovechar esta energía cinética.

Para efectos de estudio de la energía eólica, los perfiles de velocidad del viento, que se consideraron, fueron los que se encontraron en el inferior de la capa límite atmosférica, esta es definida como capa atmosférica superficial, es aquí donde la velocidad del aire se acelera a medida que se incrementa la altura. Su rango de altura varía entre los 60 y 100 metros tomando como referencia el nivel del mar.

La velocidad del viento se ve afectada por la fricción que ejerce la tierra, bosques, zonas industriales, o algún objeto que impida su paso, mientras mayor rugosidad tenga el cuerpo en cuestión, mayor será la fricción y reducción en la velocidad. Este efecto recibe el nombre de no deslizamiento y produce un perfil de velocidad del viento.

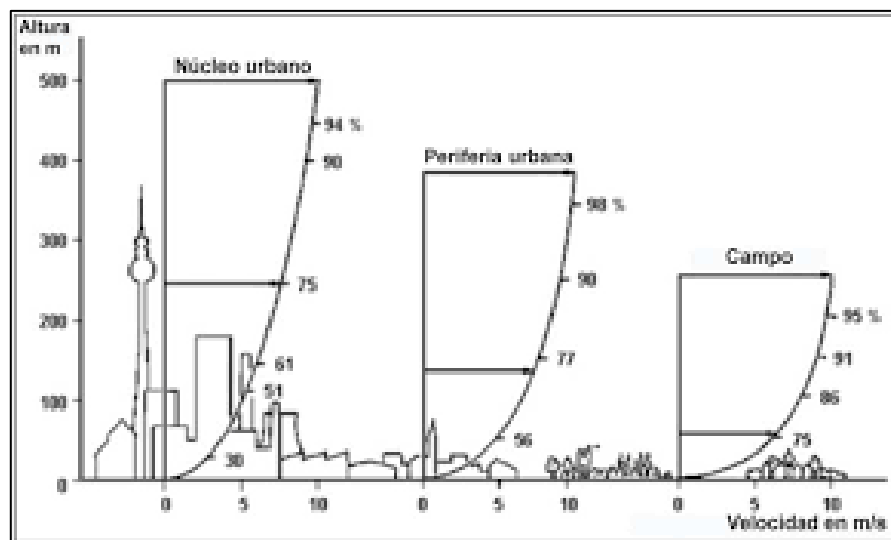


Figura 16. Gradiente de velocidad del viento según condiciones dadas.

Fuente: www.liebherr.com

Existen diferentes modelos teóricos para encontrar en un instante específico la velocidad del viento a una altura determinada, teniendo en cuenta datos como: altura inicial, velocidad a la altura inicial, rugosidad del lugar, altura deseada. Estos modelos se derivan en: Exponencial y Logarítmico, cada uno con una variante adicional.

4.1.3. Las Características Inmobiliarias

En muchos casos el diseño arquitectónico de las instalaciones puede ser limitante o potenciadores en lo que a la energía cinética del viento respecta, esto debido a que se pueden aprovechar ciertas estructuras como redireccionadores de viento u obstáculos para el mismo. Dado que este caso de estudio es una turbina eólica omnidireccional no se puede colocar en sitios donde al cambiar la dirección del viento sea bloqueada por un edificio, pared u obstáculo.

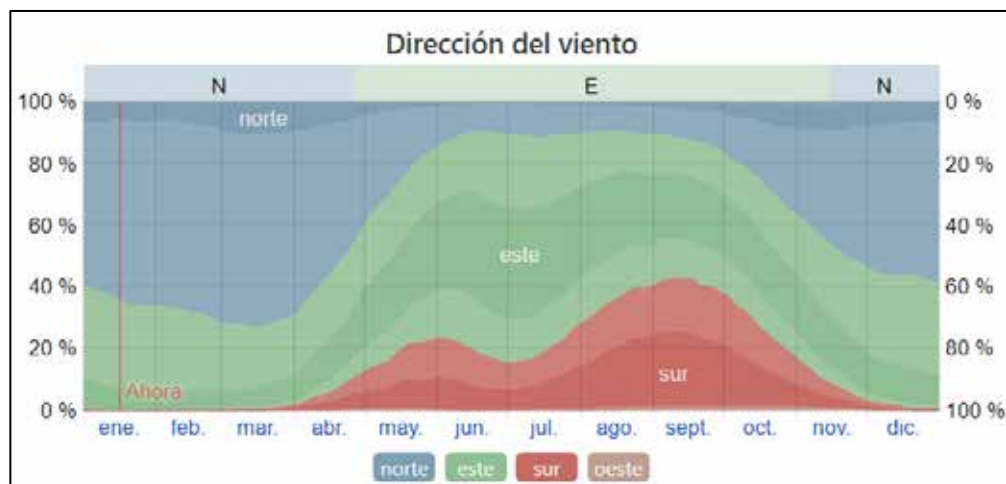


Figura 17. Direcciones del viento durante el año para San Diego Edo. Carabobo.

Fuente: WeatherSpark

El viento con más frecuencia viene del este durante 6,6 meses, del 26 de abril al 14 de noviembre, con un porcentaje máximo del 74 % el 1ero de julio. El viento con más frecuencia viene del norte durante 5,4 meses, del 14 de noviembre al 26 de abril, con un porcentaje máximo del 59 % en 1 de enero según la figura 17 y la fuente WeatherSpark.

Dado que el viento representa cambios de dirección durante los días y meses es necesario posicionar la ubicación de la turbina eólica donde las características permitan su aplicación omnidireccional aprovechando la energía durante cualquier momento, de la figura 18 se puede observar una vista aérea del edificio número cinco

que representa la escuela de ingeniería mecánica la cual es el objeto de suministro eléctrico, esto no implica que deba ser la posición de la turbina eólica.

El edificio número cinco, observado en la figura 18, representa una altura aproximada de siete metros, lo que su gradiente de velocidad no genera una variación importante con respecto al suelo, esto significa que el viento en este punto será afectado por árboles, casas u objetos. El edificio número cuatro es el edificio más alto que dispone la Universidad José Antonio Páez, también está bastante cercano al edificio número cinco de la Escuela de Ingeniería Mecánica UJAP, ambos están separados por un pasillo abierto pero a diferencia de edificio número 5, el edificio número 4 cuenta con aproximadamente 18 metros de altura, esta altura le da una ventaja sobre los edificios que tiene a su alrededor lo que significa que obtendrá una ventaja energética pues no hay factores de alteración del viento en su periferia. Entonces, se consideró que la turbina se diseñaría estudiando la velocidad sobre este edificio en el punto más cercano a la Escuela de Ingeniería Mecánica.



Figura 18. Imagen área de la planta física UJAP.

Fuente: www.dronval.com

4.1.4. La Velocidad Representativa en la Locación de la Turbina

El viento en una zona puede tener variaciones significativas según la zona donde se tome la medición dentro de un mismo límite geográfico, para intentar solventar esta incidencia se consideró los siguientes aspectos:

Que la velocidad del viento varía según la altura.

Las mediciones de los anemómetros se realizan a una altura de 10 metros.

Es importante conocer a que altura se encuentra el bien afectado en relación al anemómetro del que se ha tomado la velocidad.

Rugosidad del terreno.

La Ley Exponencial de Hellmann corrige la velocidad del viento en función de los puntos antes indicados.

$$V_h = V_{10} (h / 10)^a$$

Dónde:

V_h = velocidad del viento a la altura que interesa

v_{10} = velocidad del viento medida a 10 m. de altura sobre el terreno

h = altura del riesgo considerado

a = exponente de Hellmann que varía según la rugosidad del terreno

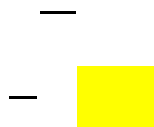
Entonces para una zona de periferia de ciudad en llanura se tiene que el coeficiente es de 0,24 y se procede:

V_h para 18 metros de altura.

$V_{10} = 2,6$ m/s según figura 13 y figura 15.

$h = 18$ mts

$a = 0,23$



4.1.5. Potencia efectiva del viento en la localidad

La potencia efectiva se calculó tomando la velocidad del viento promedio para los puntos promedios de cada mes y se sustituyó en la ecuación 8:

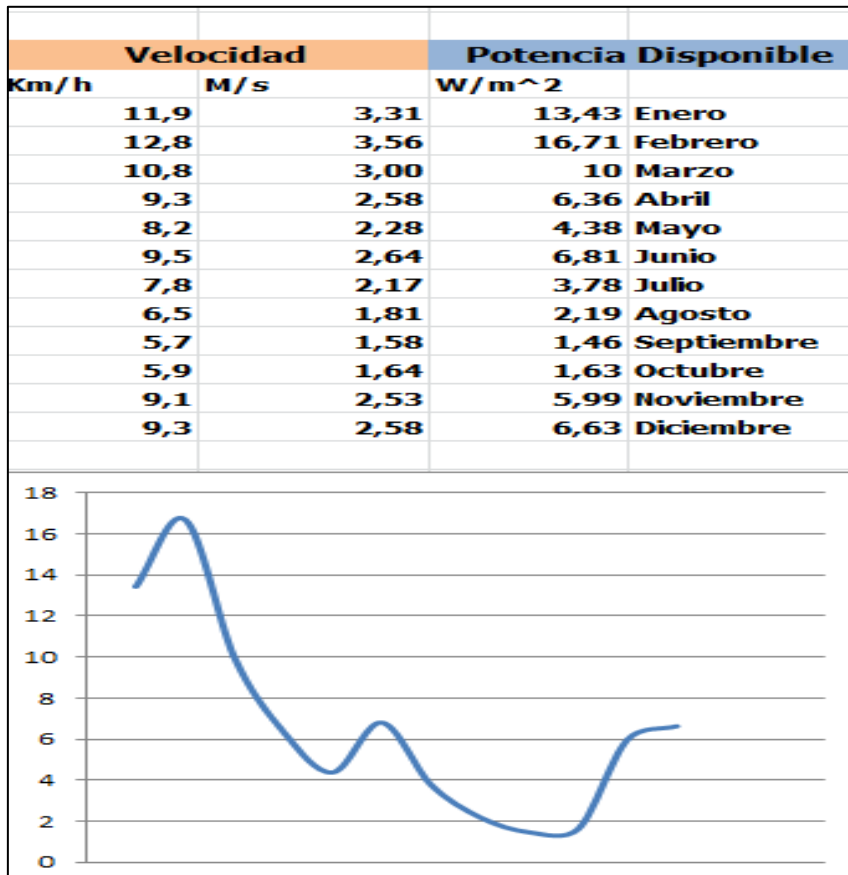
— —

Ec. 21

Cuál es la variación del límite de Betz para la ecuación 8.

Dando, por tanto, el total de energía para cada mes en . Se consideró la densidad del aire a 25 °C como 1,25 — ya que la temperatura promedio anual en San Diego tiene un máximo de 31 °C y un mínimo de 19,6 °C, lo que arroja un promedio de 25,3 °C. A partir de todos estos datos resulta la tabla 1:

Tabla 1. Potencia disponible para un día promedio de cada mes en San Diego Edo. Carabobo.



Fuente: Ramírez (2021)

Se menciona que se tendrá a lo largo del día una incidencia de velocidad más elevada para la media de 3m/s, no obstante, no se menciona presencia de variación importante en horas diurnas vs horas nocturnas.

4.1.6. Consumo eléctrico del sistema de iluminación de la planta física ingeniería mecánica

La planta física de Ingeniería Mecánica, UJAP es una instalación relativamente pequeña que cuenta con dos pasillos principales y 11 salones o aulas de enseñanza, así como también con cuatro oficinas. Considerando, que un salón promedio cuenta

con los siguientes artefactos eléctricos y electrónicos: aires acondicionados, bombillos, ventiladores, computadoras. Para un uso moderado, con una duración específica para cada uno se tiene la tabla 2:

Tabla 2. Equipos y artefactos usados comúnmente en una residencia y su consumo típico en vatios.

Equipo eléctrico/artefacto	Consumo (W)	Equipo eléctrico/artefacto	Consumo (W)
A. A. Central (2,5 Ton)	2800	Humedecedor	40
A. A. Central 2 Ton)	1900	Impresora <i>deskjet</i>	20
A. A. Central 3 Ton)	2922	Impresora láser	400
A. A. Central 5 Ton	4900	Lámpara de noche (fluorescente)	20
A. A. tipo <i>split</i> 12.000 BTU/h	1060	Lavadora automática	500
A. A. tipo <i>split</i> 15.000 BTU/h	1500	Lavadora manual	300
A. A. tipo <i>split</i> 18.000 BTU/h	1730	Lavaplatos	1200 - 1500
A. A. tipo <i>split</i> 24.000 BTU/h	2310	Licuadora	300
A. A. tipo <i>split</i> 36.000 BTU/h	2660	Máquina de afeitar	20
A. A. tipo <i>split</i> 9.000 BTU/h	820	Máquina de coser	100
A. A. ventana 12.000 BTU/h	1260	Microondas	600 - 1500
A. A. ventana 15.000 BTU/h	1410	Monitor 17 pulgadas	80
A. A. ventana 18.000 BTU/h	1840	Olla arrocera	1000
A. A. ventana 24.000 BTU/h	2300	Plancha	1000
A. A. ventana 9.000 BTU/h	800	Procesador de alimentos	360
Abridor de latas	120	Pulidora de pisos	300
Aspiradora	650	Radio	20 - 70
Batidora	200	Refrigerador	400
Bomba de agua 1.5 HP	1120	Reproductor de CD	35
Bomba de agua 1/3 HP	250	Sandwichera	650
Cafetera	800	Sartén eléctrica	1300
Calentador de agua	3000	Secador de pelo	1875
Calentador de teteros	350	Secadora de ropa (120 V)	1600
Cocina (4 hornillas)	8000	Secadora de ropa (220 V)	5000
Cocina (horno + 4 hornillas)	11000	Taladro 1 pulg.	1000
Computadora	60 - 250	Taladro 1/2 pulg.	750
Congelador 14 pies cúbicos	350	Taladro 1/4 pulg.	250
Cortador de alimentos	360	Televisor 19 pulgadas	200
Cuchillo	90	Televisor 25 pulgadas	250
Deshumedecedor portátil	36	Tostadora de pan	800 - 1500
Ducha eléctrica	3500	Tostiarepa	1200
DVD	20	Triturador de desperdicios	1500
Equipo de sonido	100	VCR	40
Esterilizador de teteros	500	Ventilador de techo	10 - 50
Horno grande	4.000 - 8000	Ventilador portátil de mesa	10 - 25

Fuente: Instalaciones eléctricas residenciales (2016).

Dado que los salones de la planta física pueden albergar un máximo de 20 estudiantes se entiende que mínimo deben existir cuatro lámparas ahorradoras y dos por cada oficina administrativa o académica, sumándole 8 por cada pasillo lo que incluye escalera y los dos baños presentes en la planta se tiene que por iluminación existen:

Para un total de 68 lámparas, asumiendo que se utilicen lámparas tecnología led (de mayor eficiencia y mayores lúmenes que sus predecesoras) será necesario calcular el consumo real del circuito con el efecto práctico de desprestigiar el consumo o pérdidas en ramales, suiches u otros elementos. El catálogo de paneles led de Cutler Hammer de Venezuela será utilizado como referencia (Ver anexo E) dado que cumple con los estándares europeos de lámparas y luminarias y también se integra a las normas COVENIN 200:2009.

Es importante saber que el consumo real de una lámpara o luminaria difiere de la potencia que identifica el artefacto, en el caso de las lámparas led se puede identificar que vienen señaladas con un factor de potencia característico del fabricante, esto dado que las lámparas led manejan un dispositivo llamado Driver que transforma y suministra el voltaje a cada diodo consumiendo energía durante la operación. Se seleccionaron lámparas de 8 pulgadas a 15w y 1200 lúmenes, el fabricante tomado como referencia maneja un factor de 0,85 a 120 voltios, entonces:

Esto representa un aumento del 17 % sobre la potencia nominal, es característico que las lámparas led consuman entre 10 % y 20 % más, dependiendo de la eficiencia de su driver.

Entonces el circuito de 68 lámparas consumiría una potencia de:

De consumo en el amplio de la iluminación de la sede física de ingeniería mecánica UJAP.

4.2. Modelamiento de una turbina Darrieus-Savonius usando herramientas digitales de última generación para mejor precisión del diseño.

Las herramientas computacionales han permitido un gran avance en la ingeniería del diseño, sus amplias características para diseñar y obtener resultados

precisos ha representado una evolución, donde la practicidad permite que profesionales y amateurs del área puedan introducirse fácilmente en el diseño CAD computacional.

El proceso de modelado se realizó aplicando el software SolidWorks que tiene la gran ventaja de ser un software de diseño paramétrico modular, más fácil de usar que sus competencias. Esto según usuarios avanzados de los distintos softwares CAD, haciendo hincapié a su interfaz altamente intuitiva. Lo que significa que el usuario puede editar fácilmente el diseño en cualquier etapa del proceso. SolidWorks también se define como una herramienta de software CAD 3D muy productiva, con sus herramientas analíticas integradas y automatización de diseño para ayudar a estimular el comportamiento físico como cinemática, dinámica, estrés, deflexión, vibración, temperaturas o flujo de fluidos para adaptarse a todo tipo de diseño.

4.2.1. Parámetros iniciales del diseño

El diseño requiere cumplir con las especificaciones que puedan cumplir con la exigencia estimada de 1,19 kW o superior a esta magnitud determinando pérdidas del sistema, pero al mismo también debe cumplir con un diseño viable en todos los parámetros que están implícitos en realizar un diseño exitoso.

