

Diseño, Simulación y Prototipado de una Turbina Eólica de Baja Velocidad

Pimienta Alvernia Juan Sebastian

Id. 00264889

**Universidad Pontificia Bolivariana
Seccional Bucaramanga
Escuela de ingeniería
2019**

**Diseño, Simulación y Prototipado
de una Turbina Eólica
de Baja Velocidad**

Pimienta Alvernia Juan Sebastian

Id. 00264889

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al
título de:
INGENIERO MECÁNICO**

**Director del Proyecto
Edwin Cordoba Tuta
Ingeniero mecánico**

**Universidad Pontificia Bolivariana
Seccional Bucaramanga
Escuela de ingeniería
2019**

Agradecimientos

Agradezco inmensamente a las personas que hicieron parte del desarrollo del proyecto y que sin ellas la culminación del mismo no hubiese sido posible.

A ludvig quien siempre esta dispuesto a aportar sus ideas para solucionar cualquier problema de la parte física que pueda llegar a presentarse.

A Andres Albis, quien se apersono de la investigación y sin quien esta nunca hubiese llegado a culminar en el tiempo trazado, siempre aportando ideas y ayudando desde su experiencia en cualquier cosa que pudiera.

Agradezco al Ing. Franklin Patiño quien en los momentos más críticos prestó su ayuda de la manera más desinteresada posible, aportando conocimientos y componentes sin los cuales el proyecto no hubiese funcionado.

Por ultimo pero no menos importante, agradezco a todos aquellos que hicieron parte del proyecto directa o indirectamente, familia, amigos y conocidos que de una u otra manera aportaron para que este desarrollo pudiese ser factible.

Contenido

1	DELIMITACIÓN DEL PROYECTO	11
2	ANTECEDENTES	12
3	JUSTIFICACIÓN	13
4	OBJETIVOS	14
4.1	OBJETIVO GENERAL	14
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
5	MARCO TEÓRICO	15
5.1	GENERACIÓN DE ENERGÍA	15
5.2	TURBINAS	16
5.3	AERODINÁMICA	16
5.3.1	BEM	18
5.4	SIMULACIÓN	29
5.4.1	COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS	29
6	METODOLOGÍA	33
6.1	Definición de las condiciones de diseño	33
6.2	Selección de los perfiles alares a trabajar	33
6.3	Modelamiento	38
6.4	Creación del algoritmo	42
6.5	Diseño y simulación	46
6.5.1	Definición de la geometría	54
6.5.2	Definición de la zona de fluido	55
6.5.3	Mallado	56
6.5.4	Simulación	58
6.5.5	Análisis de resultados	59
6.6	Diseño para impresión 3D	61
6.7	Proceso de impresión 3D	62
6.8	Pruebas en físico	65
6.8.1	Definición de la prueba	65
6.8.2	Diseño del montaje de prueba	66
6.8.3	Diseño del circuito de carga	69
6.8.4	Montaje de la prueba	70
6.8.5	Ejecución de la prueba	73

6.8.6	Diseño de sistema de transmisión	74
6.8.7	Retroalimentación del diseño	76
6.8.8	Segunda ejecución de la prueba	78
6.8.9	Resultados de las mediciones.	79
7	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	81
7.1	Diseño y simulación	81
7.2	Impresión 3D	82
7.3	Experimentación	83
8	CONCLUSIONES	86
9	RECOMENDACIONES	87

Lista de Figuras

1	Método para combinar líneas base y formas básicas de grosor	17
2	Análisis de fuerzas axiales	19
3	Análisis de rotativo	20
4	Modelo de elementos de la hoja	22
5	Flujo hacia la turbina	23
6	Fuerzas en el ala	25
7	Gráfica de coeficiente de sustentación vs ángulo de ataque, NACA 009	26
8	Resultados CFD	30
9	NACA 5504	34
10	NACA 6611	35
11	NACA 6612	35
12	NACA 6613	36
13	NACA 6614	36
14	NACA 6615	37
15	NACA 6622	37
16	NACA 6812	38
17	Marco de referencia inicial	39
18	Marco de referencia bidimensional	39
19	Marco de referencia tridimensional	40
20	Código Matlab 1	44
21	Código Matlab 2	44
22	Gráfica r vs M'	45
23	Código para cálculo de potencia	46
24	Diseño de prueba No. 1	47
25	Gráfica de potencia vs velocidad del viento, diseño de prueba No.1	48
26	Diseño de prueba No.2	48
27	Gráfica de potencia vs velocidad del viento, diseño de prueba No.2	49
28	Diseño de Prueba No. 3	50
29	Gráfica de potencia vs velocidad del viento, diseño de prueba No 5	51
30	Diseño de prueba No.4	52

31	Gráfica de potencia vs velocidad del viento, diseño de prueba No.4	52
32	Diseño de prueba No.5	53
33	Gráfica de potencia vs velocidad del viento, diseño de prueba No.5	54
34	Rotor en Design Modeler	55
35	Zona de fluido definida	56
36	Geometría Mallada	57
37	Geometría Mallada.detalle general	57
38	Geometría Mallada-detalle del rotor	57
39	Modelo en CFX	58
40	Gráfica de residuales	59
41	Lineas de campo-vista superior	60
42	Lineas de campo-vista en detalle	60
43	Torque calculado	61
44	Diseño de particiones para impresión 3D	62
45	Impresión 3D	63
46	Ensamblaje	64
47	Ensamblaje	64
48	Ensamblaje	65
49	Flecha conductora entre el rotor y el generador	67
50	Flecha conductora entre el rotor y el generador	67
51	Generador-acople-flecha	68
52	Estructura de soporte	69
53	Circuito de potencia	70
54	Montaje para medición de velocidad del viento	71
55	Montaje para medición de velocidad del viento	71
56	Velocidad promedio del viento	72
57	Punto máximo de la velocidad promedio	72
58	Punto mínimo de la velocidad promedio	73
59	Eje conductor del rotor	75
60	Eje conductor del generador	75
61	Montaje final	77
62	Montaje final - Acople flexible	77
63	Montaje final - Detalle de transmisión	78
64	Modificación de la transmisión	79
65	Montaje definitivo en funcionamiento	80

66	Diseño final - Vista Frontal	81
67	Diseño final - Vista Superior	82
68	Gráfica Potencia vs rpm	84
69	Vista Frontal	90

Lista de Tablas

1	Resultados de las pruebas en físico	80
2	Comparación de cálculos de potencia	82
3	Cálculo de potencia generada	83

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: Diseño, Simulación y Prototipado de una Turbina Eólica de Baja Velocidad

AUTHOR(S): Juan Sebastian Pimienta Alvernia

FACULTY: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: Edwin Jesus Cordoba Tuta

ABSTRACT

En búsqueda de poder aumentar el aprovechamiento de de la energía eólica, se propone diseñar el rotor de una turbina eólica que cumpla con las exigencias que trae consigo un perfil de velocidades de viento tan bajas como las de la región santandereana. Para esto fue necesario diseñar el rotor en función de dicho perfil, lo cual requirió llevar a cabo cálculos aerodinámicos, crear rutinas de simulación para validar la geometría y en ultimas pruebas con un modelo a escala, contrastando lo evaluado virtualmente con la realidad.