Un aerogenerador moderno puede tener hasta 90 metros de diámetro, lo que se traduce en una manufactura bastante elaborada con materiales costosos que puedan relacionar, de manera idónea, el peso del diseño con el costo de fabricación, también, logran tener hasta 100 metros de altura de torre para tener un mejor aprovechamiento de la energía eólica. Para este proyecto se buscó satisfacer la necesidad de la iluminación básica de la sede de Ingeniería Mecánica de la Universidad José Antonio Páez por lo que se tomó en cuenta que:

Para el análisis se estimó consideró
para ello las pérdidas de energía, que se producen en los descansos, acoplamientos y el sistema de transmisión (multiplicador), producidas por el contacto entre los elementos (roce). El rendimiento aerodinámico máximo (C_{pmax}) de un rotor Darrieus está entre 30%-45%; tal para una relación de velocidad TSR de 6 (ver figura

11 y anexo A). La turbina eólica se diseña para que entregue una potencia máxima generada útil = 1,19 kW. Reemplazando valores se obtiene:

$$0.9) = 1,32 \text{ kW}$$

4.2.2. Rotor bajo arrastre

Cengel (2004) señala que, para diseñar un rotor bajo arrastre, es necesario calcular el coeficiente de potencia del cuerpo sometido al arrastre, es decir el coeficiente del rotor Savonius. Para esta operación se requiere principalmente del número de Reynolds (Ver ecuación 21). Recordando que la longitud L de la ecuación de Reynolds viene a ser el espesor e de la placa y usando los coeficientes de arrastre para un cuerpo rectangular de la tabla 11-1 de Çengel (ver figura 19), donde no se toma en cuenta la longitud en Z (perpendicular a la Hoja), solo las relaciones e/A.

TABLA 11-1
 Coeficientes de arrastre C_D de varios cuerpos bidimensionales para $Re > 10^4$ con base en el área frontal $A = bD$, donde b es la longitud en la dirección normal a la página (para uso en la relación de fuerza de arrastre $F_D = C_D A \rho V^2 / 2$ donde V es la velocidad corriente arriba)













<p>Barra cuadrada</p>  <p>Esquinas agudas: $C_D = 2.2$</p>  <p>Esquinas redondeadas ($r/D = 0.2$): $C_D = 1.2$</p>	<p>Barra rectangular</p>  <p>Esquinas agudas:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>L/D</th> <th>C_D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.0*</td><td>1.9</td></tr> <tr><td>0.1</td><td>1.9</td></tr> <tr><td>0.5</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>1.0</td><td>2.2</td></tr> <tr><td>2.0</td><td>1.7</td></tr> <tr><td>3.0</td><td>1.3</td></tr> </tbody> </table> <p>* Corresponde a placa delgada</p>  <p>Borde frontal redondeado:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>L/D</th> <th>C_D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.5</td><td>1.2</td></tr> <tr><td>1.0</td><td>0.9</td></tr> <tr><td>2.0</td><td>0.7</td></tr> <tr><td>4.0</td><td>0.7</td></tr> </tbody> </table>	L/D	C_D	0.0*	1.9	0.1	1.9	0.5	2.5	1.0	2.2	2.0	1.7	3.0	1.3	L/D	C_D	0.5	1.2	1.0	0.9	2.0	0.7	4.0	0.7
L/D	C_D																								
0.0*	1.9																								
0.1	1.9																								
0.5	2.5																								
1.0	2.2																								
2.0	1.7																								
3.0	1.3																								
L/D	C_D																								
0.5	1.2																								
1.0	0.9																								
2.0	0.7																								
4.0	0.7																								
<p>Barra circular (cilindro)</p>  <p>Laminar: $C_D = 1.2$ Turbulento: $C_D = 0.3$</p>	<p>Barra elíptica</p>  <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">L/D</th> <th colspan="2">C_D</th> </tr> <tr> <th>Laminar</th> <th>Turbulento</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>2</td><td>0.60</td><td>0.20</td></tr> <tr><td>4</td><td>0.35</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>8</td><td>0.25</td><td>0.10</td></tr> </tbody> </table>	L/D	C_D		Laminar	Turbulento	2	0.60	0.20	4	0.35	0.15	8	0.25	0.10										
L/D	C_D																								
	Laminar	Turbulento																							
2	0.60	0.20																							
4	0.35	0.15																							
8	0.25	0.10																							
<p>Barra triangular equilátera</p>  <p>$C_D = 1.5$</p>  <p>$C_D = 2.0$</p>	<p>Cascarón semicircular</p>  <p>$C_D = 2.3$</p>  <p>$C_D = 1.2$</p>	<p>Barra semicircular</p>  <p>$C_D = 1.2$</p>  <p>$C_D = 1.7$</p>																							

Figura 19. Coeficientes de arrastre C_D de varios cuerpos bidimensionales

Fuente: Mecánica de Fluidos, Cengel

Para Reynolds el flujo laminar cambia a turbulento relacionando, directamente, la geometría de la superficie que rodea el flujo, la rugosidad, la velocidad del flujo y la viscosidad del fluido, por lo que expone:

$$\text{Ec. 21}$$

Donde V_f , L , ρ , μ , indican la velocidad del fluido, la longitud de la superficie por donde pasa el fluido, la densidad del fluido y su viscosidad respectivamente. ingenierilmente se dice que $Re < 5 \cdot 10^5$, laminar.

La relación que ofrece mayor arrastre es dada donde $C_d=2.5$ según la literatura de la figura 19. Entonces, tomando condiciones meteorológicas estándar a 25 °C con 1,25 Kg/m³ de densidad para el aire y 1,825 · 10⁻⁵ Kg / (m*s) de viscosidad para una 1 atm, se toma pues aire normal/perpendicular al cuerpo. Se usó 3 m/s como media de velocidad para calcular:

$$\text{Ec. 21} = 1,02 \cdot 10^5 \text{ (Flujo Laminar)}$$

El valor obtenido se encuentra en un rango de flujo Laminar, al igual que los coeficientes sugeridos por Çengel. Valores que se encuentra en la zona de transición (Turbulentos), son diseños basados en relaciones que deben evitarse, añadiendo también el poco coeficiente de arrastre ofrecido.

Se estima ahora el máximo coeficiente de potencia para las relaciones máximas anteriores para un cuerpo rectangular partiendo de la ecuación 15.

$$\text{Ec. 22}$$

Por definición se sabe que $C_p=P/w$, entonces:

$$\text{Ec. 22}$$

Sustituyendo F_s y despajando...

$$\text{Ec. 23}$$

Tomando V_s como la diferencia de velocidad inicial y final y el área frontal como un ancho por altura, tendremos que:

Ec.24

Eliminando semejanzas y dejando la ecuación en función de la velocidad:

— —

Ec. 25

Ahora calculando para la amplitud se tiene a continuación la tabla 3, en la página siguiente:

Tabla 3. CPd para valores del 1 al 0.

0	1
0,02250	0,9
0,08000	0,8
0,15750	0,7
0,24000	0,6
0,31250	0,5
0,36000	0,4
0,36750	0,3
0,32000	0,2
0,20250	0,1
0,00000	0

Fuente: Ramírez (2020)

En la tabla 3 se observa que el valor mayor se encuentra entre $0,3 < V_2/V_1 < 0,2$ entonces:

Tabla 4. CPd para valores del 0,4 al 0,3.

0,36000	0,4
0,36280	0,39
0,36518	0,38
0,36864	0,36
0,36969	0,35

0,37026	0,34
0,37034	0,33
0,36992	0,32
0,36898	0,31
0,36750	0,3

Fuente: Ramírez (2020)

El coeficiente de potencia máximo, en un cuerpo rectangular con máximo arrastre, viene a ser de $CP_d=0,37$, esto cuando $V_2/V_1 = 0,33$. Si se tiene un rotor con dos palas de este tipo, el viento provocaría en ambas un empuje tal que podría evitar su giro, o en el mejor de los casos, reduciría su rendimiento.

El coeficiente de potencia teórica máxima para este tipo de rotor viene a ser según ecuación 25:

$$= 0,163$$

La potencia generada por un rotor eólico está dada por la siguiente ecuación:

-

Ec. 26

La potencia teórica por área para el rotor cóncavo-convexo estaría definida entonces por:

-

O tomando las velocidades superiores al promedio de 3 m/s como ejemplo 4,76 m/s obtendríamos un $P/A = 10,97 \text{ watts/m}^2$.

Comúnmente, los rotores Savonius vienen con múltiples palas, esto no necesariamente es un beneficio en su rendimiento, si bien se presenta más superficie de contacto con el flujo, es causante de pérdidas asociadas a vórtices generados por el choque entre un flujo de entrada y un flujo de retorno. Esto se debe a que el aire circundante en la zona cóncava, al llegar al eje de giro, termina cambiando su dirección de forma errática, hasta que choca con el aire de entrada nuevamente generando torbellinos.

4.2.3. Selección del rotor Savonius

Existen variaciones para la forma de un rotor Savonius, entre éstos se pueden encontrar desde dos hasta seis aspas y también están los modificados, los cuales tienen los semicírculos desfasados en el centro.

Los parámetros usados requirieron que el diseño se orientara a generar 1,32 kW, sin embargo son muchas las variables que deben ser estudiadas y ensayadas para lograr que se mantenga la mejor relación potencia/tamaño ya que la energía extraíble se relaciona directamente con el área de barrido y el aprovechamiento de esta área por la máquina.

Si se busca dimensionar un rotor de un metro de altura para que cumpla con el requerimiento necesario de 1,13 kW de potencia nominal se aplica entonces:

-

Ec. 26

$$D = 33,5 \text{ metros}$$

Lo que significa que estaría sobredimensionado, es por esta razón que las centrales de generación eólica requieren de numerosas cantidades de aerogeneradores en lo que se conoce como un parque eólico para lograr generar gran cantidad de energía.

Debido a la alta eficiencia que demostraron las geometrías relacionadas con $L/D=0,5$ como se observó anteriormente en la figura 19, se seleccionó un rotor Savonius donde las cotas iniciales sean $L=0,3\text{m}$ y $D=0,6\text{m}$ debido a que este rotor debe mantenerse al margen de un 15-20 % del tamaño rotor Darrieus para no causar carga de arrastre cuando el generador entre en fuerza de sustentación, se partió de un diseño dada esta esbeltez de 0,5 que genero un prototipo de estudio.

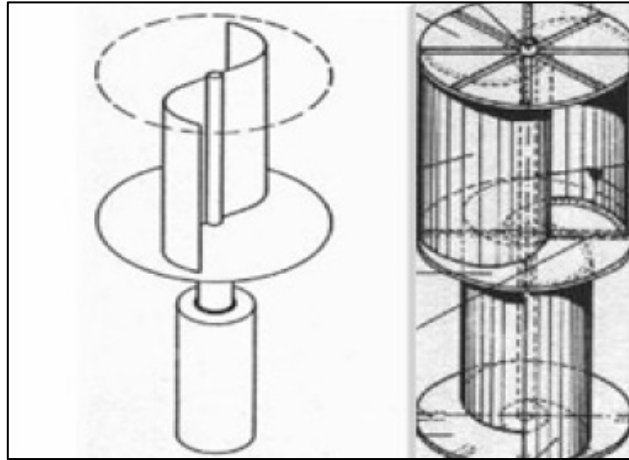


Figura 20. Rotor Savonius de doble S.

Fuente: Hybrid Configuration of Darrieus and Savonius Rotors for Stand-Alone Wind Turbine-Generator Systems.

La figura 20 es un indicativo para el área ideal de arrastre que debe tener un rotor Savonius para un aplicación de bajo requerimiento, ya que los diseños de mayor barrido se traducen en piezas más grandes, mayor peso del conjunto y exigencias más altas a las 3 m/s con las que se realiza el diseño. El número de palas viene directamente relacionado con el TSR del rotor que define la eficiencia que puede tener el rotor según sus distintas configuraciones como se muestra en la figura 21, los rotores Savonius inicialmente se configuraban en dos palas o alabes y se aplicaban varios rotores del mismo tipo desfasados uno sobre otro en un mismo eje, pero actualmente se pueden conseguir una cantidad amplia donde el rotor con 5 – 6 alabes muestra una eficiencia ideal en las configuraciones sencillas donde no existen difusores de viento.

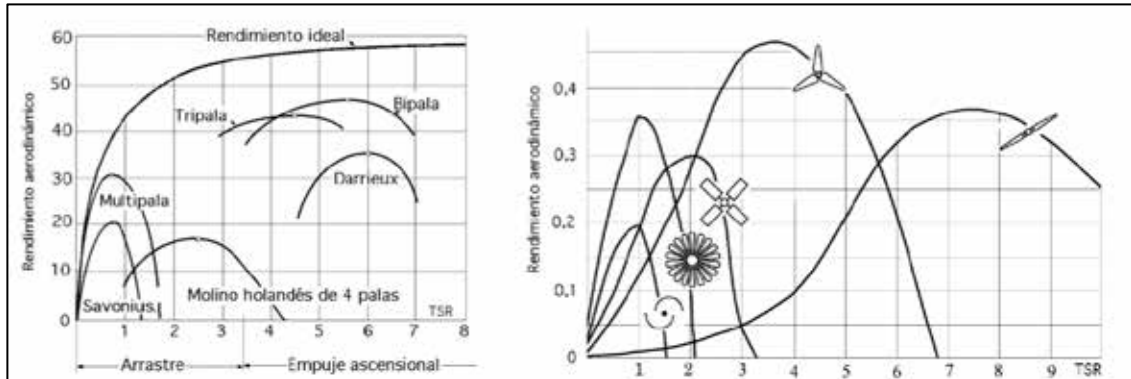


Figura 21. TSR vs Rendimiento aerodinámico.

Fuente: Parque Tecnológico Itaipú, “Potencial Energético Solar y Eólico”

Debido a las velocidades encontradas en el sector geográfico de estudio se partió el diseño del generador híbrido a partir de su turbina Savonius que requiere menor velocidad del viento para partida a la rotación, rompiendo con la inercia del conjunto, esto debido a la fuerza de arrastre que ejerce el viento sobre sus alabes. El rotor Savonius de seis palas es uno de los modelos más usados para aplicaciones como las requeridas en el proyecto dado que tiene un mayor área de impacto para arrastre, por esto se experimentó su uso tomando las dimensiones previamente estudiadas por la comprobación de mayor arrastre en la relación geométrica de $L/D=0,5$ de modo que se obtuvo el modelo de la figura 22 y 23:

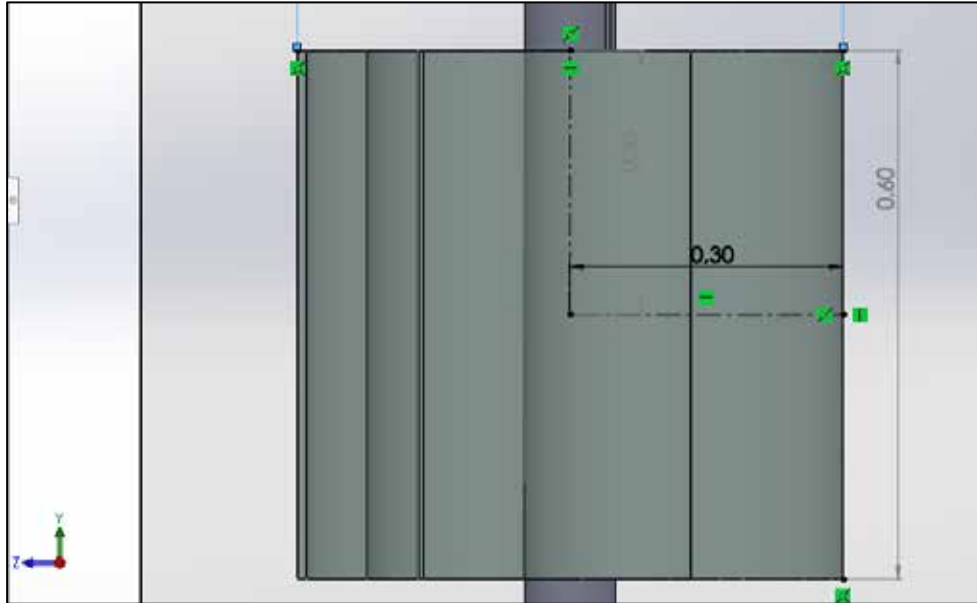


Figura 22. Dimensiones experimentales del rotor Savonius.
Fuente: Ramírez (2021)

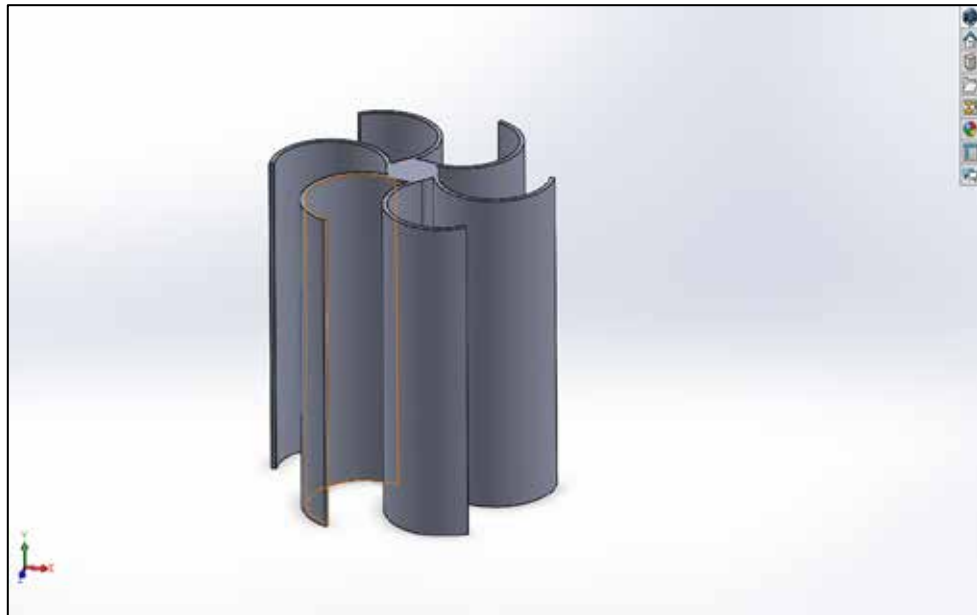


Figura 23. Vista isométrica del rotor Savonius.
Fuente: Ramírez (2021)

Se realizó una simulación de fluido para el rotor de la figura 23 para esto se le añadió su eje y una base que permita una rotación simple en el estudio de movimiento computacional. Según el análisis computacional realizado en Flow Simulation de SolidWorks 2020 se obtuvo los resultados del comportamiento vectorial para aire circulando en el eje X a 3 m/s sobre los alabes del rotor tal cual como se muestra en los gráficos 1 y 2.

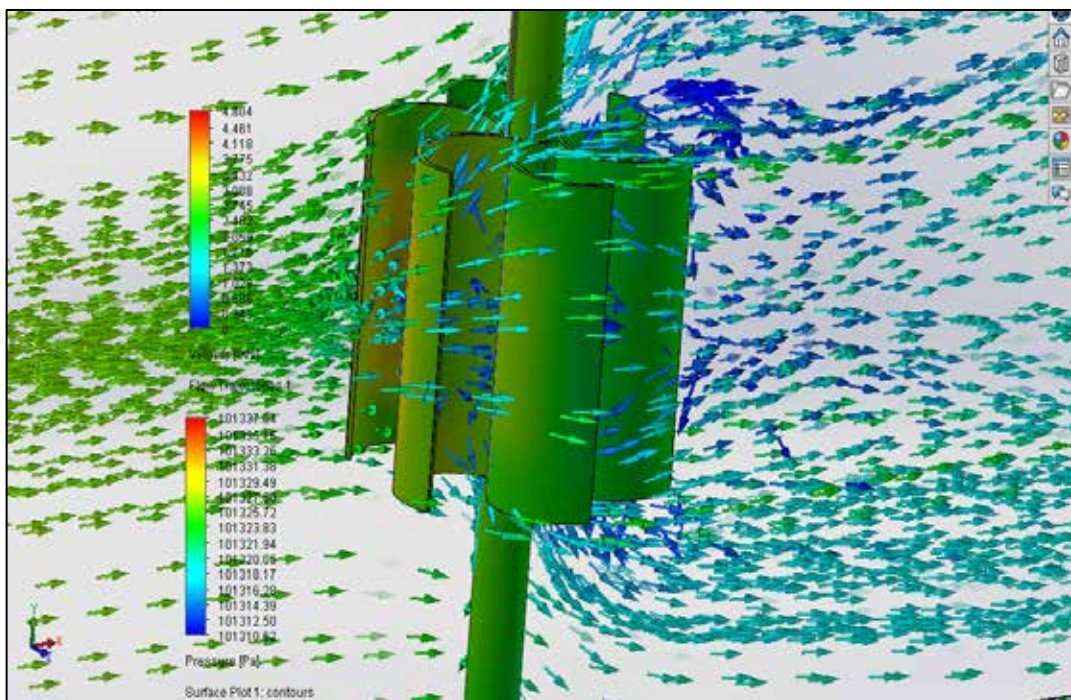


Gráfico 1. Simulación vectorial del viento impactando a 3 m/s en el eje x, con eje y como eje de rotación.

Fuente: Ramírez (2021)

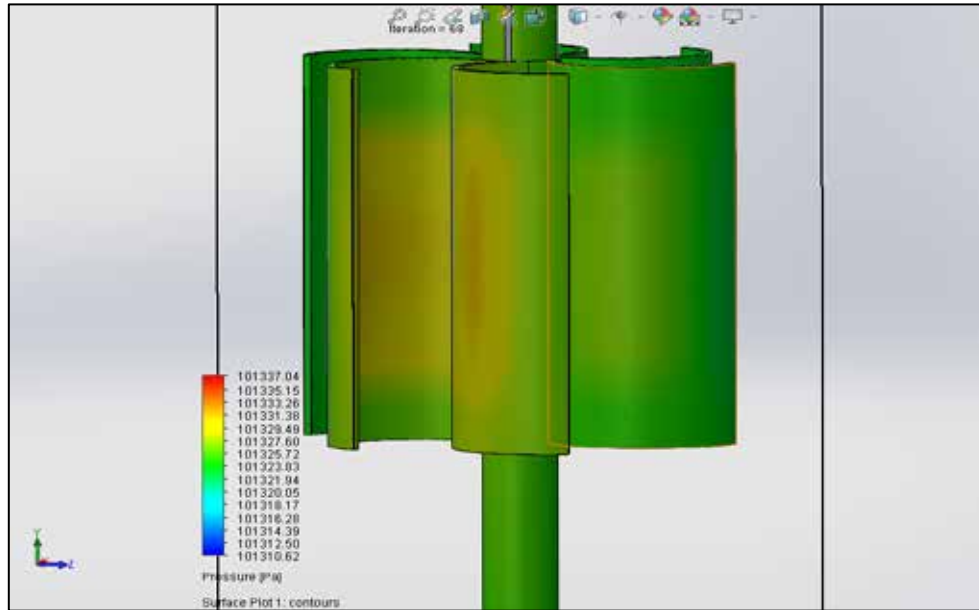


Gráfico 2. Zonas de mayor presión sobre los alabes a 3m/s.
Fuente: Ramírez (2021)

En los gráficos 3 y 4 se observan los resultados del flujo de aire desde una vista superior donde se puede apreciar que existen torbellinos generando turbulencia sobre el rotor, tanto en las entradas como en las salidas.

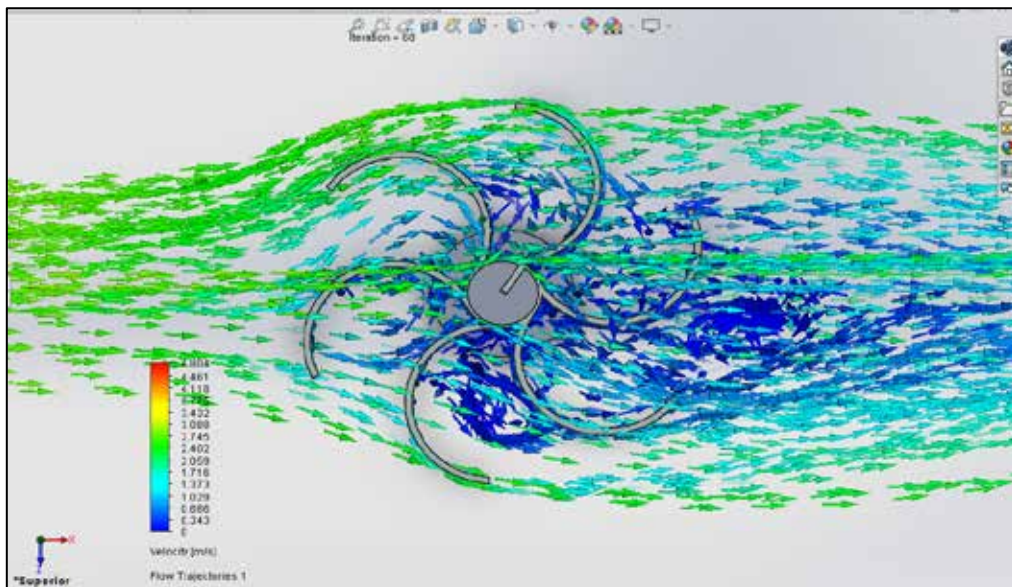


Gráfico 3. Campo vectorial de la velocidad desde el eje superior.
Fuente: Ramírez (2021)

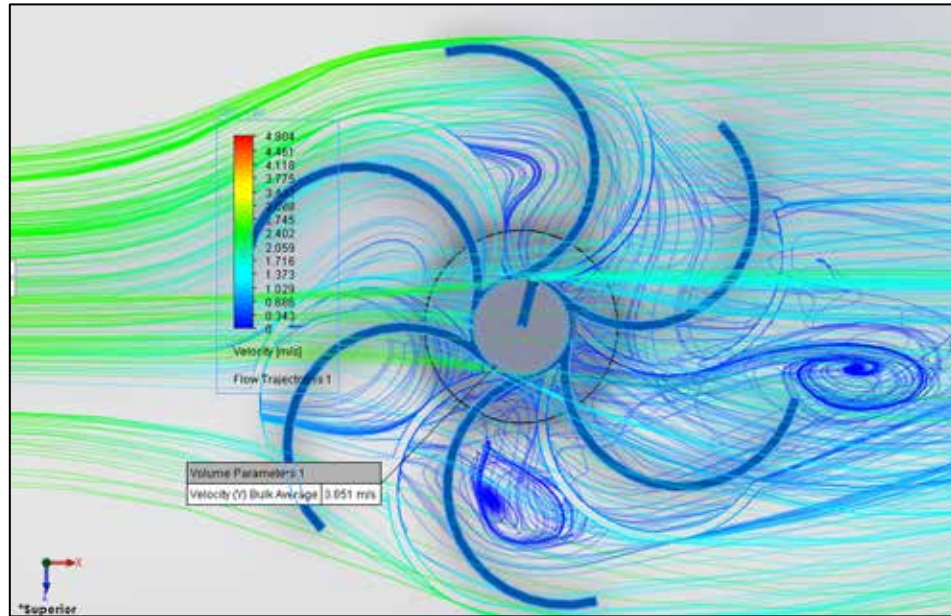


Gráfico 4. Campo vectorial con líneas desde el eje Y.
Fuente: Ramírez (2021)

Tabla 5. Resultados de la simulación 1 a 3 m/s.

Variable	Magnitud	Resultado
Velocidad Promedio eje X	m/s	2,72
Fuerza eje X	N	22,59

Fuente: Ramírez (2021)

Según el gráfico 4 donde se observa claramente que existe mucha vorticidad generada dentro del rotor, como mencionamos anteriormente la vorticidad constituye un contraflujo turbulento que genera par negativo sobre el rotor, los torbellinos observados son una fuente de pérdida por recirculación del flujo, la fuerza asociada al movimiento del flujo de retorno se opone al movimiento rotacional de este, esto se traduce en pérdida de velocidad angular.

Recordando que estos torbellinos se forman por el choque de las líneas de flujo entre la zona cóncava y convexa. Adicionalmente, al existir torbellinos, instantáneamente ocurren cambios en el número de Reynolds del flujo, variando por completo el propósito del diseño basado en un flujo laminar.

Para evitar esto, es necesario realizar un cambio en las paletas del rotor Savonius. Eliminando esta área próxima donde convergen ambas palas indicada en la figura 24. La completa concavidad no es necesaria para provocar un mejor arrastre, sin embargo la convexidad es necesaria para evitar el par negativo, por ello se modifican las palas de tal forma que se conserve esta convexidad pero su concavidad llegue hasta un medio de circunferencia, y el resto del radio sea una sección plana. Es decir:

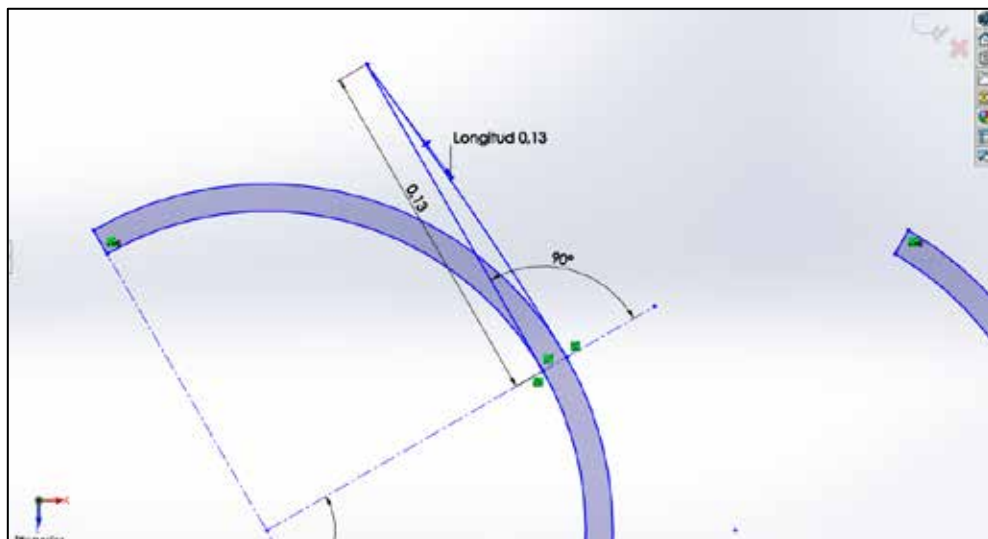


Figura 24. Bosquejo de la modificación.
Fuente: Ramírez (2021)

En el gráfico 5 se realizaron las modificaciones sobre el rotor y se aplicó nuevamente una simulación de diseño, se puede observar que la presión en el fluido ha disminuido y en ciertas zonas donde se apreciaban torbellinos ya no se encuentran esto debido a que la sección recortada de cada alabe permite un flujo del interior hacia el exterior.

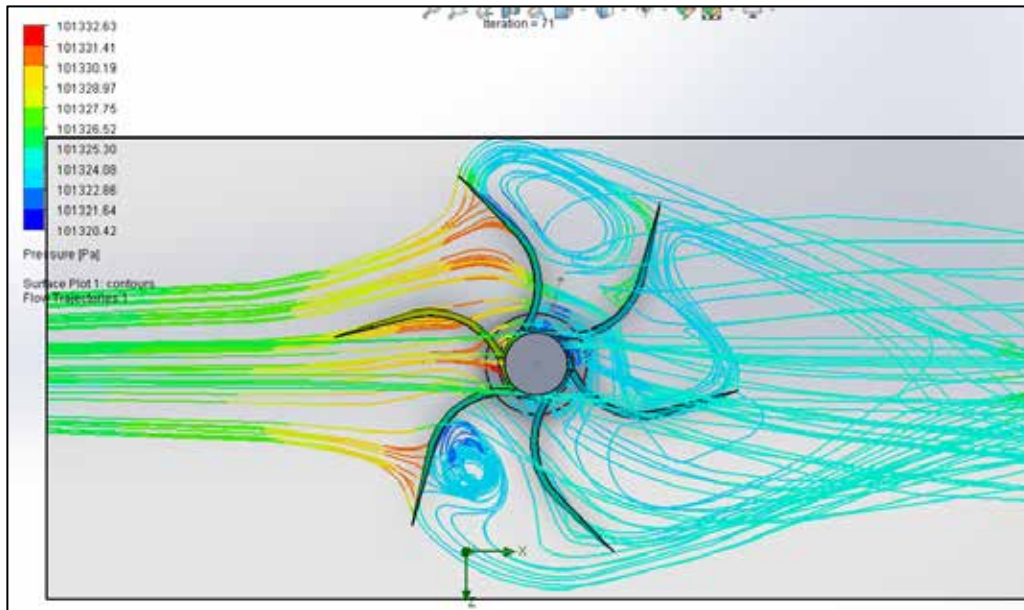


Gráfico 5. Simulación del perfil mejorado.

Fuente: Ramírez (2021)

En el perfil mejorado se observó que existían ciertas áreas del contorno que pudieran someterse a mejora los rincones internos representan zonas de presión y flujo turbulento así también se buscó mantener la curvatura externa totalmente céntrica a un solo punto de modo que el diseño se mejoró realizando redondeos y contornos suaves (ver gráfico 6).

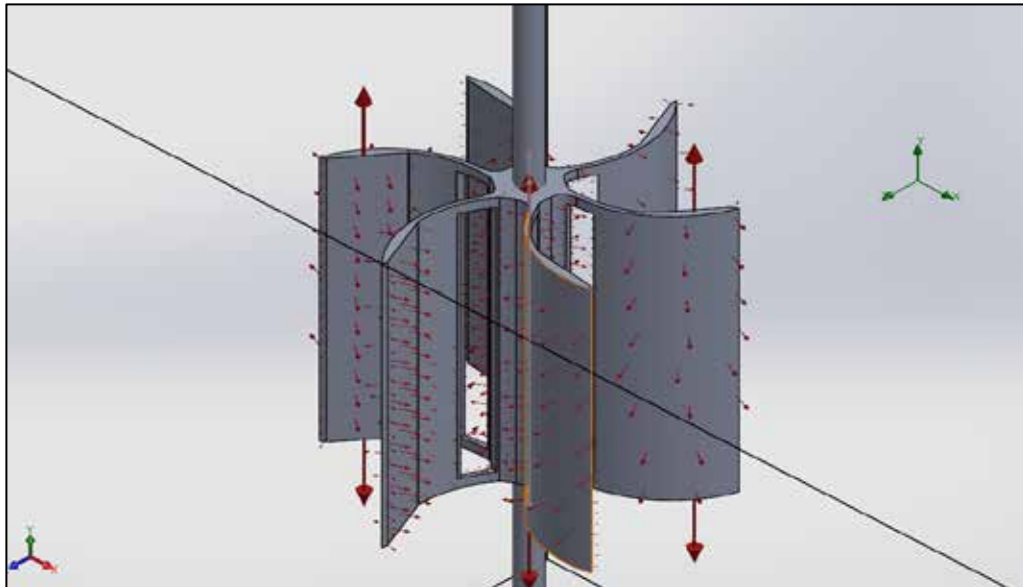


Gráfico 6. Isométrica del rotor con perfil suavizado con las condiciones de perímetro.
Fuente: Ramírez (2021)

Una vez seleccionado los parámetros de simulación se dio interacción al rotor del gráfico 6 generándose una corriente mejorada con relación a los diseños mejorados en el gráfico 7 se puede observar que existe una presencia bastante baja de zonas con torbellinos lo que supone una mejora en la rotación debido a la reducción del par negativo.