KEYWORDS:

Turbina eólica, Energías limpias, Renovable, Diseño, Simulación, CFD

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: Design, Simulation and Prototipe of a Low Speed Wind Turbine

AUTHOR(S): Juan Sebastian Pimienta Alvernia

FACULTY: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: Edwin Jesus Cordoba Tuta

ABSTRACT

In the search to augment the exploitation of wind energy, it is been proposed to design the rotor of a wind turbine that can accomplish with the requirements that comes with such low wind speed profile as the Santander region. For this, it was necessary to design the rotor in function of the speed profile, which required aerodynamic calculations, creating simulation routines to validate the geometry and in last physical experimentation with a scale model, making contrast between the virtual model and the reality.

KEYWORDS:

Wind Turbine, Clean Energies, Renewable, Design, Simulation CFD

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

Dada la creciente demanda energética a nivel mundial y la necesidad por encontrar nuevos métodos de extracción y generación de energía eléctrica, que sean más amigables con el medio ambiente, en muchos casos se recurre a la energía eólica, un recurso completamente renovable, cuya implementación es de un bajo impacto ambiental. Sin embargo, las condiciones de uso son limitadas, las turbinas eólicas comerciales generalmente son de gran tamaño y solo pueden aprovechar vientos de altas velocidades, lo cual limita su uso a zonas costeras principalmente o regiones donde la geografía permita un gran flujo de viento a altas velocidades. Es aquí donde se propone realizar un diseño experimental para micro generación, donde el rotor no se vea limitado por estas condiciones climáticas y pueda operar en diferentes zonas donde los vientos sean de baja velocidad, aun así generando energía eléctrica.

La limitante comienza cuando se analiza el perfil de velocidades del viento en la región, el cual se observa en la figura tal. Se puede denotar que aunque es un recurso completamente renovable, su disponibilidad en la zona de estudio es muy limitada, en algunos casos casi nula, es debido a esto que se plantea una fase de pruebas bajo ambiente controlado y no en campo abierto, ya que no se cuenta con suficiente data histórica sobre en que lugar exacto seria bueno ubicar la turbina, no por la velocidad del viento requerida, sino por el flujo constante que esta necesita para su funcionamiento.

Teniendo en cuenta lo anterior, se propone una metodología de diseño y simulación la cual permita asegurar en lo posible la mayor extracción de energía, modelando la geometría del ala acorde con los resultados de cálculos y simulaciones, creando un bucle en el diseño para dar con el resultado más optimo.

La geometría definida será impresa en 3-D y sometida a pruebas de desempeño simulando las condiciones del perfil de velocidades descrito, contrastando el diseño con las simulaciones para en ultimas trazar posibles optimizaciones del diseño y montaje de pruebas.

Se denota el actual proyecto como una investigación en su primera fase, recomendando continuarla aplicando las optimizaciones que se señalaran al final de análisis del proyecto.

1 DELIMITACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto se plantea como un estudio absolutamente investigativo en su primera fase, se quiere corroborar si la hipótesis de desarrollar un rotor capaz de extraer suficiente energía de corrientes de viento de velocidades tan bajas como para alimentar un generador y obtener energía eléctrica.

Por lo anterior no se fija un mínimo de energía eléctrica a producir, existen muchas variables a introducir en este proceso como para fijar una meta muy ambiciosa para un proyecto apenas naciente y sin ningún estudio previo en la región. Por esto se decide solo recopilar los datos de las pruebas en físico, simulando las condiciones del viento, para poder realizar un paralelo entre el proceso de diseño y simulación del rotor que permita trazar correlaciones que ayuden con el proceso de diseño, optimizando en ultimas la extracción de energía eléctrica a partir del recurso natural.

Se delimita entonces el alcance al diseño y simulación aerodinámica del rotor de la turbina y a las pruebas bajo ambiente controlado con el objeto de optimizar a futuro cualquier aspecto que se pudiese dentro de lo contemplado en la investigación. Por esta razón las demás geometrías que no estuviesen sujetas a fuerzas críticas no fueron tomadas en cuenta como objeto de estudio y fueron seleccionadas o diseñadas a criterio del diseñador, acorde lo meritaba la situación.

2 ANTECEDENTES

En el desarrollo de las turbinas eólicas se pueden encontrar diversos referentes históricos acerca de su evolución tanto en el diseño como en su desempeño sin embargo un desarrollo como el presente no se ha aplicado antes a esta tecnología, por lo que el objeto principal es sentar bases de desarrollo que pudiesen permitir aumentar la producción de energía en la región que presenta una muy baja velocidad de viento en general.

Cabe mencionar que el proyecto esta inspirado en un estudio en Arabia Saudita [19], donde se lleva a cabo un diseño para velocidades de viento inferiores a las que se suelen manejar para el diseño de estas turbinas. Sin embargo, el perfil de velocidades de dicho estudio es muy superior al que se maneja, por lo tanto las condiciones y el diseño final varían por completo.

También se encuentran un par de desarrollos con intenciones similares, donde el enfoque se basa en optimizar geometrías y tamaños de los rotores para así poder aprovechar corrientes de viento de velocidades inferiores a las de diseño tradicional, como el caso de Zakaria [17], donde se pretende modelar aerogeneradores a escala de 1 centímetro de diámetro, para extraer energía del viento, obteniendo al final un modelo funcional que puestas en conjunto pudiesen alimentar pequeños sistemas eléctricos.