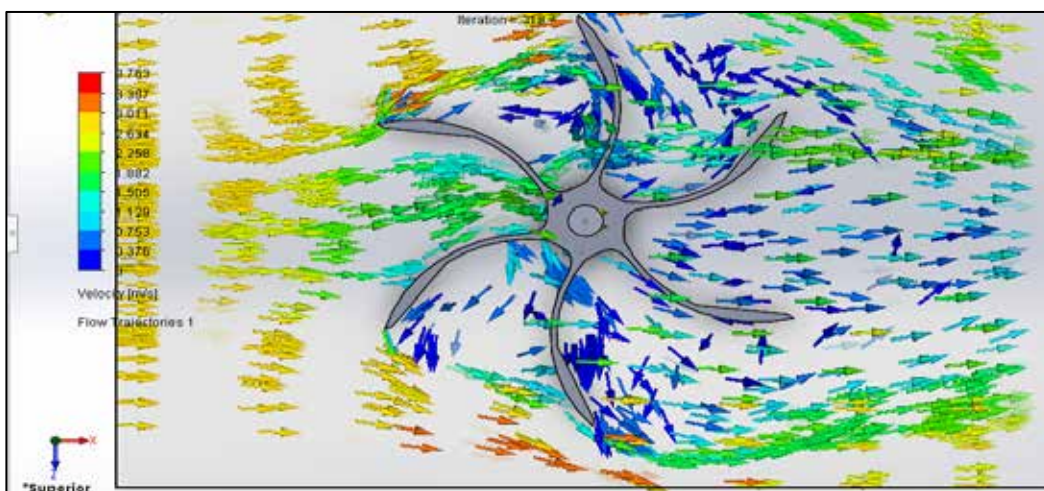


Gráfico 7. Simulación vectorial del campo velocidad a 3 m/s sobre rotor mejorado.
Fuente: Ramírez (2021)

Tabla 6. Resultados de la simulación del rotor mejorado a 3 m/s.

Variable	Magnitud	Resultado
Velocidad Promedio eje X	m/s	2.1
Fuerza eje X	N	20,53

Fuente: Ramírez (2021)

Existe una reducción en la fuerza de arrastre que parece que no es tan considerable según los resultados de la tabla 6 y la tabla 5 respectivamente, si a este cambio lo reflejamos en la similitud que existe entre ambos rotores en su diseño, con la ventaja que presenta el segundo diseño en eliminar los vórtices dentro del rotor, añadiendo además la reducción en el peso del mismo rotor por el área eliminada. Se tiene un gradiente de presión más uniforme y concentrado únicamente en las zonas planas de las palas. Considerando el efecto de su lado convexo, es posible que se genere un efecto de sustentación. Por lo tanto, esta modificación es necesaria y justificable.

La eficiencia ideal de este tipo de rotor puede aumentar. Esto es posible si el aire que impacta en el lado convexo es bloqueado o redirigido antes del contacto con el cuerpo hacia el lado cóncavo. Evitando la presencia de un par negativo en el rotor. Para esta operación se puede diseñar un cuerpo externo al rotor e independiente pero fijo que funcionara como un anillo exterior con un número definido de placas que por su ángulo de diseño evitaran que una parte de la masa de aire impacte en los alabes.

4.2.4. Rotor bajo sustentación

El tipo de perfil aerodinámico es uno de los parámetros de diseño más determinantes en el funcionamiento de las turbinas eólicas. Como afecta el diseño del perfil sobre el coeficiente de potencia del generador eólico viene determinada por el llamado rendimiento aerodinámico L/D , que es el cociente entre la fuerza de sustentación y la de arrastre. Esta dependencia se aprecia claramente cuando el aerogenerador entra en pérdida ya que el cociente L/D se reduce drásticamente y de igual forma el coeficiente de potencia.

Las velocidades de trabajo hasta ahora encontradas según los datos disponibles por los observadores meteorológicos presentan número de Reynolds bajos debido a que son muy reducidas, indicándonos que el flujo de trabajo se encuentra en estado laminar y Mach subsónicos. Los perfiles aerodinámicos NACA, al ser pensado para usar en aviones, generalmente se estudian para regímenes de flujo turbulento y velocidades de mach sónico o supersónico, por esta razón, sus coeficientes de sustentación tienden a ser elevados para estos casos.

No obstante, para determinar el número de Reynolds en un perfil alar se considera la longitud L de la ecuación de Reynolds como la cuerda C del perfil aerodinámico. Siguiendo los procedimientos y resultados obtenidos por Carantoña O. (2009) en su trabajo se observó que primeramente es necesario determinar la terminología empleada para el desarrollo de estos perfiles como se observa en la figura 25 y luego obtener por referencia la aplicación de un perfil E-387.

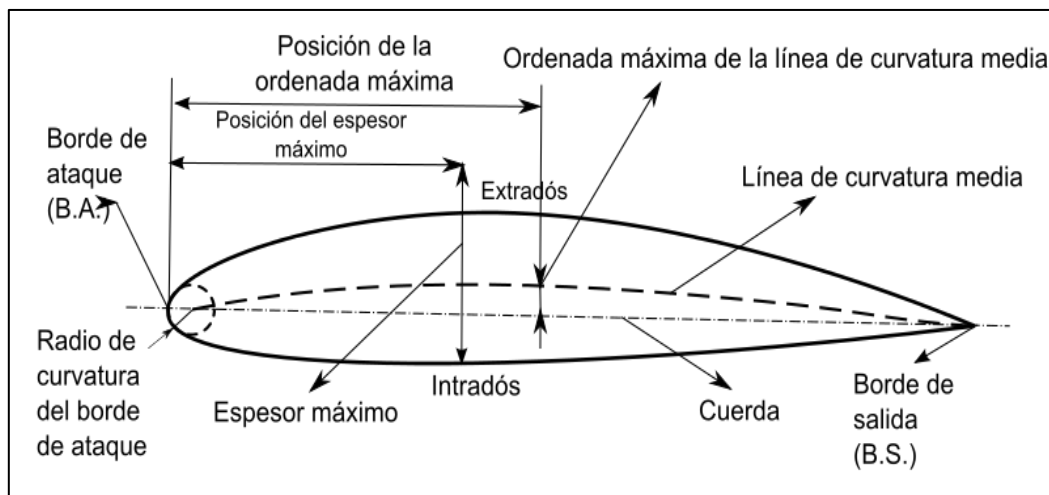


Figura 25. Cotas básicas en un perfil NACA.

Fuente: U.S. Centennial of Flight Commission - The National Advisory Committee for Aeronautics (NACA)

Richard Eppler fue el diseñador en la década de los 60's del perfil E387, aunque su uso inicial fue en aplicaciones aeronáuticas para planeadores y otros tipos de aeronaves, el perfil E387 tiene amplia aplicación en la actualidad como perfil de rotores para aerogeneradores de bajos potenciales. En comparativa con otros perfiles

el perfil Epppler 387 presenta un diseño más delgado y fino que sus competidores diseñados para bajos números de Reynolds en la figura 26 se observan la comparativa entre este perfil y algunos ejemplares de similar aplicación. El ejemplar E387 fue seleccionado debido a que maneja bajos números Reynolds en su aplicación así como también la delgadez que lo caracteriza que se traduce en menor peso del diseño.

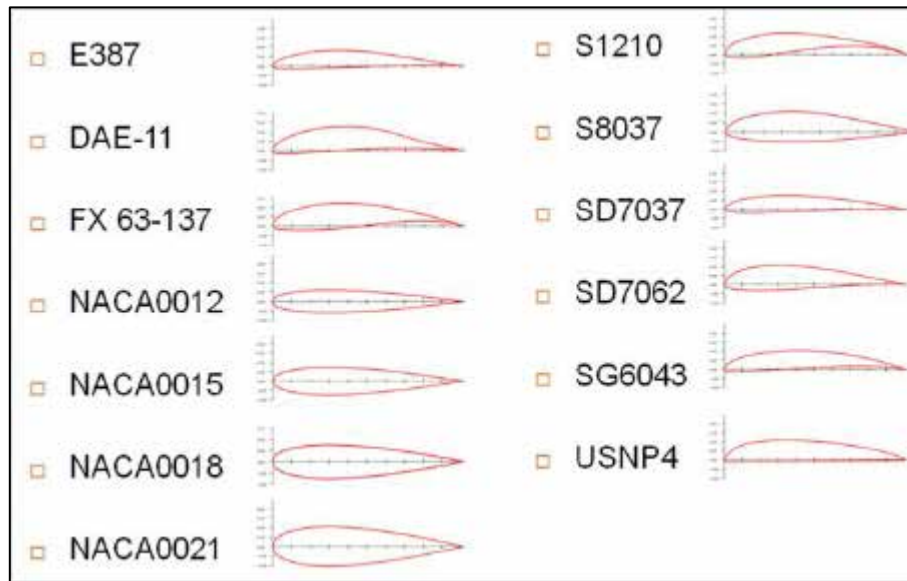


Figura 26. Perfiles para aplicaciones en aerogeneradores.

Fuente: U.S. Centennial of Flight Commission - The National Advisory Committee for Aeronautics (NACA)

Se requirió una simulación del perfil seleccionado para conocer las condiciones según las que opera en un ambiente promedio establecido según las condiciones del rotor de arrastre para 25 °C, viscosidad $1.4207E-5$ m²/s y ancho de cuerda de 0,1 m según la forma seleccionada de la figura 26. Se establece un $NCrit=9$ para realizar la simulación en Airfoiltools.

Tabla 7. Número de Reynolds en función de la velocidad

Velocidad (m/s)	Número de Reynolds
3	21.116
6	42.233

Fuente: Ramírez (2021)

En la tabla 7 se usó la velocidad aplicada en las simulaciones de 3 m/s, pero también se requiere de usar una velocidad mayor para conocer como actuaría el perfil en las condiciones máxima de diseño y se obtuvieron los resultados de la figura 27.

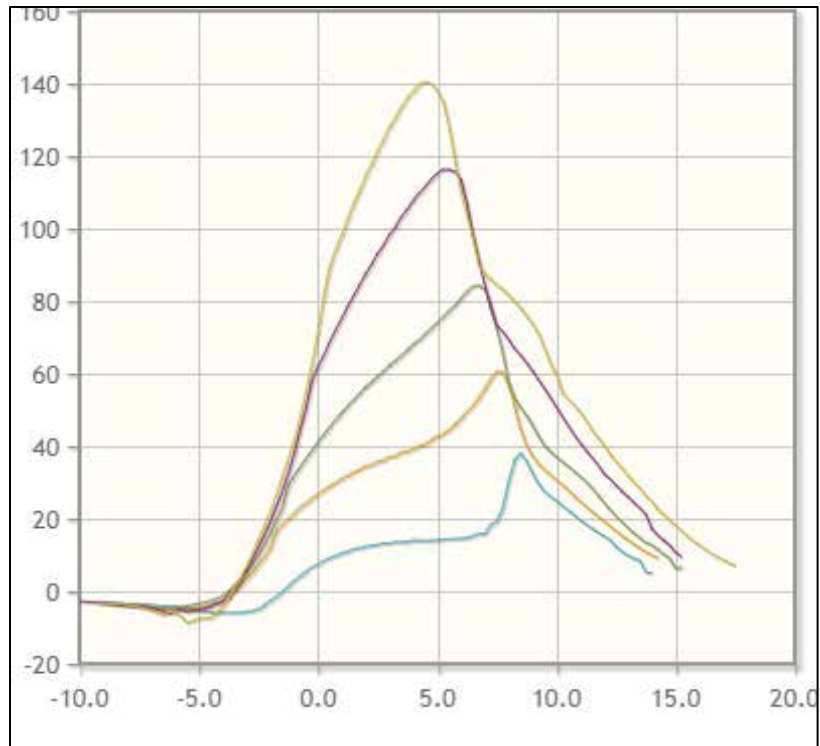


Gráfico 8. Cl/Cd vs Angulo de ataque para el perfil seleccionado.
Fuente: Ramírez (2021)

El gráfico 8 se descompone en que existe un CL igual a 1,2 y un CD de aproximadamente 0 para el ángulo de ataque de $8,5^\circ$ que es el que muestra la mayor relación para un Reynolds igual a 21000.

4.2.5. Determinación de la forma del rotor Darrieus

Según Strickland H. (1976) para determinar la altura del álabe hay que establecer la forma que tendrá para evitar las cargas oscilatorias, que llevan a ésta a ser susceptibles a la falla por fatiga como al deterioro del eje. El mal cargamento debido a las fuerzas centrífugas y la gravedad también contribuye perceptiblemente al daño por fatiga. Una forma de ir bajando las tensiones y ampliar la vida por fatiga es diseñar el álabe, tal que, su forma que se aproxime a la forma ideal llamada Troposkien o forma de la “cuerda de saltar”. Esto reduce las tensiones de flexión de la cara plana debidas a las fuerzas centrífugas y gravitacionales que tienden desplazar menos al álabe de su forma original.

La forma Troposkien, en términos matemáticos, puede ser expresada en términos de integrales elípticas. Sin embargo, la fabricación de la forma Troposkien puede no ser económicamente práctica, porque probablemente sería necesario el uso de técnicas de maquinarias de control numérico. Por lo tanto, puede ser ventajoso aproximar la formar Troposkien con una forma o una combinación de las formas que son más simples de fabricar como a una función parabólica.

El Laboratorio de Sandia en su informe realizado por Strickland H. (1976). (Siendo una filial de la Lockheed Martin Corporation), desarrolló un método alternativo para una aproximación de la forma Troposkien por dos líneas rectas unidas a un arco circular, dos formas que son razonablemente simples de fabricar. Este tipo de aproximación se demuestra en la figura 27, donde todas las longitudes han sido normalizadas por a , que es la distancia entre el origen en el sistema coordinado r, z y el punto en los cuales Troposkien interseca el eje de z .

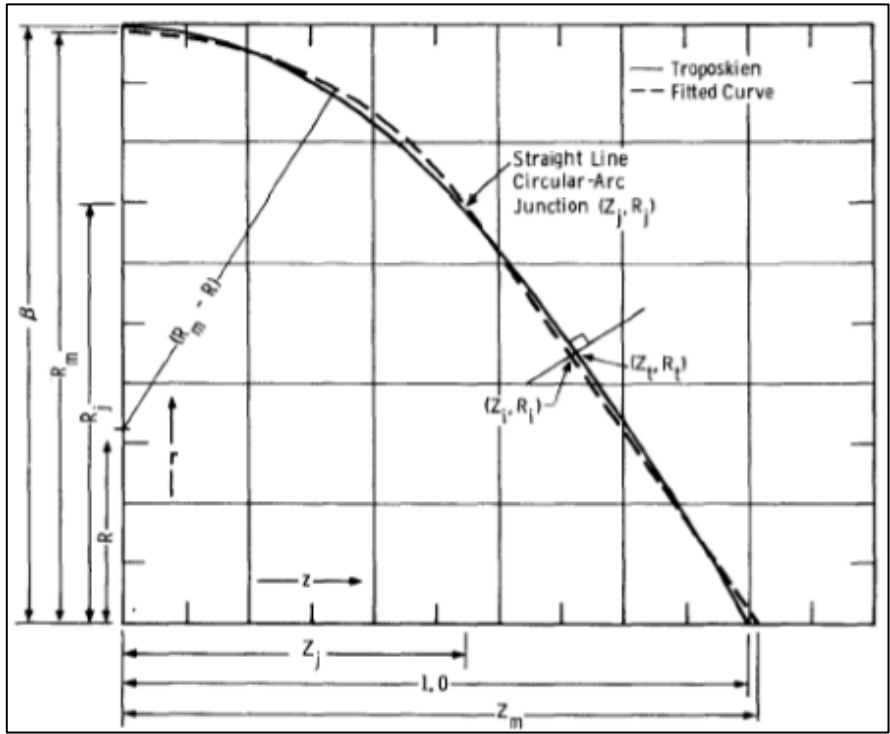


Figura 27. Sistema coordenado usado para describir la curva adaptada.
Fuente: Aerodynamics of the Darrieus turbine. Sandia Laboratory Report.

En la figura 28 se observan los parámetros más utilizados para el ajuste de curva y dimensión en metros catalogados, debido a las dimensiones seleccionadas del rotor Savonius con $H=0,6\text{m}$ en el rotor Darrieus para no causar interferencia entre los elementos ni sobre dimensión en el conjunto. Estos valores pueden ser ajustados a escalas.

β	R	Z_m	R_m	Diferencia Mínimo-Máximo (d)	Z_j	R_j
0,8	0,04755	1,01247	0,79046	0,00954	0,56763	0,52683
0,9	0,19378	1,01394	0,88882	0,01118	0,55612	0,61069
0,99459	0,32186	1,01536	0,98184	0,01274	0,54635	0,69210
1	0,32896	1,01544	0,98717	0,01283	0,54582	0,69681
1,1	0,45631	1,01697	1,08551	0,01449	0,53668	0,78475
1,2	0,57800	1,01843	1,18388	0,01612	0,52854	0,87419

Figura 28. Tabulación de parámetros normalizados para el ajuste de Troposkien.
Fuente: Aerodynamics of the Darrieus turbine. Sandia Laboratory Report.

Obteniendo una altura total del rotor Darrieus de 1,6 metros y 2 metros de diámetro entre sus extremos más opuestos, a esto se le añade el ancho de cuerda necesario para el diseño del perfil que se tomará como:

$$X = D * 0,05 = 2 * 0,05 = 0,1 \text{ mts.}$$

Para los resultados obtenidos en el perfil E387 con 0,1m de ancho de cuerda se grafico 9 para las dimensiones resultantes en perfil plano y grafico 10 para la figura geométrica.

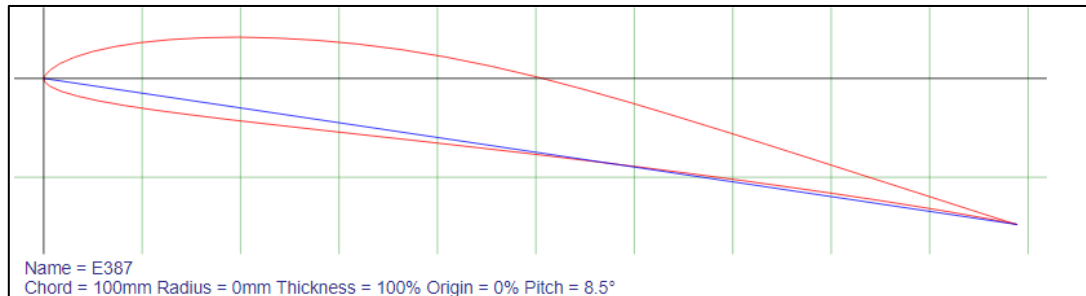


Gráfico 9. Perfil E387 con 100 mm de cuerda y 8,5 grados de ataque.

Fuente: Ramírez (2021)

Bajo estas condiciones y cotas se obtuvo el gráfico 10 en su modelado CAD:

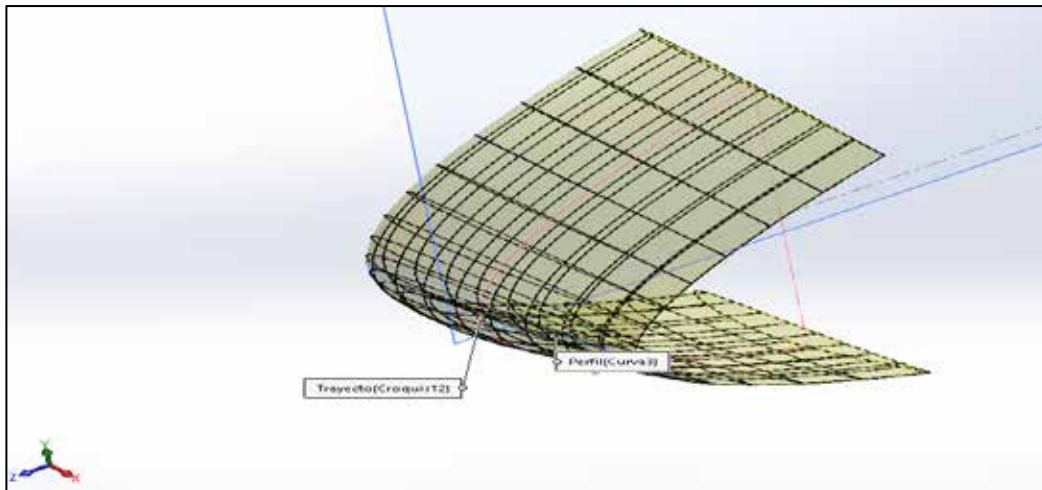


Gráfico 10. Modelo geométrico de alabe E387.

Fuente: Ramírez (2021)

El modelo geométrico del alabe del gráfico 10 se modeló en función de la curva real que define las mejores propiedades geométricas para las condiciones especificadas y bajo las condiciones obtenidas en el gráfico 8, el software SolidWorks permite realizar una curva a partir de los puntos espaciales que definen el perfil en los anexos se encuentran dicha curva.

Se realizaron las pruebas de simulación de trabajo en un alabe modelo del aerogenerador, que después de usar las herramientas de SolidWorks ofrecen una descripción de los fenómenos mecánicos en el viento y alabe.

En el análisis estático se supuso que el modelo de los gráficos 11 y 12 se veía afectado por la fuerza de gravedad y fuerza centrífuga causada por la rotación del alabe. La fuerza del viento también se tuvo en cuenta de acuerdo con la fórmula usada para las simulaciones anteriores de 3 m/s. Se asumió que el revestimiento de la hoja (carcasa) estaba hecho de fibra de vidrio para obtener un aproximado del efecto gravitacional, sin embargo debido a que el modelo presenta un centro de gravedad bien situado debido a su forma geométrica, simetría y puntos de apoyo no fue necesario el estudio de pandeo y deflexión causado en los alabes debido al peso del mismo, siempre asumiendo que se usaron materiales ligeros como el anteriormente mencionado.

La malla de simulación de elementos finitos era una malla basada en curvatura con 323445 nodos y 175719 elementos. A efectos de simulación, se adoptaron las siguientes medidas: $V = 3 \text{ m / s}$ (velocidad del viento).

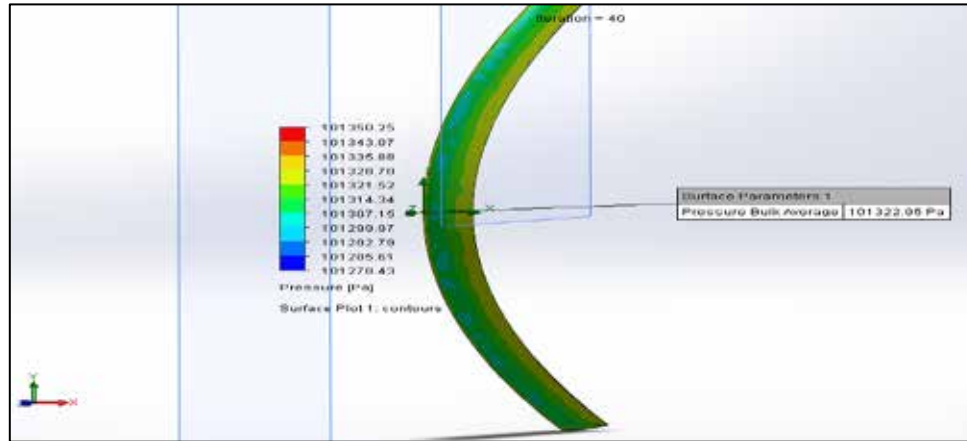


Gráfico 11. Presiones sobre la cara externa del alabe.
Fuente: Ramírez (2021)

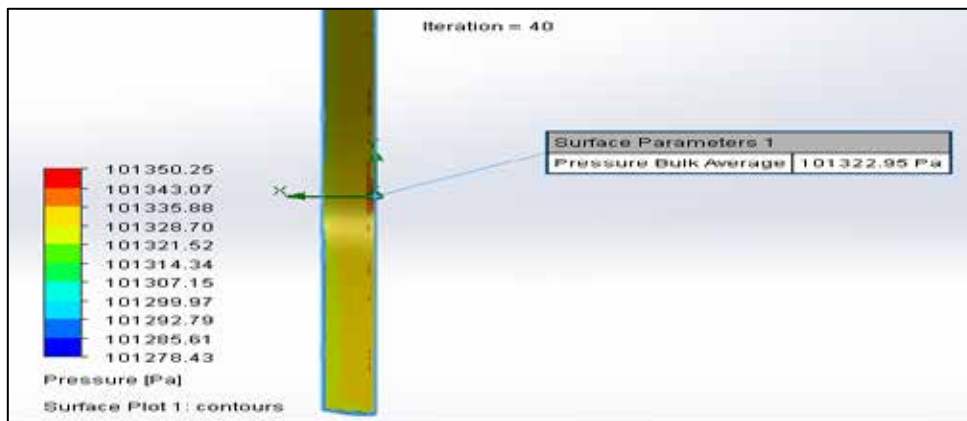


Gráfico 12. Presiones sobre la cara interna del alabe.
Fuente: Ramírez (2021)

Tabla 8. Resultados de las presiones sobre el perfil E-387.

Local Parameter	Mínimo	Máximo	Promedio	Medio	Área [m ²]
Pressure [Pa]	101278,42	101350,24	101322,96	101322,9467	0,518351236

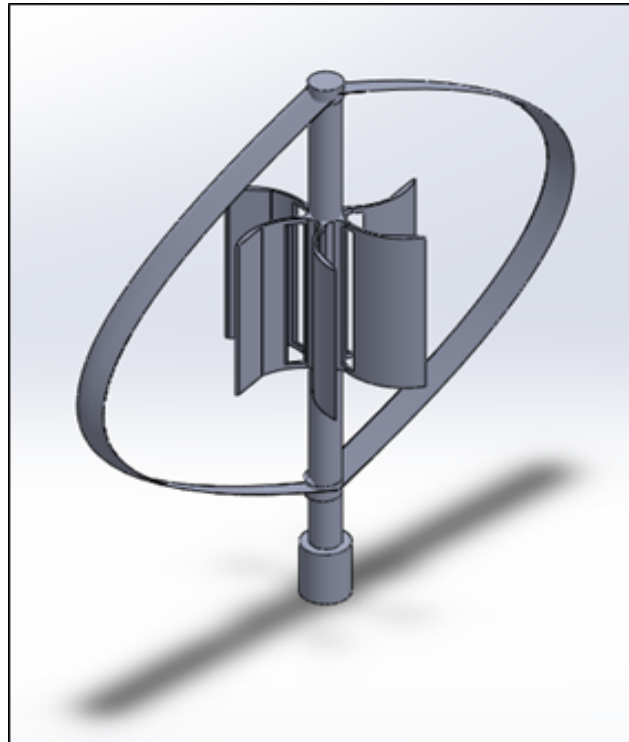
Fuente: Ramírez (2021)

En base a los resultados mostrados en la Tabla 8. Se observa el comportamiento común de un perfil alar. La existencia de zonas con alta y baja presión aguas arriba y abajo.

4.2.6. Propuesta de rotor Darrieus-Savonius Simple

Las velocidades encontradas en el sector obligaron que se conforme el diseño en un rotor que aproveche la baja disponibilidad en la energía cinética del viento es por esto que se plantea la construcción de un modelo híbrido donde las características de arrastre simbolizan un diseño de manufactura simple en comparación con las complejas curvas de un alabe para sustentación, la velocidad de giro dependerá del peso del conjunto así también como la escala o área de barrido, el diseño puede estar sujeto a constante mejoras usando elementos externos para mejorar la incidencia del viento o disponibilidad del mismo, el rotor mejorado tiene zonas huecas lo que redujo el peso del rotor y de la misma forma se eliminaron las zonas de torbellinos que reducen la eficiencia de la máquina.

El rotor Darrieus posee por definición mayor eficiencia, pero requiere de un mayor complejo de manufactura, sin embargo el rotor Darrieus requiere de una velocidad de operación mayor debido a su poca área de barrido en comparación con un rotor Savonius de proporción similar, en el caso estudiado se dio parámetros suficientes en el diseño para lograr que el barrido del rotor Darrieus sea superior aunque requiera de un momento mayor para romper su inercia, sin embargo, es por esto que se decide realizar los cálculos definitivos para un rotor combinado donde se obtiene un mayor área de barrido y se aprovecha la capacidad rotacional del rotor Savonius para dar el impulso inicial y romper con la inercia del conjunto según se muestra en la figura 29.



Rotor Darrieus
Altura 1,6 metros
Diametro 2 metros

Rotor Savonius
Altura 0,6 metros
Diametro 0,6 metros.

Figura 29. Conjunto Darrieus-Savonius diseñado.
Fuente: Ramírez (2021)

La turbina eólica híbrida combinada Savonius-Darrieus que se muestra en la Fig. 29 es de tamaño mediano y debido a su naturaleza de eje vertical, es posible obtener una salida independientemente de la dirección del viento. Esta turbina eólica es una turbina eólica combinada con un rotor Darrieus de tipo vertical que proporciona la energía principal y un rotor Savonius de tipo arrastre que proporciona la potencia de arranque. Estas cotas se usaron como base del prototipo inicial.

4.2.7. Cálculos para parametrización del conjunto

4.2.7.1. Datos y fórmulas aplicadas

El tip speed ratio o TSR para aerogeneradores, es la relación entre la velocidad tangencial de la punta de una pala y la velocidad real del viento. La relación de velocidad de punta está relacionada con la eficiencia, y la óptima varía con el diseño de la hoja. Es una característica de estas turbomáquinas que se calcula teóricamente según el tipo de rotor aplicado.

La velocidad angular viene definida por:

El torque generado sobre el eje:

La densidad del aire fue tomada a 25°C y se obtiene que:

$$=1,25 \text{ —}$$

Las velocidades del viento tomadas para los cálculos se obtuvieron en la fase I, se tomara una media y una velocidad igual al doble de la media como la velocidad crítica donde el conjunto pudiera llegar a operar en las máximas condiciones climatológicas.

$$v_{1(\text{media})} = 3 \text{ m/s}$$

$$v_{2(\text{nominal})} = 5 \text{ m/s}$$

4.2.7.2. Rotor Savonius

Diámetro del rotor = 0.6 mts.

Alto del rotor = 0,6 mts.

El área de barrido representativa es el área que cubre el desplazamiento de cada alabe sobre el espacio, dado que existen tres pares de alabes Savonius:

Ahora se procede a calcular la velocidad de rotación teórica para un rotor

Savonius partiendo del $TSR=1$ (Recomendado), donde N_2 representa las RPM de entrada:

$$N_2 = 95,49 \text{ RPM}$$

Se requiere conocer N_2 ya que es un requerimiento de la transmisión, dado que un generador eléctrico requiere un alto número de RPM dependiendo de su número de polos los modelos más comerciales trabajan a partir de 1000 RPM, las turbinas eólicas modernas giran a unas 20 RPM y su compleja transmisión entrega hasta 1500 pero dado la energía disponible y el tamaño del generador se trabajara a modo que:

4.2.7.3. Rotor Darrieus

Área en planta donde se ejerce la fuerza (área entre aspa-eje), calculado a través del estudio físico en SolidWorks del modelo:

El área que barren los dos alabes es igual a:

Entonces el TSR que aplica teóricamente este tipo de rotores es $TSR=6$ (Ver figura 21 y anexo A) y se procede a calcular las RPM:

Lo que significa que el rotor combinado deberá usar este parámetro como velocidad angular nominal.

4.3. Valorización de la capacidad de la turbina Darrieus-Savonius para sustentar la iluminación de los salones y áreas comunes en la planta física de Ingeniería Mecánica

El objetivo del proyecto es que la turbina diseñada sea una máquina capaz de

sustraer energía del viento para su posterior convertibilidad, en esta fase del proyecto se realizan los cálculos y simulaciones correspondiente que indiquen lo más preciso posible la capacidad del equipo en su objetivo de sustraer energía eólica.

4.3.1. Resultados en Flow Simulation de SolidWorks

Existen diferentes métodos de análisis en SolidWorks para realizar simulaciones de fluido, lo que tienen en diferencia es que dar el resultado completo de la acción del fluido sobre todo el conjunto, conlleva a complejidad del cálculo que esto infiere, permitiendo entonces partir desde diferentes puntos para un análisis básico de cómo afecta los vectores de velocidad sobre las caras y límites establecidos en cuanto a presión y fuerza que son datos importantes a tomar en consideración para cualquier diseño.

Para esta sección de simulación se aplicó el método del túnel de aire, a diferencia de las simulaciones anteriores representadas que se realizaron en una simulación de límites abiertos. La simulación de túnel consiste en crear una zona que envuelva el conjunto a estudiar, es decir, se seleccionó una región del espacio alrededor del conjunto y se aplicó dentro de esta región un fluido saliendo de una cara y llegando a otra (ver gráficos 13 y 14).