Por otra parte, encontramos el ejemplo plausible de [10] Pourrajabain, en el cual diseñan el rotor a partir de 5 m/s de velocidad del viento, un valor bastante cercano a lo que se maneja en el proyecto planteado pero termina, al igual que los demás, variando en gran parte de los resultados, principalmente por la metodología usada, procesos mucho más complejos como lo son algoritmos genéticos y altos códigos de programación que ayudan a mejorar los resultados finales y permiten tener un diseño más acertado hacia la generación de energía. Se destaca la cantidad de potencia generada en el rango de 0.5 a 1 MW.

3 JUSTIFICACIÓN

Teniendo conocimiento de la actual demanda energética y de la necesidad de un cambio en el paradigma de producción de energía en el mundo, es necesario dar un vuelco hacia las llamadas energías renovables, sector que está siendo ampliamente investigado actualmente y esta generando un cambio positivo en el medio ambiente y en las actividades humanas, haciendo que estas sean de carácter sostenibles y sustentables.

Basados en lo anterior, todos los esfuerzos que se tengan disponibles deben ser empleados para poder hacer realidad este cambio de página en la industria energética y poder eliminar la producción a base de combustibles fósiles.

Es por esta razón que se plantea el proyecto, para poder diversificar mas aún en este sector, ya que bien se sabe que la energía eólica es un recurso completamente renovable, los requisitos para poder usarla, debido a criterios ingenieriles de diseño dados por los fabricantes, son muy limitados, y se requieren de velocidades del viento relativamente altas, perfiles de velocidades que generalmente solo son concebibles en las costas de los países.

En ultimas, se traza el proyecto con el ideal de que este recurso renovable pueda estar a disposición, no solo de la región de Santander, sino también de todas aquellas regiones del país que no cuentan con un potencial eólico explotable, basado en las tecnologías existentes hoy en día y asequibles para todo tipo de comunidades.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

- Diseñar y construir un prototipo de rotor de turbina eólica, el cual permita el funcionamiento de la misma en un rango diferente de velocidades del viento, magnitudes mas bajas, y se pueda adaptar más fácilmente a las condiciones climáticas de la región santandereana.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar un alabe para el aerogenerador, que acorde con las características del viento y condiciones climáticas de la región logren proporcionar el desempeño aerodinámico deseado.

Resultado: Planos del alabe y del rotor completo de la turbina.

Indicador: Los planos se realizarán usando el software CAD, SolidWorks.

- Desarrollar un modelo de simulación que permita evaluar el desempeño del rotor a través de ensayos y procesos de calculo que describan el comportamiento aerodinámico de éste.

Resultado: Reporte de la simulación de fuerzas y esfuerzo en el alabe del rotor.

Indicador: La simulación se realizará usando el software ANSYS a través de CFD y BEM.

- Fabricar un prototipo a escala del rotor mediante el uso de la impresión 3D.

Resultado: Prototipo en físico de un alabe a escala y el rotor a tamaño real.

Indicador: El prototipo será construido de acuerdo a los planos generados.

- Validar los modelos y resultados encontrados en la simulación confrontándolos con datos resultantes de la experimentación del prototipo.

Resultado: Informe de la experimentación en físico con el rotor acoplado a un generador, donde se harán mediciones de voltaje y corriente.

Indicador: Las pruebas se realizarán para una velocidad máxima del viento de 4 m/s.

5 MARCO TEÓRICO

En primera instancia, para poder entender y llevar a cabo todo el desarrollo que requiere el proyecto, es necesario poseer conocimientos en 4 áreas fundamentales, generación de energía, turbinas, aerodinámica y simulación.

Para poder tener un mejor entendimiento de a lo que conlleva cada una de estas áreas específicas, se tocaran como secciones independientes a continuación.

5.1 GENERACIÓN DE ENERGÍA

En un comienzo, debemos definir la manera básica como es generada la energía eléctrica.

El proceso consta de convertir energía mecánica, generalmente a través de movimiento rotativo, en energía eléctrica, haciendo uso de un generador, el cual acorde con las necesidades de la aplicación, puede ser de corriente alterna o directa. Generalmente en el caso de los aerogeneradores, son usados generadores de corriente alterna. El funcionamiento de un generador será explicado a continuación.

Un generador está basado en el descubrimiento de Faraday de inducción magnética, el cual en palabras sencillas, dice que se puede generar energía eléctrica variando un campo magnético en una bobina, formando cada uno de estos componentes las partes básicas que comprende un generador, rotor y estátor respectivamente.[9]

El rotor del generador es acoplado a una flecha que recibe torque de diversas manera, dependiendo del método de generación que se este tratando, ya sea una planta termo-eléctrica, hidroeléctrica o en este caso particular, una turbina eólica.[1]

5.2 TURBINAS

Punto esencial a definir, es qué es una turbina, cómo funciona y sus componentes básicos.

Una turbina es una maquina rotativa usada para convertir trabajo de flujo en trabajo de flecha, mayoritariamente usadas en el sector energético, ya sea en hidroeléctricas o termoeléctricas.

Los tipos y usos de las turbinas varían en gran cantidad, turbinas hidráulicas, de gas, según su función, convertir energía, propulsar aeronaves, etc.

Los componentes que la componen, al igual que un generador, son un rotor y un estátor. El rotor es el lugar donde se da la conversión de energía, ya que este se comprende de una flecha, que esta acoplada a una serie de alabes, que pueden ser de diferentes geometrías según la turbina y la aplicación. El fluido que es impulsado hacia el rotor por el estátor, impacta contra los alabes, generalmente a altas velocidades y presiones, causando que estos ejerzan una fuerza rotativa en la flecha, y en ultimas se genere un movimiento rotativo.[5]

5.3 AERODINÁMICA

Definida como la manera en que se mueve el aire a través de objetos, las reglas que impone la rama de la ingeniería que estudia este fenómeno, explican como es que un avión puede volar, la carga necesaria para que despegue un cohete rumbo al espacio y el desempeño que puede tener un automóvil deportivo basado solo en su diseño aerodinámico.[2]

Su estudio se basa principalmente en las fuerzas de arrastre y levante que se generan cuando el aire, o algún otro gas, pasa a través de cualquier superficie. Cabe denotar que para entender la manera como funciona la aerodinámica, se debe tener un previo estudio en mecánica de fluidos, que nos permita entender de conceptos básicos tales como presión, viscosidad, entre otros.

La aerodinámica hace parte fundamental de la industria aeronáutica, ya que esta es la base sobre la que se diseñan aviones, de lo contrario no habría una manera certera de saber si el diseño propuesto funcionaría o no.

Con el tiempo la aerodinámica ha sido introducida en otros campos, construcción, obras civiles, deportes, automovilismo, y hoy se puede

En el reporte número 824 de la NACA[15], la organización hace publica la investigación y toda una base de datos acerca de las familias que se conforman a partir de su denominación y su desempeño.

agrupar los perfiles en familias según su denominación, 4 dígitos, 5 dígitos y 6 dígitos, ocupando cada una de estas categorías un sistema numérico en su nombre, el cual, si se conoce, vislumbra características de su geometría.

Dentro del estudio de la aerodinámica, surge un método, considerado el mas adecuado para la simulación y el diseño de alabes o alas, dependiendo si se trata de una turbina, o una aeronave, este método es el BEM, Blade Element Momentum Theory[20], el cual será explicado a continuación.

5.3.1 BEM

El BEM consiste en modelar el rotor como un disco actuador, el cual es dividido en volúmenes de control concéntricos y toma como idealizaciones los siguientes elementos:

- Flujo incompresible
- Flujo no viscoso
- Flujo simétrico al eje de entrada
- Numero de alas infinito

A partir de las asunciones anteriores, se crea un modelamiento matemático el cual se muestra y se explica a continuación. Tanto las ecuaciones como el modelo general se divide en dos partes, teoría de momento y teoría de elementos del ala.

Teoría de momento

A su vez, la teoría de momento se divide en dos fases, un análisis axial y un análisis rotativo del volumen de control.

Análisis axial

En la figura 2 se puede observar la manera como se trata el modelamiento axial de la turbina, donde se reconocen 4 zonas con las siguientes características:

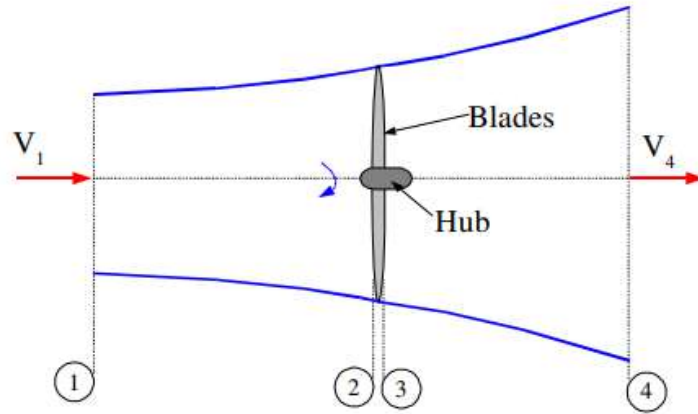
- $V_2 = V_3$

- $P_1 = P_4$
- No hay fricción entre 3 y 4

A partir de lo anterior se aplica la ecuación de Bernoulli y se obtiene la ecuación (1).

$$p_2 - p_3 = \frac{1}{2}\rho(V_1^2 - V_4^2) \quad (1)$$

Figura 2: Análisis de fuerzas axiales



Fuente: Wind Turbine Blade Analysis using the Blade Element Momentum Method, version1.1, Grant Ingram, Página 5.

Denotando que fuerza es presión por area se obtiene:

$$dF_x = \frac{1}{2}\rho(V_1^2 - V_4^2)dA \quad (2)$$

Se define a como factor de inducción axial:

$$a = \frac{V_1 - V_2}{V_2} \quad (3)$$

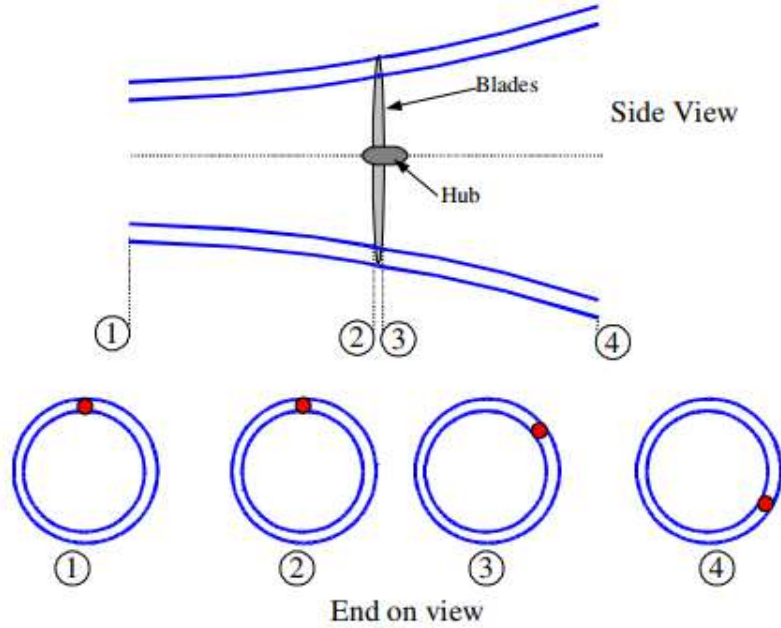
sustituyendo la ecuación (3) en (2) obtenemos:

$$dF_x = \frac{1}{2}\rho V_1^2 [4a(1 - a)]2\pi \quad (4)$$

Análisis rotativo

Se considera un tubo anular como el mostrado en la figura 3, donde se muestran 4 etapas. Entre los puntos 2 y 3 la el movimiento rotacional de la turbina le imprime movimiento al tubo anular.

Figura 3: Análisis de rotativo



Fuente: Wind Turbine Blade Analysis using the Blade Element Momentum Method, version1.1, Grant Ingram, Página 7.

Aplicando la teoría de conservación de momento en el sistema, se dice que la estela de la hoja gira con una velocidad angular ω y que la hoja gira con una velocidad angular Ω . A lo anterior se le aplica el siguiente modelamiento:

$$\text{Momento de inercia de un anular, } I = mr^2 \quad (5)$$

$$\text{Momento angular, } L = I\omega \quad (6)$$

$$\text{Torque} = T = \frac{dL}{dt} \quad (7)$$

$$T = \frac{dI\omega}{dt} = \frac{d(mr^2\omega)}{dt} = \frac{dm}{dt}r^2\omega \quad (8)$$

Así que para un elemento pequeño el torque sería:

$$dT = d\dot{m}\omega r^2 \quad (9)$$

Ahora, para el elemento anular rotativo:

$$d\dot{m} = \rho AV_2 \quad (10)$$

$$d\dot{m} = \rho 2\pi r dr V_2 \quad (11)$$

$$dT = \rho 2\pi r dr V_2 \omega r^2 = \rho V_2 \omega r^2 2\pi r dr \quad (12)$$