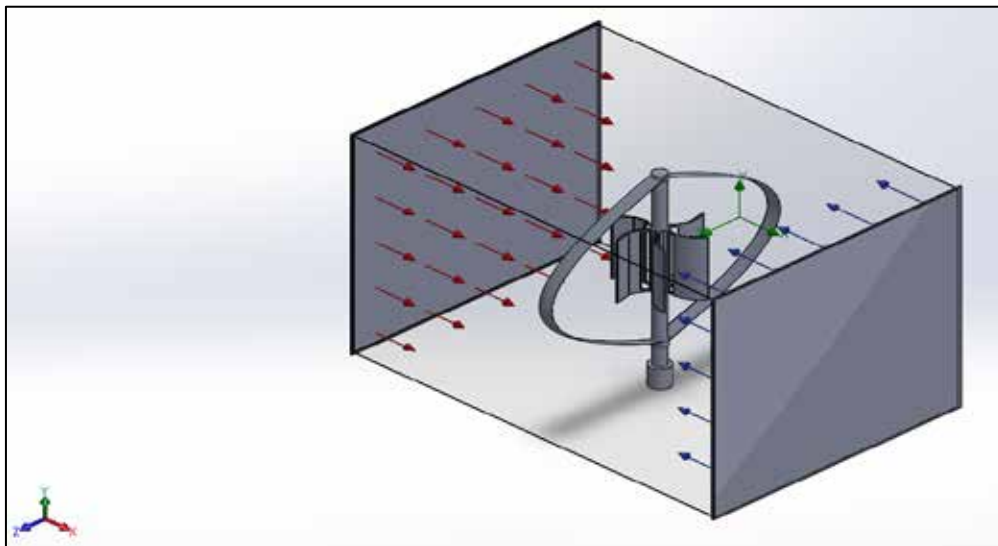


Gráfico 13. Parametrización de límites del modelo por túnel de aire en SolidWorks.
Fuente: Ramírez (2021)

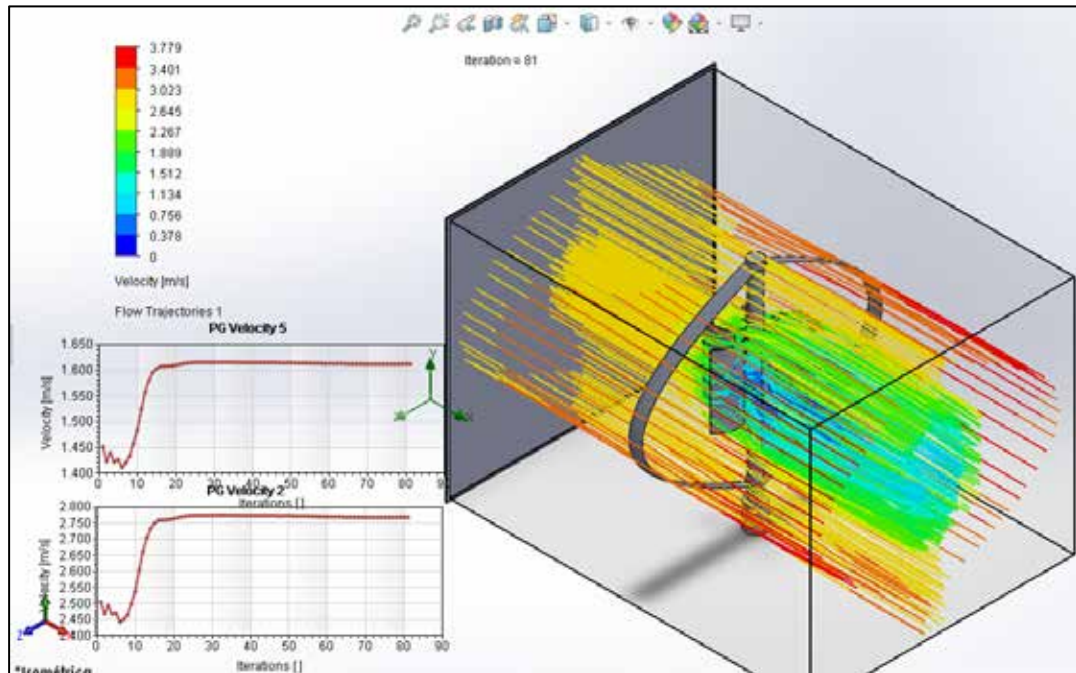


Gráfico 14. Simulación en túnel de aire del modelo Darrieus-Savonius a 3 m/s.
Fuente: Ramírez (2021)

4.3.2. Resultados sobre el rotor combinado

El rotor Darrieus mostró en la simulación que se cumple el principio de Bernoulli sobre los alabes del rotor mostrando que en un análisis la diferencia de velocidades sobre un punto en la cara interna y otro diametralmente opuesto sobre la cara externa del alabe, obteniéndose los resultados mostrados en el gráfico 14 donde el PG5 (cara interna de velocidad baja y presión alta) alcanza una velocidad media sobre su cara de 1,61 m/s mientras que el PG6 (cara externa de velocidad alta y presión baja) donde se tiene un promedio de 2,77 m/s.

Flow Simulation también permite conocer las fuerzas resultantes sobre una superficie o volumen, para este caso es necesario definir un eje de rotación en la simulación del fluido utilizando el dato $N_2=171,88$ RPM se definió el eje central y se obtuvo en simulación las fuerzas resultantes sobre la superficie del rotor combinado (fuerza de sustentación y fuerza de arrastre) representado en la gráfica 15.

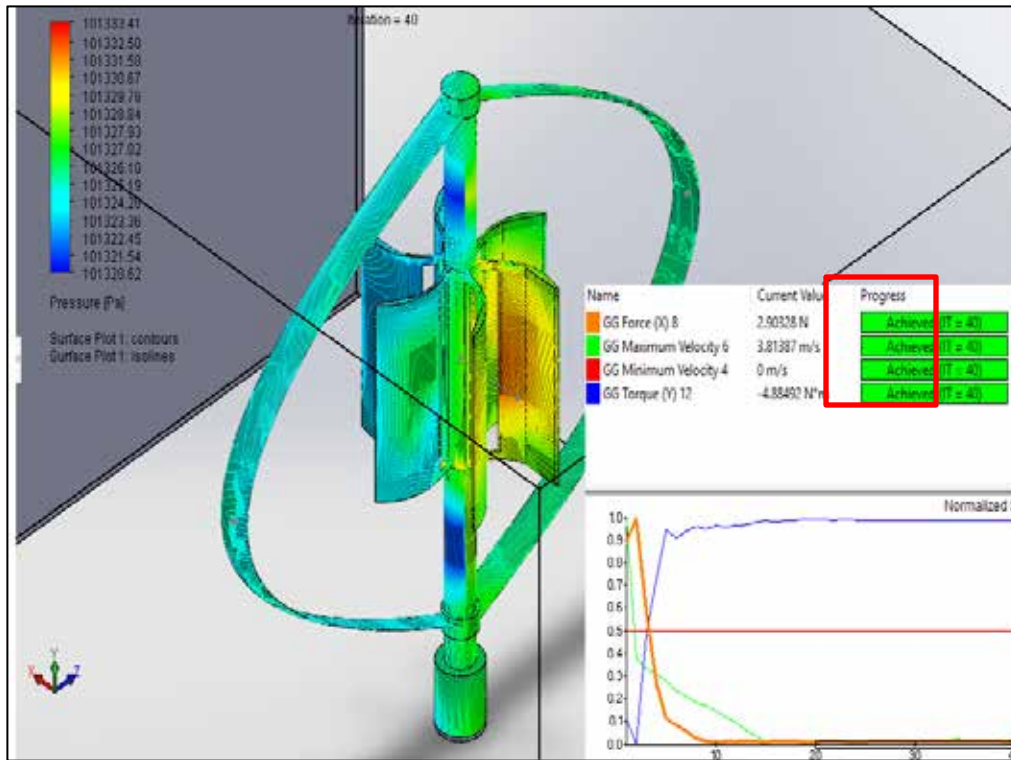


Gráfico 15. Simulación del rotor a 17,99 rad/s y 3 m/s.
Fuente: Ramírez (2021)

El gráfico 15 muestra el resultado sobre el eje de rotación (Y) de -4,88N.m Para la simulación tomada a 3 m/s y 17,99 rad/s sobre el eje rotacional del conjunto obtenemos entonces una potencia a partir de:

$$P = T \cdot \omega$$

4.3.3. Incidencia del número de perfiles en el rotor Darrieus

Dadas las características de los rotores donde el rotor Darrieus representa el de mayor área de barrido y con el perfil E-387 el de mejor coeficiente de potencia, es necesario el estudio del coeficiente de torque que genera un rotor con dos y tres perfiles durante un azimuth (ángulo de orientación) completo de 360°, entonces,

mediante la herramienta airfoiltools se puede conocer que existen importantes variaciones como muestra el grafico 16:

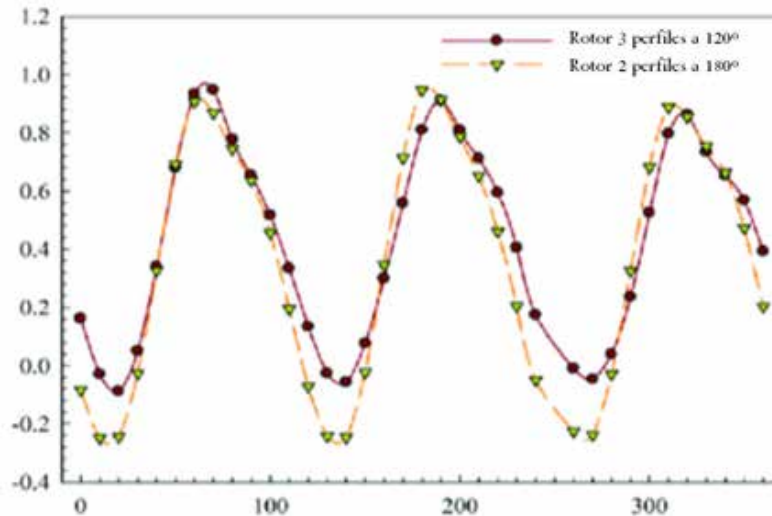


Gráfico 16. Ct vs Azimuth realizando en airfoiltools.

Fuente: Ramírez (2021)

Existe una gran diferencia en cuanto a torque negativo se refiere en los rotors de dos y tres perfiles, el rotor de dos perfiles muestra un torque negativo superior a -0,2 que se mantiene constante en la amplitud inferior de la gráfica, mientras que el torque negativo del rotor de 3 perfiles no supera a -0.5 inicialmente y conforme a la rotación disminuye.

Este análisis fue realizado a partir de 21.000 Reynolds y la velocidad de 3 m/s refiere a que las características del sistema con 3 perfiles a 120° mejora la eficiencia a partir del análisis del coeficiente del torque, por lo tanto se rediseña aplicando los 3 perfiles en el diseño CAD obteniendo el gráfico 17:

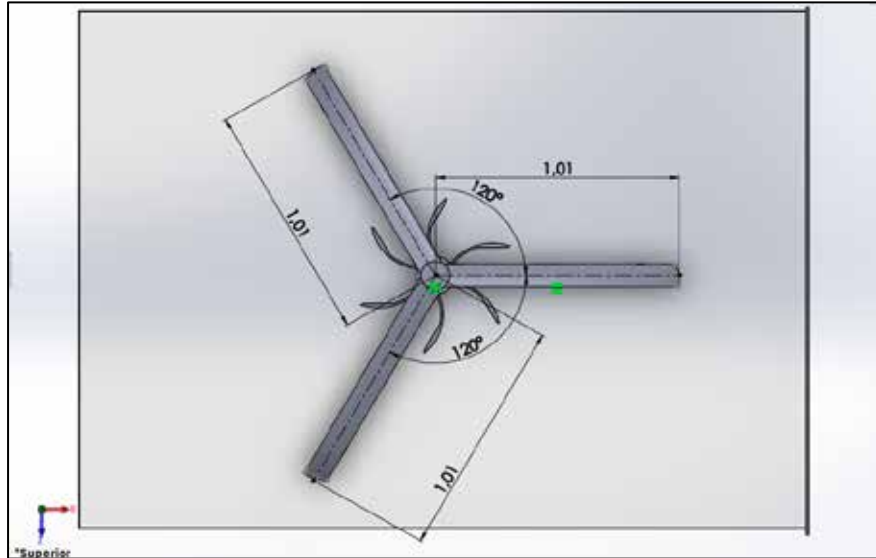


Gráfico 17. Rotor combinado con 3 perfiles en el rotor Darrieus.
Fuente: Ramírez (2021)

Una vez que fueron dispuestos los tres perfiles a un ángulo de separación de 120° como se especificó en el gráfico 16 se procede a realizar un análisis de fluido en SolidWorks:

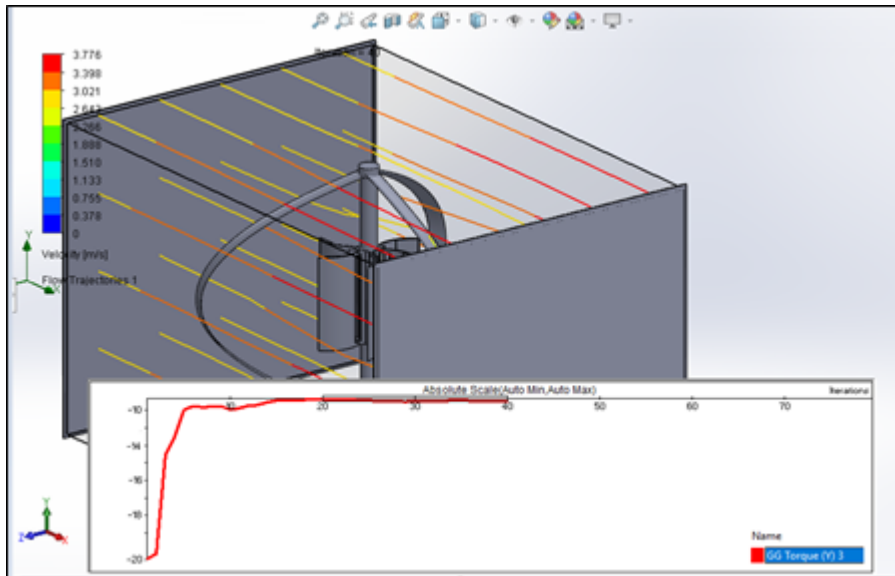


Gráfico 18. Análisis del torque en el rotor con eje X como eje de velocidad.
Fuente: Ramírez (2021)

El análisis por simulación del gráfico 18 arroja un torque promedio de 9,11 N.m bajo 40 iteraciones, entonces:

$$P_{\text{Obtenida}} = 163,88 \text{ Watts}$$

Esta potencia casi duplica la obtenida inicialmente a partir de añadir un tercer perfil, pero aunque el área de barrido aumento consecuencia del tercer perfil, existe una gran incidencia en la variación del coeficiente de torque en este significativo aumento de casi 87 %.

4.3.4. Propuesta de turbina Darrieus-Savonius en tándem

Los rotores en tándem son aquellos que presentan una serie de hélices o alabes enfrentados unos con otros como el ejemplo de la figura 30. Estos diseños son populares ya que permiten un mayor área de barrido y por ende un mayor aprovechamiento energético, un ejemplo práctico son los helicópteros de carga que poseen dos hélices para mejor sustentación y estabilidad.



Figura 30. Ejemplo de turbina eje horizontal en tándem.

Fuente: revista Iberdrola

Conocido el perfil aerodinámico que se adapta a las necesidades de la disponibilidad eólica (E-387) podemos usar el diseño en tándem para conseguir que el conjunto no sea sobredimensionado esto planteando dimensiones calculadas por medio de ciertos parámetros que nos indica las curvas características del perfil E-387.

A sabiendas de que una turbina eólica genera mayor energía efectiva mientras más área de barrido posea y de que, debajo de los perfiles alares, se presenta un área disponible, es posible añadir otros perfiles alares debajo de los superiores con el fin de eliminar los ángulos con pares cero. Básicamente, la zona aguas abajo del perfil, en un vecindad donde no se presente una velocidad baja, es un espacio vacío pero utilizable, donde pueden ubicarse otro par de perfiles alares. Optando por un rotor con perfiles paralelos y con una distancia L uno de otro.

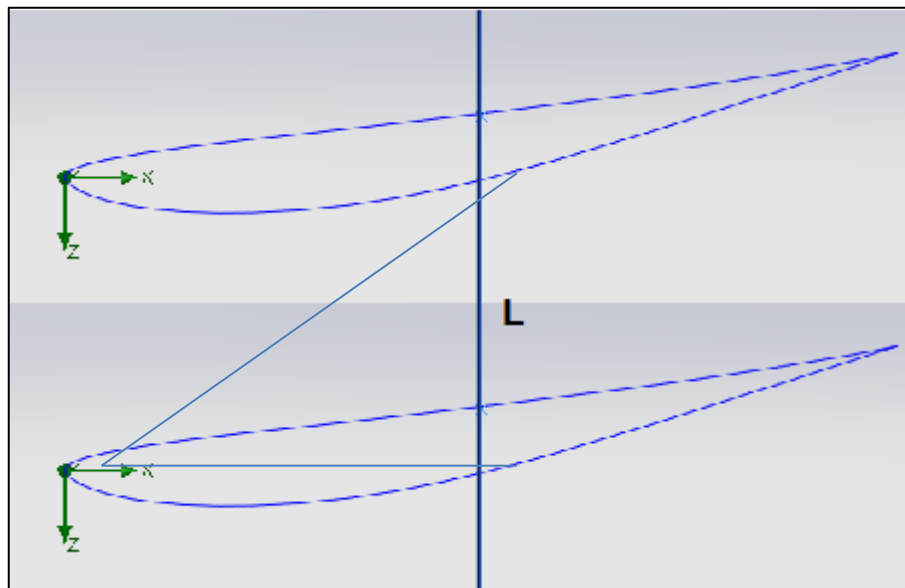


Figura 31. Distancia L representativa.