Definiendo a' como el factor de inducción angular:

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (13)$$

Recordando que $V_2 = V_1(1 - a)$:

$$dT = 4a'(1 - a)\rho V\Omega r^3 \pi dr \quad (14)$$

La teoría de momento queda entonces definida con las ecuaciones (4) y (14)

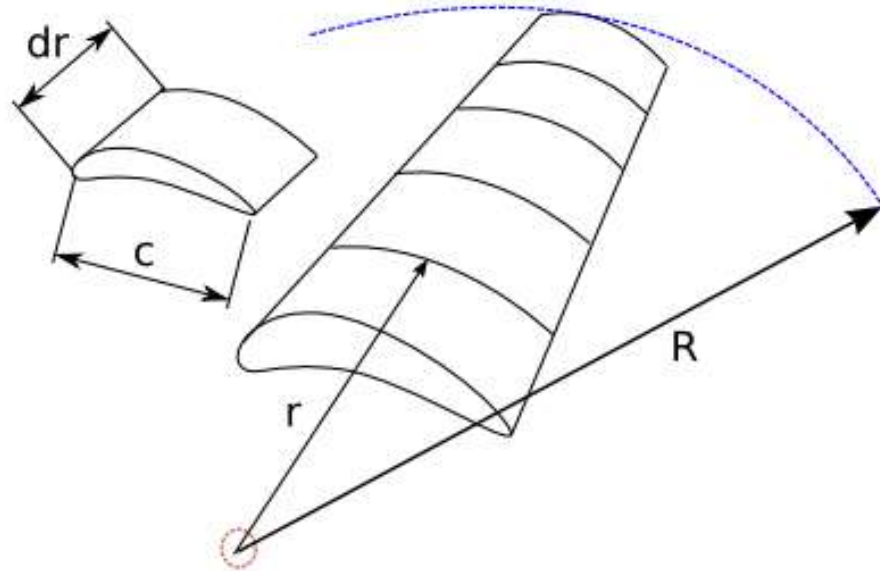
Teoría de elementos del ala

Para comenzar, esta teoría se basa en dos principales asumpciones:

- No existe interacciones aerodinámicas entre diferentes elementos de la hoja

- Las fuerzas en los elementos de la hoja son unicamente determinadas por los coeficientes de arrastre y sustentación

Figura 4: Modelo de elementos de la hoja



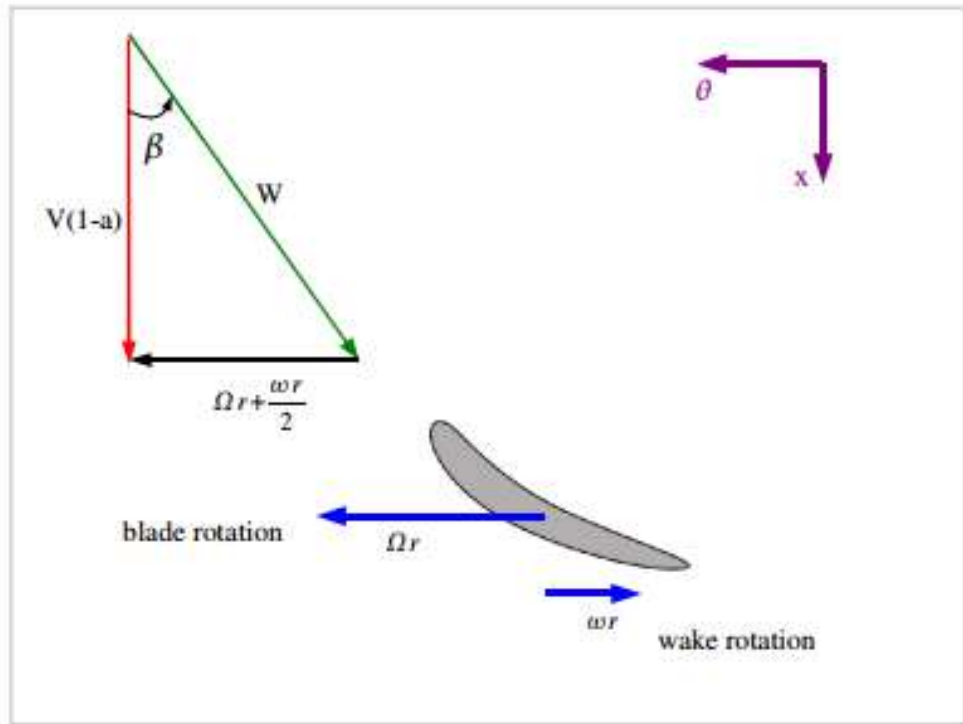
Fuente: Wind Turbine Blade Analysis using the Blade Element Momentum Method, version1.1, Grant Ingram, Página 8.

Se considera la hoja dividida en N elementos como se muestra en la figura 4. Cada uno de ellos experimentara fuerzas ligeramente distintas, por lo que poseen una velocidad rotacional, una longitud de cuerda y un angulo de torsión diferentes. Punto clave de la teoría de elementos es dividir en suficientes partes el ala, usualmente entre 10 y 20.

Flujo Relativo

Una gran cantidad de datos de coeficientes de arrastre y sustentación se encuentran disponibles pero estos datos son recopilados de manera experimental en un túnel de viento, estáticamente, por lo tanto hay que realizar un ajuste debido al marco de referencia rotacional proporcionado por la turbina.

Figura 5: Flujo hacia la turbina



Fuente: Wind Turbine Blade Analysis using the Blade Element Momentum Method, version1.1, Grant Ingram, Página 9.

Tomando en cuenta las figuras 2 y 3, se puede observar que el flujo en la turbina empieza en el punto 2 y termina en el punto 3, se hacen las siguientes inferencias:

- El fluido entra al rotor sin velocidad rotacional
- A la salida de la turbina el fluido rota con una velocidad rotacional ω
- La velocidad promedio de rotación del fluido es $\omega/2$
- La hoja rota con una velocidad Ω
- la velocidad tangencial promedio que experimenta la hoja es $\Omega r + \frac{1}{2}\omega r$

El ultimo ítem se puede apreciar con claridad en la figura 5.

A partir de las anteriores condiciones planteadas, se realiza el siguiente modelamiento:

$$\Omega r + \frac{\omega r}{2} = \Omega r(1 + a') \quad (15)$$

Retomando la ecuación 3:

$$\tan\beta = \frac{\Omega r(1 + a')}{V(1 - a)} \quad (16)$$

Donde V representa la velocidad del fluido, el valor de β variara entre cada elemento de la hoja. La razón de velocidad de la punta local λ_r se define como:

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{V} \quad (17)$$

La expresión para $\tan\beta$ se puede simplificar:

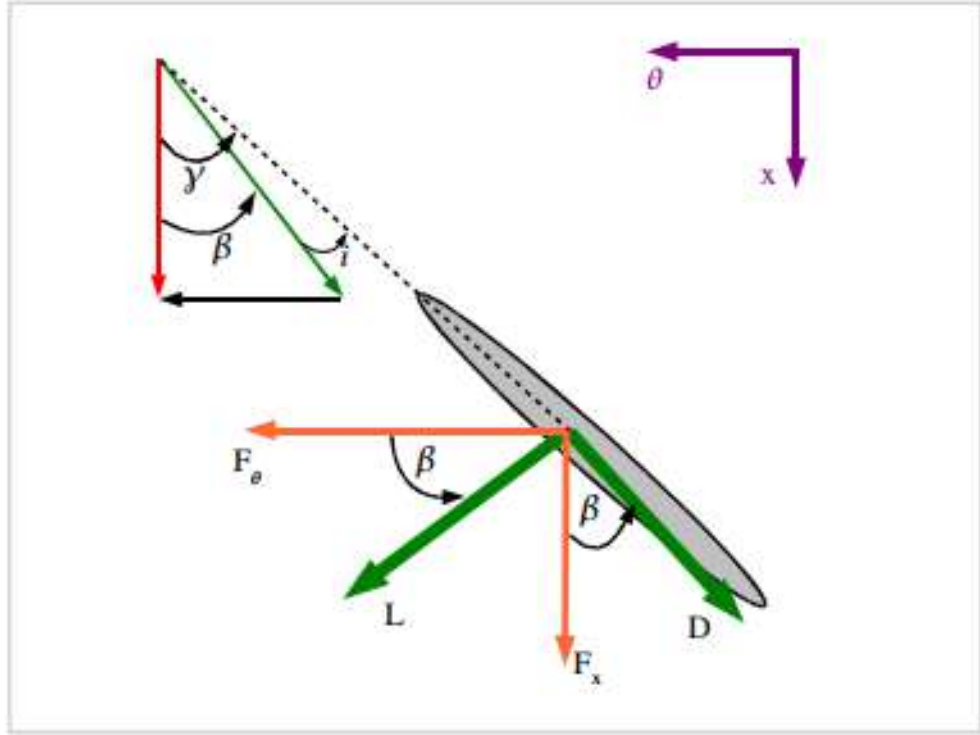
$$\tan\beta = \frac{\lambda_r(1 + a')}{(1 - a)} \quad (18)$$

De la figura 5 aparece la siguiente relación:

$$W = \frac{V(1 - a)}{\cos\beta} \quad (19)$$

Elementos de la hoja

Figura 6: Fuerzas en el ala



Fuente: Wind Turbine Blade Analysis using the Blade Element Momentum Method, version1.1, Grant Ingram, Página 10.

A partir de la figura 6 se deduce que por definición las fuerzas de arrastre y sustentación son respectivamente perpendiculares y paralelas al flujo entrante. De lo anterior se lleva a cabo el siguiente modelo diferencial.

$$dF_{\theta} = dL \cos \beta - dD \sin \beta \quad (20)$$

$$dF_x = dL \sin \beta + dD \cos \beta \quad (21)$$

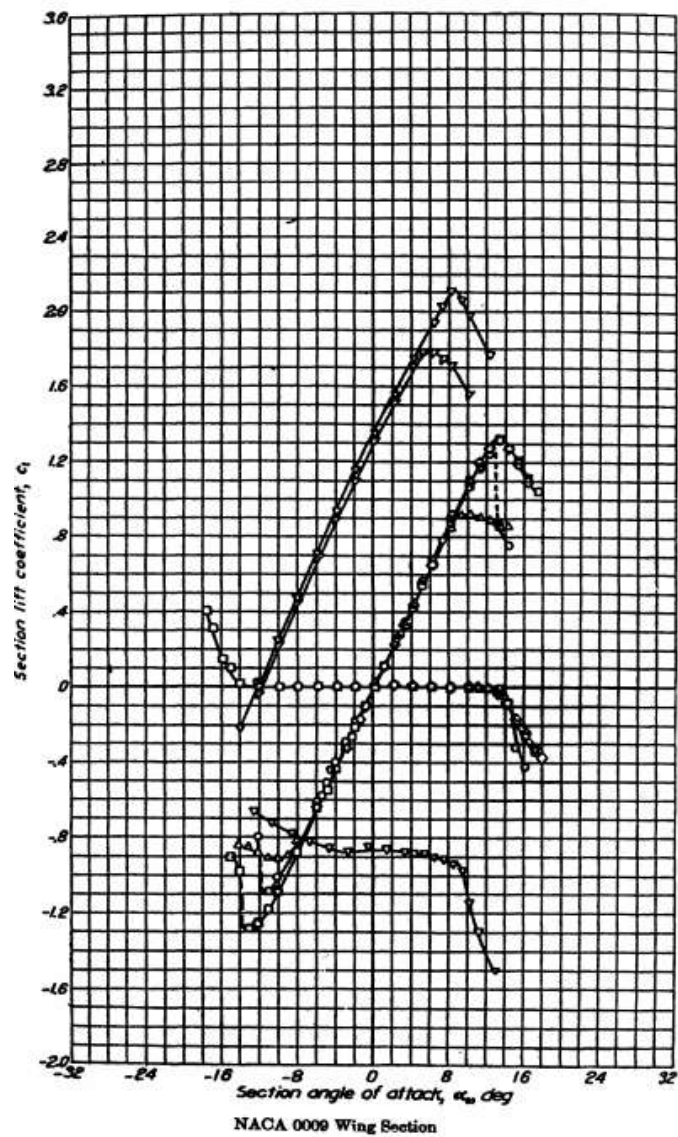
Donde dL y dD son los diferenciales de las fuerzas de sustentación y arrastre. Acorde con su definición, estos coeficientes se pueden definir de la siguiente manera:

$$dL = C_L \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (22)$$

$$dD = C_D \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (23)$$

Los coeficientes de sustentación y arrastre requeridos por las ecuaciones 22 y 23 son tomados a partir de las gráficas de los resúmenes de la NACA[15], como la que se muestra en la figura 7.