Fuente: Ramírez (2021)

La distancia L (ver figura 31) debe ser la justa para que el flujo no sea muy diferente entre un perfil y otro, es decir, la posición de los dos perfiles debe tener una separación idónea donde existirá naturalmente una variación de las velocidades en sus

puntos externos e internos pero con valores aceptables. Autores definen que esta distancia está determinada por la longitud de cuerda en una relación de:

Lo que en el caso arroja para $C=0,1$ mts una $L=0,17$ y debido a la forma Troposkien del alabe se aprovechó el espacio para redondear a $0,2$ y simular obteniendo el gráfico 19:

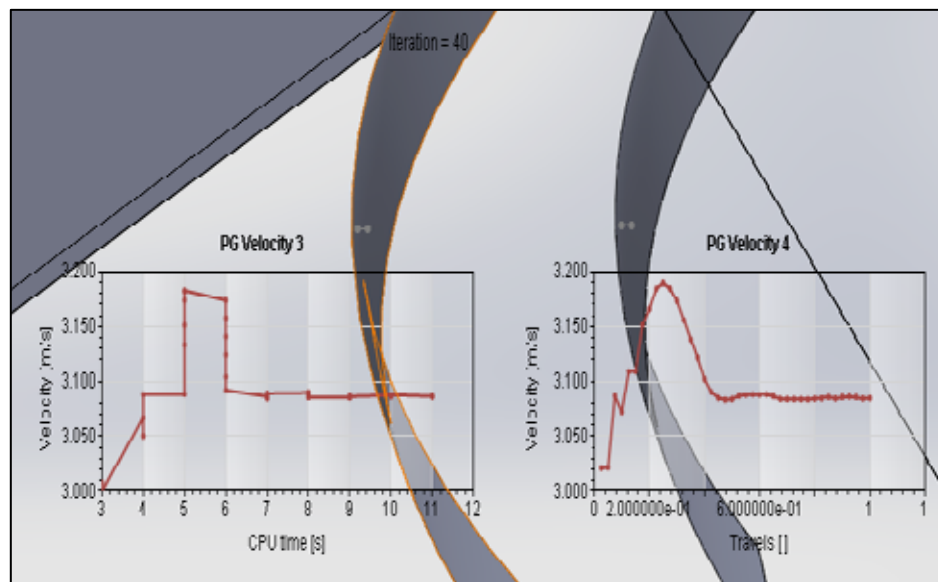


Gráfico 19. Simulación con puntos internos y externos de alabe.
Fuente: Ramírez (2021)

Se obtuvo resultados promedio de $3,087$ m/s sobre la velocidad del PG3 (alabe externo, cara externa) y $3,0085$ m/s en el PG4 (alabe interno, cara externa) lo que infiere una diferencia de $2,54$ %, por lo tanto los alabes están a una distancia indicada, la simulación correspondiente indica la mejora en la eficiencia del modelo según gráfico 20.

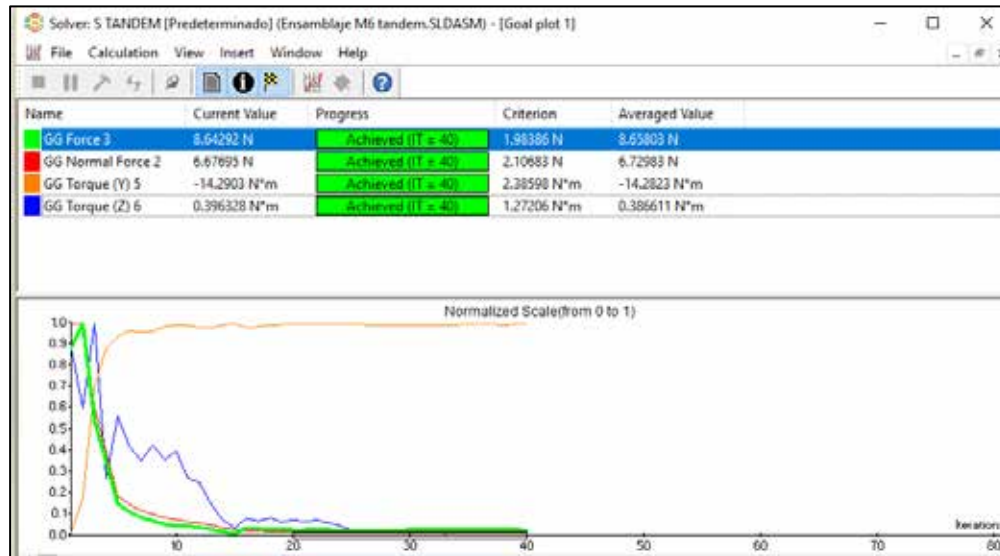


Gráfico 20. Iteraciones de las variables con modelo en Tandem.
Fuente: Ramírez (2021)

Los resultados de la gráfica 20 arrojan un torque de -14,28 N.m, entonces el modelo está captando una energía equivalente a 256,89 Watts, representando un incremento de 56 % en total luego de añadido el tercer alabe y el diseño en tándem. El resultado de esta mejora tan significativa se debe a la suma del aumento en el área de barrido más el diseño tándem, menos el torque negativo que generaba el ángulo muerto del rotor de dos alabes como se observa en el anexo B.

4.3.5. Selección del Tamaño del Modelo según Simulación

SolidWorks permite realizar escalado de piezas y ensamblajes, con esta herramienta se realizó tres pruebas usando como pieza de referencia el alabe Darrieus mayor y con distintos radios obteniéndose los resultados de la tabla 9:

Tabla 9. Resultados de simulación a distinta escala.

Radio (metros)	Torque (N.m)	Energía (W)
1	-14,28	256.89
3	-144,97	868.36
6	-815.8	2439,49

Fuente: Ramírez (2021)

Lo que indica que el tamaño adecuado para la solicitud de la planta física se encuentra en un radio $3 < R < 6$, entonces se probó escalando el modelo de radio 3 mts a 1.5 veces lo que le otorgo un radio de 4,5 mts y un área dentro de la curva de Darrieus mayor igual a $23,9 \text{ mts}^2$ y se obtuvo el valor promedio de 1516,3 watts a partir de 3,99 rad/s como velocidad angular, por lo tanto este parámetro satisface la necesidad de 1,32 kW. Se seleccionó este modelo (Grafico 21) con las dimensiones de la tabla 10.

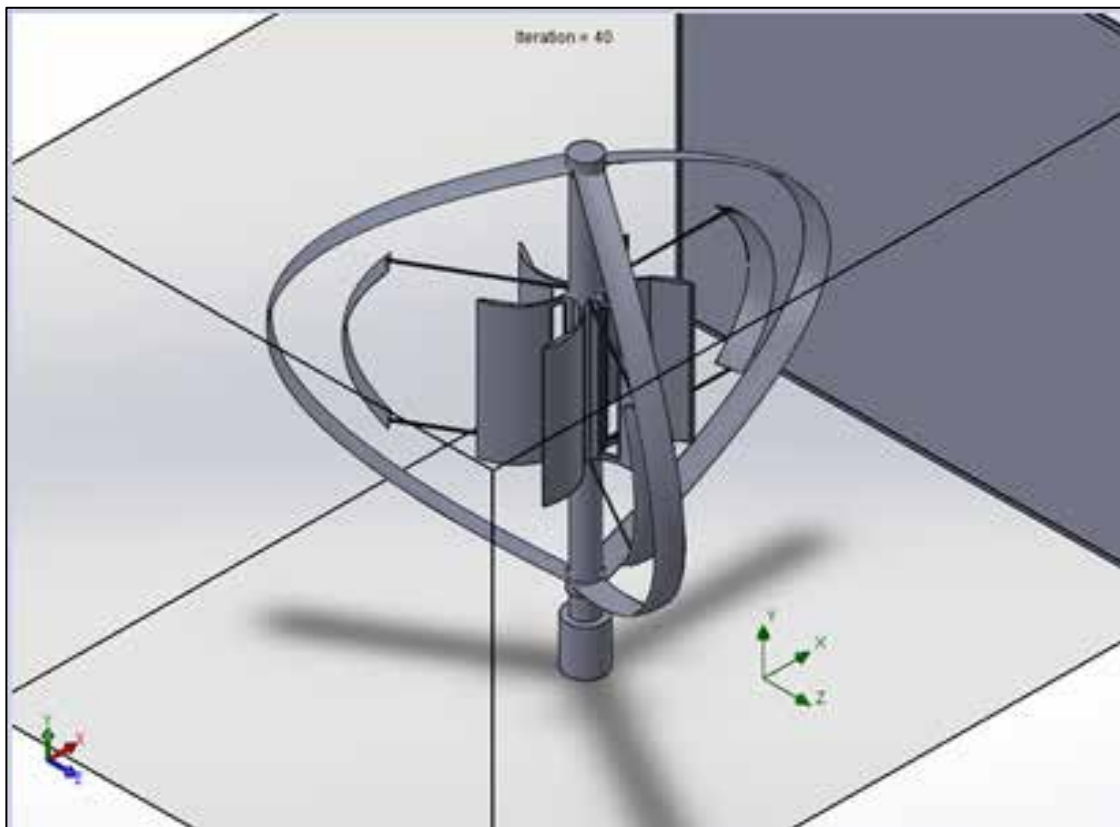


Gráfico 21. Modelo seleccionado en tándem.

Fuente: Ramírez (2021)

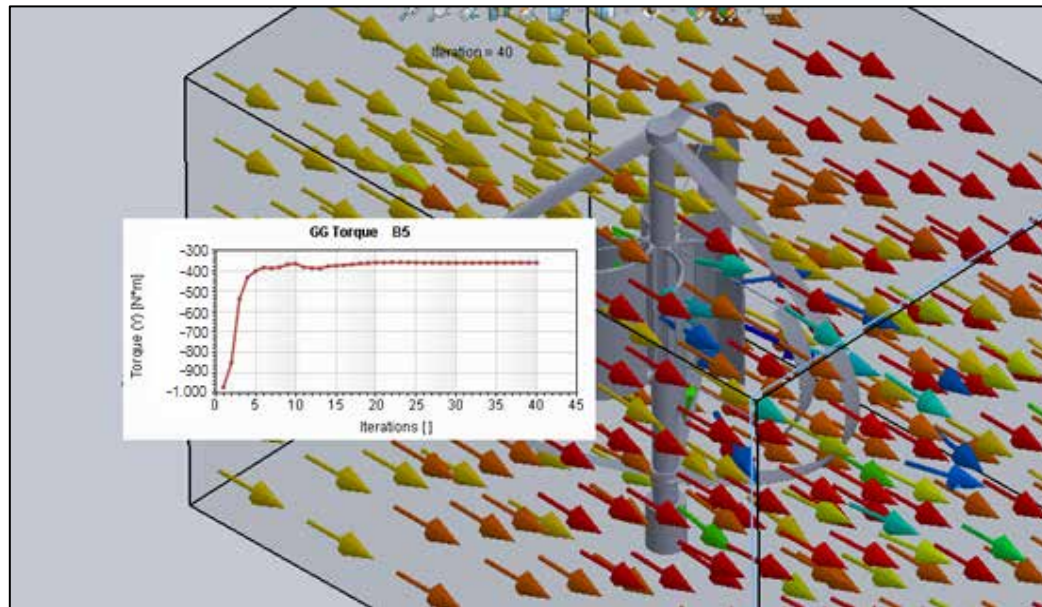


Gráfico 22. Simulación de modelo en tándem con eje X como eje de velocidad, estudio de torque sobre cuerpo central en Y.

Fuente: Ramírez (2021)

Tabla 10. Dimensiones y características seleccionadas.

Cota	Dimensión (metros)
Rotor Darrieus	3 perfiles
Radio 1	4.5
Radio 2	3.6
Altura	7.2
Perfil	E-387
Cuerda	0.449
Altura Perfil 1	7,2
Altura Perfil 2	2,7
Rotor Savonius	6 perfiles
Altura	2,7
Diámetro	2,7
Diámetro de eje principal	0.12
Tipo de uniones	Fijas
Resultados	Magnitud
Potencia	1.51kW
Torque promedio	380.02 N.m
Velocidad angular	3,99 rad/seg

Fuente: Ramírez (2021)

CONCLUSIONES

El objetivo general de diseñar y simular una turbina eólica que funcione bajo velocidades de viento disponible en San Diego fue cumplido logrando un resultado bajo simulación de 1,51kW, obtenidos por un diseño dimensionado a la necesidad. Se tomó arbitrariamente una eficiencia total de 0,9 lo que conllevó a una exigencia de 1,32kW siendo superada por el resultado de un modelo de 4,5 metros de radio y 7,2 metros de altura.

La definición de la forma y el tamaño del modelo se enfocaron en la facilidad de su construcción, dado que los generadores de este tamaño suelen ser construidos con materiales como la hojalata o fibra que se muestran rígidos y económicos. La turbina eólica diseñada requirió dimensionarse de acuerdo a la necesidad planteada, obteniéndose un radio de 4,5 metros siendo una cota aceptable dado que el radio de un rotor eólico común puede alcanzar hasta 48 metros.

El proyecto goza en adelantarse a la baja inversión energética del sistema nacional y al déficit de desarrollo de nuevas tecnologías en Venezuela, y así comenzar, a usar la energía disponible de manera natural en regiones donde existan deficiencias abriendo paso a la capacidad que tiene la simulación asistida en esta área de investigación.

El análisis teórico incluye los puntos a considerar sobre la partida para un diseño eficiente, la importancia del estudio del coeficiente de torque fue elemental para este proyecto, dado que los torques negativos reducen la eficiencia de este tipo de rotor hasta un 87 %.

Gracias al modelo en tándem se pudo mejorar la eficiencia por encima del 50 % aprovechando las zonas de barrido internas, esto demuestra que existen zonas de barrido entre perfiles aprovechables para los rotores de eje vertical.

Varios diseños fueron tomados en estudio cuando se partió a la mejora del modelo inicial, el estudio aplicó el modelo Troposkien dado los escasos trabajos que

aplican este parámetro. Esto también es motivo de que no existan en internet catálogos de rotores eólicos con esta forma en uso comercial, comúnmente, se encuentran rotores eólicos híbridos de forma H como el del anexo D, dada su simple configuración.

Se diseñó y simuló una turbina eólica vertical que utiliza las relaciones físicas convenientes, esto siguiendo los principios eólicos desde Alberto Betz. De tal forma que; con ayuda de simulación por computadora, se logró prever el comportamiento del flujo en los dos modelos de rotores estudiados. Considerando así modificaciones necesarias que mejoraran su funcionamiento. SolidWorks 2020 demuestra ser una herramienta que brinda un análisis de fácil interacción, prestó al proyecto la calidad en el diseño de cada elemento, su ensamblaje y su posterior simulación con éxito.

Los resultados fueron concluyentes en cuanto a la partida del modelo, donde el rotor Savonius muestra su baja eficiencia para producir energía así que éste representa un 11 % del área barrida con respecto al rotor Darrieus donde solo provee torque inicial. Sin embargo el modelo simulado Darrieus muestra la importancia de tomar en cuenta los índices de turbulencia o vorticidad en un modelo aerodinámico que ocasionan perdidas por contraflujo. En el rotor Darrieus el perfil E387 demuestra la eficiencia que tiene en generadores pequeños durante la simulación, la diferencia de presiones y velocidades en sus caras es representativa, esto apunta que la investigación puede expandirse a rotores con más de dos alabes en tándem de perfil E387.

La optimización del equipo puede ser posible con la instalación de un redireccionador de viento en el rotor Savonius, la instalación de un banco de baterías la cual proporcionaría energía en los días donde la velocidad es muy baja o durante periodos donde no se ocupa la energía es posible almacenarla. Los rotores de este tipo suelen ser usados también otras aplicaciones como el bombeo, lo que amplía su campo de estudio a otras ramas de generación.

Para realizar las simulaciones es necesario definir la velocidad angular a la que el modelo funcionara, esto es posible gracias al TSR, que es un numero adimensional imprescindible en el diseño y cálculo de los rotores eólicos.

El modelo matemático potencial que define la energía obtenida con relación a la velocidad del viento, indica que este rotor es un gran prospecto para ser aplicado donde la velocidad del viento se encuentre igual o superior a los 6 m/s, pudiendo generar suficiente energía para un hogar completo.

El diseño de turbinas eólicas es un arte igual al diseño de aeronaves y vehículos aerodinámicos, partir de los desarrollos expuestos por otros autores fue elemental, añadiendo la simulación como concepto novedoso y practico.

Se concluye que la turbina seleccionada presenta un diseño elegante y eficiente que logra aprovechar de forma potencial la baja disponibilidad eólica que presento la región. El diseño y simulación de la misma fue orientada a sus rotores los cuales presentaron las características de sus creadores originales, para el caso de Savonius; su diseño estaba enfocado en la sencillez y practicidad para que cualquiera pudiera fabricarlo y, en el caso de Georges Darrieus, el aprovechamiento de los perfiles eólicos a través de la fuerza de sustentación que estos presentan.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar en futuras investigaciones un análisis técnico, económico y ambiental que valide esta propuesta y la compare con otros métodos de generación de energía sustentable, dado que existen alternativas como paneles solares, turbinas hidráulicas, entre otras. Especialmente se aconseja un estudio posterior que determine la factibilidad económica del proyecto dado que comercialmente un generador de este tipo oscila entre 3000-4000 € en los mercados europeos, para luego aplicar factibilidad técnica y ambiental.