Figura 7: Gráfica de coeficiente de sustentación vs ángulo de ataque, NACA 009



Fuente: Summary of Airfoil Data, Ira H. Abbot, Albert E. von Doenhoff, Louis S. Stivers jr. Página 134.

Ahora, si se tienen B número de paletas, combinando las ecuaciones 20 y 22 se observa que:

$$dF_x = B \frac{1}{2} \rho W^2 (C_L \sin \beta + C_D \cos \beta) c dr \quad (24)$$

$$dF_\theta = B \frac{1}{2} \rho W^2 (C_L \cos \beta - C_D \sin \beta) c dr \quad (25)$$

Obteniendo el torque al multiplicar la fuerza tangencial por el radio:

$$dT = B \frac{1}{2} \rho W^2 (C_L \cos \beta - C_D \sin \beta) c r dr \quad (26)$$

Notando que las fuerzas de arrastre tienen un claro efecto en las ecuaciones, se expresan los términos β y W en términos de factores de inducción:

$$dF_x = \sigma' \pi \rho \frac{V^2 (1 - a^2)}{\cos^2 \beta} (C_L \sin \beta + C_D \cos \beta) r dr \quad (27)$$

$$dT = \sigma' \pi \rho \frac{V^2 (1 - a^2)}{\cos^2 \beta} (C_L \cos \beta - C_D \sin \beta) r^2 dr \quad (28)$$

Donde σ' es llamada solidez local y es definida como:

$$\sigma' = \frac{Bc}{2\pi r} \quad (29)$$

Corrección a las pérdidas de la punta

A causa de perdidas producidas por vórtices en la punta de las alas, se introduce un factor de corrección el cual va de 0 a 1.

$$Q = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[\exp \left(- \left(\frac{B/2 [1 - r/R]}{(r/R) \cos \beta} \right) \right) \right] \quad (30)$$

Este factor luego es aplicado en las ecuaciones 4 y 14:

$$dF_x = Q\rho V_1^2[4a(1-a)]\pi r dr \quad (31)$$

$$dT = Q4a'(1-a)\rho V\Omega r^3\pi dr \quad (32)$$

Ecuaciones BEM

En ultimas, podemos encontrar que el método se define en un juego de 6 ecuaciones las cuales se presentan a continuación:

$$dF_x = Q\rho V_1^2[4a(1-a)]\pi r dr \quad (33)$$

$$dT = Q4a'(1-a)\rho V\Omega r^3\pi dr \quad (34)$$

$$dF_x = \sigma'\pi\rho\frac{V^2(1-a^2)}{\cos^2\beta}(C_L\sin\beta + C_D\cos\beta)r dr \quad (35)$$

$$dT = \sigma'\pi\rho\frac{V^2(1-a^2)}{\cos^2\beta}(C_L\cos\beta - C_D\sin\beta)r^2 dr \quad (36)$$

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma'[C_L\sin\beta + C_D\cos\beta]}{4Q\cos^2\beta} \quad (37)$$

$$\frac{a'}{1-a} = \frac{\sigma'[C_L\cos\beta - C_D\sin\beta]}{4Q\lambda_r\cos^2\beta} \quad (38)$$

Las anteriores ecuaciones son resueltas a través de métodos numéricos e iteraciones hasta hallar el punto de convergencia deseado, el cual es designado por el diseñador.

5.4 SIMULACIÓN

Teniendo en cuenta que la simulación se toma como la representación o reproducción de los fenómenos que ocurren en la vida o situaciones determinadas, bajo medios y condiciones determinadas, basándose en un moldeamiento matemático que prediga dicho comportamiento que se busca estudiar, se puede expresar de una manera mas sencilla, como la emulación de eventos a través de un entorno matemático y físico.

Habiendo dicho lo anterior, cabe denotar que hoy en día gracias a los avances tecnológicos, existen una gran variedad de ayudas para facilitar el proceso de modelamiento y simulación de un determinado evento, como lo es el software ANSYS en el cual se trabajará, en base a los métodos de CFD, CFX, BEM y FVM.[8]

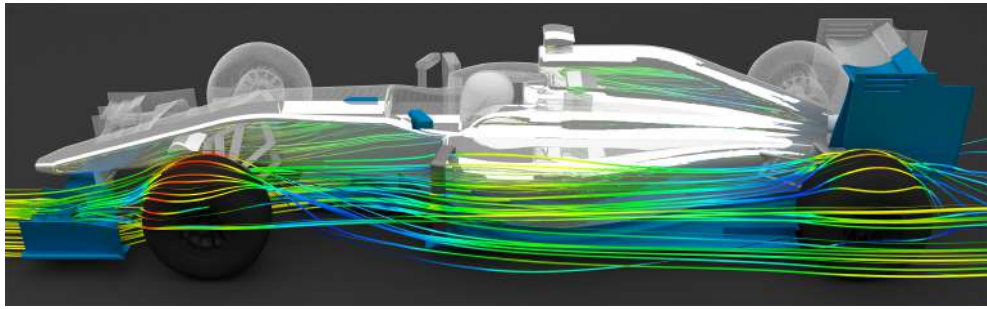
Siendo CFD parte fundamental del algoritmo de diseño y simulación del proyecto, se procede a profundizar en él.

5.4.1 COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

Traducido como dinámica de fluidos computacionales, CFD se ha posicionado como una de las maneras más efectivas para reproducir fenómenos físicos, simular condiciones de flujo o cualquier otra aplicación para la cual se le requiera, siempre y cuando se estén trabajando con fluidos.