Una turbina eólica parte su diseño del requerimiento energético, luego es necesario el diseño de elementos y selección de perfil adecuado, finalmente, el material de fabricación es el elemento que determinará la mejor relación entre peso, costo y rigidez. En la actualidad existen una gama de materiales para fabricar turbinas eólicas como: hojalata, fibra de vidrio, fibra de carbono o resinas epoxi que tienen buena resistencia a la fatiga (ver anexo C).

Es recomendable realizar un análisis de materiales para poder estimar el costo final estimado y el material más eficiente, sin embargo, la fibra de vidrio reforzada con resinas epoxi es un material de buena rigidez que presenta una buena resistencia a la corrosión ambiental bastante aplicado en la fabricación de turbinas eólicas debido a su bajo peso con respecto a otros materiales.

Se destaca que para obtener una veracidad en la eficiencia total, es conveniente emplear una simulación donde intervengan todos los elementos mecánicos y eléctricos restantes, así mismo, el peso del mismo diseño. Para esto también son útiles los ensayos de laboratorio por medio de prototipos usando reglas de semejanzas.

Se recomienda realizar un plan de mantenimiento para este tipo de equipo durante su aplicación, dado que se requiere que la eficiencia del equipo se mantenga al nivel óptimo, los desgastes en rodamientos, falta de lubricación como otros defectos generados por el uso pueden disminuir la eficiencia abruptamente incluso pueden generar fallos catastróficos.

REFERENCIAS

- Acosta M. y Ríos J. (2007). **Factibilidad técnico-financiera para el desarrollo de un parque de generación eólica en la Isla de Margarita y evaluación del impacto sobre el sistema eléctrico receptor**. Tesis de grado no publicada. Universidad Central de Venezuela.
- Arcos, M. (2014). **¿Cuánta Energía se Puede Sacar del Viento? Límite de Betz**. (Disponible en <https://energeticafutura.com/>) [Consulta 2020, septiembre 5].
- Arias, F. (2006). **El Proyecto de Investigación**, Caracas, Editorial Espíteme.
- Ashwill, T., Leonard, T. (1986). **Developments in Blade Shape Design for a Darrieus Vertical Axis Wind Turbine**, Sandia Report, 86(1085).
- Banega, J. y Moreno, N. (2016), **Diseño aerodinámico de una VAWT adecuada a los perfiles de viento de Paraguaná mediante CFD**". Tesis de grado no publicada. Universidad Central de Venezuela.
- Carantoña O. (2009). **Análisis del Comportamiento Aerodinámico de Perfiles empleados en Aerogeneradores de Baja Potencia**. Universitat Politècnica de València, España.
- Cengel Y., Cimbala J. (2006). *Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones*. 1era edición, McGraw-Hill Interamericana de España S.L.
- Conocimiento sobre turbinas eólicas. Visitado el 20-03-2021. Disponible en: https://gunt.de/images/download/wind-turbines_spanish.pdf
- Del Campo, M., Nelson, P. y García, M. (2016). **La energía del viento en México: Simulación de un parque eólico y aplicación de análisis probabilístico de seguridad. Ciudad de México**. Departamento de Sistemas Energéticos. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Diseño de generador Savonius uso doméstico. Visitado 10/09/2020. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/131197/>
- Eolo 3000, generador de uso doméstico Darrieus-Savonius. Visitado 28/03/2021. Disponible en: <https://residential-wind-turbines.com/product/eolo-3000-small-vertical-axis-wind-turbine-generator-windmill-darrieus-savonius-3kw/>
- Estevez A. (2009). Estudio para la obtención de la energía eólica para el sistema de comunicación del CALE.F.T. Universidad de Las Fuerzas Armadas, Ecuador.

- El arrastre en aerogeneradores. Visitado 25/08/2020. Disponible en: <https://www.monografias.com/trabajos82/teoria-capa-limite-sustentacion-arrastre/teoria-capa-limite-sustentacion>.
- Ferri J. (2012). **Análisis del Comportamiento Aerodinámico de Perfiles empleados en Aerogeneradores de Baja Potencia**. Trabajo de grado Universitat Politècnica de València.
- Funcionamiento de una turbina eólica. Visitado 09/09/2020. Disponible en: <http://eoliccat.net/preguntas-frecuentes/?lang=es>
- Generadores de Eje Vertical y Horizontal. Visitado 05/08/2020. Disponible en: <https://blog.structuralia.com/aerogeneradores-de-eje-vertical-y-horizontal-tipos-ventajas-e-inconvenientes>.
- Guerrero J., Figuera J. (2016). **Instalaciones eléctricas residenciales**. Cumana, Venezuela.
- Gipe, P. (2000). **Energía Eólica Práctica**. Sevilla, España. Editorial S.A. Progensa. Promotora General de Estudios.
- Kotik, H. (2016). **Fractura y Fatiga de Materiales Compuestos de Matriz Polimérica Empleados en Palas de Generadores Eólicos de Alta Potencia**. En Tesis de Doctor en Ingeniería. Bahía Blanca, Argentina: Universidad Nacional Del Sur.
- Ingenieriaetica (2015). Turbinas Hidráulicas. Visitado 26/08/2020. Disponible en: <http://ingenieriaetica.blogspot.com/2015/09/turbinas-hidraulicas.html>
- Influencia del viento según las variables que le afectan. Visitado 17/01/2021. Disponible en: <https://www.liebherr.com/shared/media/mobile-and-crawler-cranes/brochures/wind-influences/liebherr-influencias-del-viento-p403-s04-2017.pdf>
- Kiyoshi, O. (2005). **Electrical Engineering in Japan**. Vol. 150.
- Kyozuka, Y. (2008). **An experimental study on the Darrieus-Savonius Turbine for the Tidal Current Power Generation**. Facultad de Ingeniería Universidad de Kyushu.
- Las turbinas Eólicas. Visitado el 26/08/2020. Disponible en: <https://www.kimerius.com/app/download/5780377068/Las+turbinas+e%C3%B3licas.pdf>
- Makemu Energy (2019). Aerogenerador eólico vertical para casa, jardín o terraza Darrieus Savonius Smart Wind 300/400/500 W. España.

- Martil, I. (2019) ¿Cómo Funcionan las Turbinas Eólicas? (Disponible en <http://www.sectorelectricidad.com>) [Consultado 2020, agosto 4].
- Mataix, C. (1975). Turbomáquinas y maquinas hidráulicas. Edición N° 1.
- Mendoza, N. (2017), “**Diseño de un generador eólico de eje vertical tipo Darrieus helicoidal de 3 KW**”. Tesis de grado. Tecnológico de México.
- Norma FONDONORMA 200-2009: Código Eléctrico Nacional (9va Revisión); FONDONORMA/CT-11 Electricidad, Electrónica y Comunicaciones, por el Subcomité Técnico de Normalización CT-11/SC-07 Instalaciones Eléctricas, a cargo de CODELECTRA
- Poblaciones en un trabajo de grado. Visitado el 27/08/2020. Disponible en: <http://tesis-investigacion-cientifica.blogspot.com/2013/08/que-es-la-poblacion.html>
- Revista Iberdrola (2019). Evolución de la energía eólica en Europa. Visitado 05/08/20 Disponible en: <https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/evolucion-energia-eolica-europa>
- Sabino C. (2010). **El proceso de Investigación**. Caracas, Editorial Panapo.
- Simulación aerodinámica en OpenFoam. Visitado el 29/09/2020. Disponible en: <https://www.openfoam.com/>
- Strickland H. (1976). **Aerodynamics of the Darrieus turbine**. Sandia Laboratory Report, SAND-76-5586.
- Tamayo y Tamayo M. (2012). **El Proceso de la Investigación Científica**. México DF, Editorial Limusa.
- Tetsuya W., Yoshiaki T. “**Hybrid Configuration of Darrieus and Savonius Rotors for Stand-Alone Wind Turbine-Generator Systems**” Instituto de tecnología de Japón.
- Tarifa E. (2004). **Teoría de Modelos y Simulación. Generación de números aleatorios**. Argentina. Universidad de Jujuy.
- Universidad Pedagógica Experimental Libertador (2009). Manual de Trabajos de Grado de Maestrías y Tesis Doctorales. Caracas. Ediciones FEDEUPEL.
- U.S. Centennial of Flight Commission - The National Advisory Committee for Aeronautics (NACA). Visitado el 17/01/2021. Disponible en: <https://www.nasa.gov/ames/the-national-advisory-committee-for-aeronautics/>

Velocidad del viento suficiente para arrancar un generador. Visitado 25/08/2020.
Disponble en:
<http://eoliccat.net/preguntasfrecuentes/?lang=es#:~:text=Los%20aerogenerador es%20empiezan%20a%20funcionar,a%2014%20metros%20por%20segundo>

ANEXOS

Las turbinas eólicas pertenecen al grupo de las turbomáquinas. En la práctica, resulta esencial distinguir las turbinas eólicas de las turbinas hidráulicas y de las turbinas de vapor. La energía eólica se transforma en energía eléctrica a través de un generador eléctrico. La energía eólica se transforma en energía mecánica a través de un eje de transmisión. La energía eólica se transforma en energía eléctrica a través de un generador eléctrico. La energía eólica se transforma en energía mecánica a través de un eje de transmisión. La energía eólica se transforma en energía eléctrica a través de un generador eléctrico. La energía eólica se transforma en energía mecánica a través de un eje de transmisión.

Dimensiones de la turbina eólica

Para determinar una turbina eólica es necesario conocer el diámetro de potencia del mismo. Además, la potencia de la turbina eólica en la TPO (en inglés, tip speed) está relacionada con el diámetro de potencia.

Dimensiones de potencia del viento

En la práctica, resulta esencial distinguir las turbinas eólicas de las turbinas hidráulicas y de las turbinas de vapor. La energía eólica se transforma en energía eléctrica a través de un generador eléctrico. La energía eólica se transforma en energía mecánica a través de un eje de transmisión. La energía eólica se transforma en energía eléctrica a través de un generador eléctrico. La energía eólica se transforma en energía mecánica a través de un eje de transmisión.

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

El ejemplo de una turbina eólica es el ejemplo de una turbina eólica.

Potencia de la turbina eólica

Las turbinas eólicas se distinguen de las turbinas hidráulicas y de las turbinas de vapor. La energía eólica se transforma en energía eléctrica a través de un generador eléctrico. La energía eólica se transforma en energía mecánica a través de un eje de transmisión. La energía eólica se transforma en energía eléctrica a través de un generador eléctrico. La energía eólica se transforma en energía mecánica a través de un eje de transmisión.

$$P = A \cdot \rho \cdot v^3 \cdot C_p$$

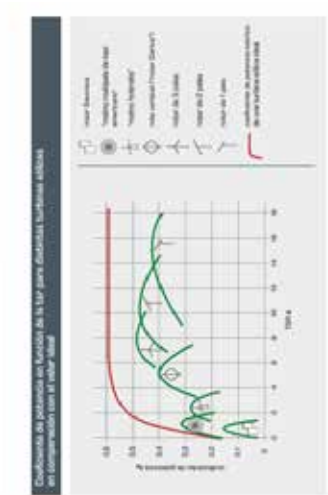


TPO (Tip Speed)

Las turbinas eólicas se caracterizan por su forma y el número de palas. El número de palas depende del tipo de turbina. Las turbinas eólicas de eje horizontal tienen 3 palas, mientras que las turbinas eólicas de eje vertical tienen 2 palas.

$$TPO = A \cdot v$$

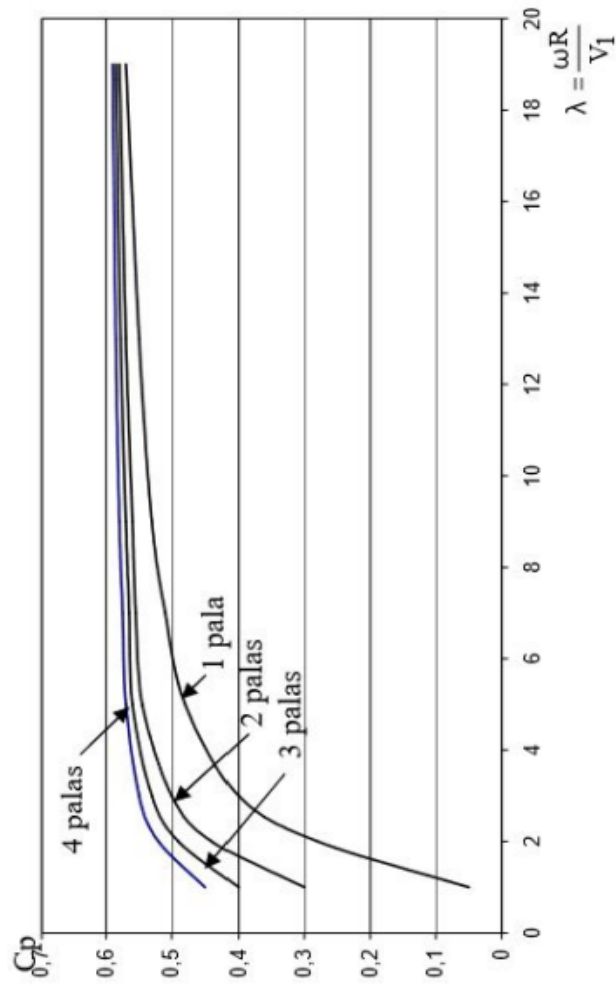
Las turbinas eólicas se caracterizan por su forma y el número de palas. El número de palas depende del tipo de turbina. Las turbinas eólicas de eje horizontal tienen 3 palas, mientras que las turbinas eólicas de eje vertical tienen 2 palas.



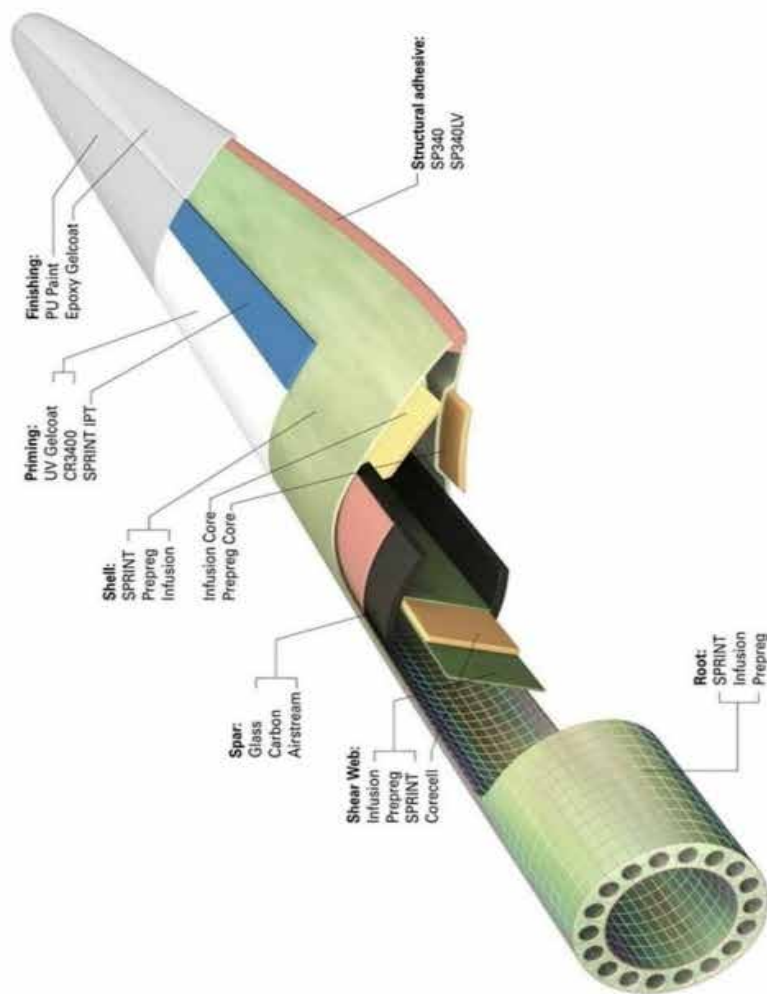
El ejemplo de una turbina eólica es el ejemplo de una turbina eólica.

ANEXO B

CP vs TSR PARA DISTINTO NUMERO DE PALAS (KOTIK, 2016)



ANEXO C
VISTA TIPICA DE MATERIALES USADOS EN ALABES EÓLICOS
(KOTIK, 2016)



ANEXO D
TURBINA EÓLICA EOLO-3000 POTENCIA AJUSTABLE



Product Dimensions *47.2 x 47.2 x 51.2 inches*

Item Weight *66.1 pounds*

Shipping Weight *66.1 pounds (View shipping rates and policies)*

Manufacturer *MAKEMU Srl*

Item model number *E3K_BASIC_3P*

Brand *EOLO 3000*

ANEXO E

CATALOGO PANELES CIRCULARES HAMMER

EMBUTIDOS
tipo panel
led-circulares



WATTS	Ø Corte	Ø Externo	Kelvin	Lúmenes
3w	3"	4"	6500k ó 3200k	240 lm
6w	4"	5"	6500k ó 3200k	480 lm
9w	5"	6"	6500k ó 3200k	720 lm
12w	6"	7"	6500k ó 3200k	960 lm
15w	7"	8"	6500k ó 3200k	1.200 lm
18w	8"	9"	6500k ó 3200k	1.440 lm
24w	10"	12"	6500k ó 3200k	1.920 lm