Se define como una herramienta de simulación computacional, la cual puede simular el comportamiento de sistemas que involucren fluidos, intercambio de calor, entre otros procesos. Simula resolviendo ecuaciones de fluidos acorde al sistema basándose en regiones específicas y condiciones de barrera dadas por el diseñador.[[3]]

Figura 8: Resultados CFD



Fuente: <https://www.simscale.com/docs/content/simwiki/cfd/whatis CFD.html>

El proceso de simulación comprende una serie de ecuaciones y modelos matemáticos los cuales son resueltos dadas las especificaciones de la situación, es aquí donde se encuentra la parte sustancial de una simulación, ya que no se trata de las imágenes coloridas que se puedan obtener, como en la figura 8, se debe tener real conocimiento del proceso tras bambalinas de lo contrario la simulación no significa nada. Aquí entran a jugar lo que se conoce como ecuaciones gobernantes, las cuales son:

- Conservación de masa: Ecuación de continuidad
- Conservación de momento: Ecuación de momento de la segunda ley de Newton
- Conservación de energía: Primera ley de la termodinámica o ecuación de energía.[7]

Los anteriores principios dictan que la masa, el momento y la energía se conservan en un sistema de carácter cerrado, lo que entra debe salir. Se puede llegar a pensar que si la simulación resulta siendo solo un proceso matemático, ¿cuál es la razón para que halla tanto estudio en el tema y los códigos comerciales requieran de tanto recursos tanto computacionales como monetarios?. Esto se puede responder al observar las ecuaciones de Navier-Stokes que resumen los 3 items anteriormente mencionados al describir la manera cómo la densidad, velocidad, temperatura y presión de un fluido en movimiento se relacionan entre sí. A continuación en las ecuaciones 39 a 43 se pueden observar el sistema de ecuaciones de Navier-Stokes[4].

Continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial z} = 0 \quad (39)$$

Momento en X

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u \omega)}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \quad (40)$$

Momento en Y

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v \omega)}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) \quad (41)$$

Momento en Z

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v \omega)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \omega^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega^2)}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \quad (42)$$

Energía

$$\begin{aligned} \frac{\partial(E_T)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_T)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_T)}{\partial y} + \frac{\partial(\omega E_T)}{\partial z} = & -\frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(\omega p)}{\partial z} - \\ & \frac{1}{Re_r Pr_r} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + \frac{1}{Re_r} \left(\frac{\partial}{\partial x} (u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + \omega\tau_{xz}) + \right. \\ & \left. \frac{\partial}{\partial y} (u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + \omega\tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u\tau_{xz} + v\tau_{yz} + \omega\tau_{zz}) \right) \end{aligned} \quad (43)$$

Donde se evidencian las siguientes variables:

Coordenadas: (x, y, z) Componentes de la velocidad: (u, v, w)

Tiempo: t Densidad: ρ Energía total: E_T

Presión: p Esfuerzo: τ Flujo de calor: q

Número de Reynolds: Re Número de Prandtl: Pr

Grosso modo, un proceso de simulación para fluidos requiere solucionar las ecuaciones previamente mencionadas, como se puede observar, su complejidad es bastante alta, es por esta razón que el uso de software se ha vuelto imperativo en las simulaciones, ya que el código comercial trae consigo funciones que simplifican en gran parte el proceso tanto de preparación como el de solución y análisis de los resultados y en ultimas puede reducir el tiempo de cómputo.

6 METODOLOGÍA

El desarrollo del proyecto se divide en las siguientes etapas:

- 1 Definición de las condiciones de diseño
- 2 Selección de los perfiles alares a trabajar
- 3 Modelamiento
- 4 creación del algoritmo
- 5 Diseño y simulación
- 6 Diseño para impresión 3D
- 7 Pruebas en físico

6.1 Definición de las condiciones de diseño

En primera instancia, se definieron las condiciones de diseño del rotor, las cuales constan principalmente del radio, la velocidad del viento y un rango de velocidades angulares en el cual la turbina se movería.

- Radio del ala : 0.75 m
- Velocidad del viento : 4 m/s
- Rango de velocidad angular : 150 - 200 rpm

6.2 Selección de los perfiles alares a trabajar

La selección de los perfiles alares a trabajar se llevó a cabo acorde con los datos entregados por el software Qblade, el manual de perfiles para turbinas eólicas[13] y el resumen de datos de perfiles alares a baja velocidad[16], dentro de los cuales se seleccionaron perfiles de la serie 5 y 6 para analizar en el software potenciando el desempeño aerodinámico y como refuerzo estructural se seleccionó el perfil 0024 de la NACA.

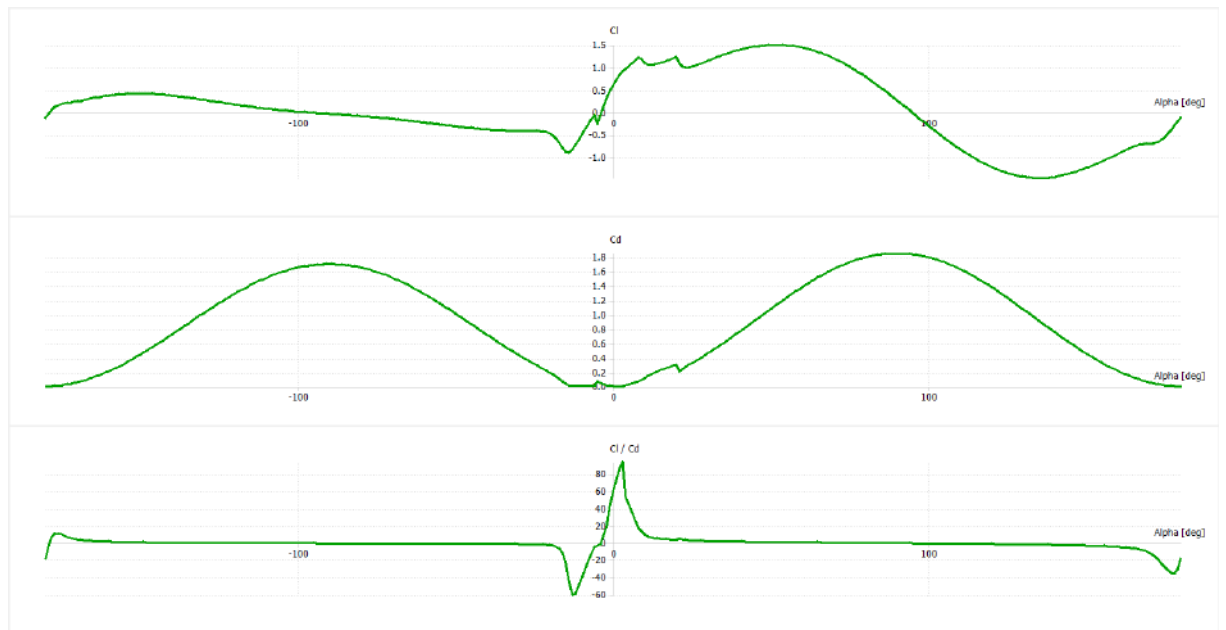
Las referencias evaluadas en el proceso de selección de perfil son las siguientes:

- 5504

- 6611
- 6612
- 6613
- 6614
- 6615
- 6622
- 6812

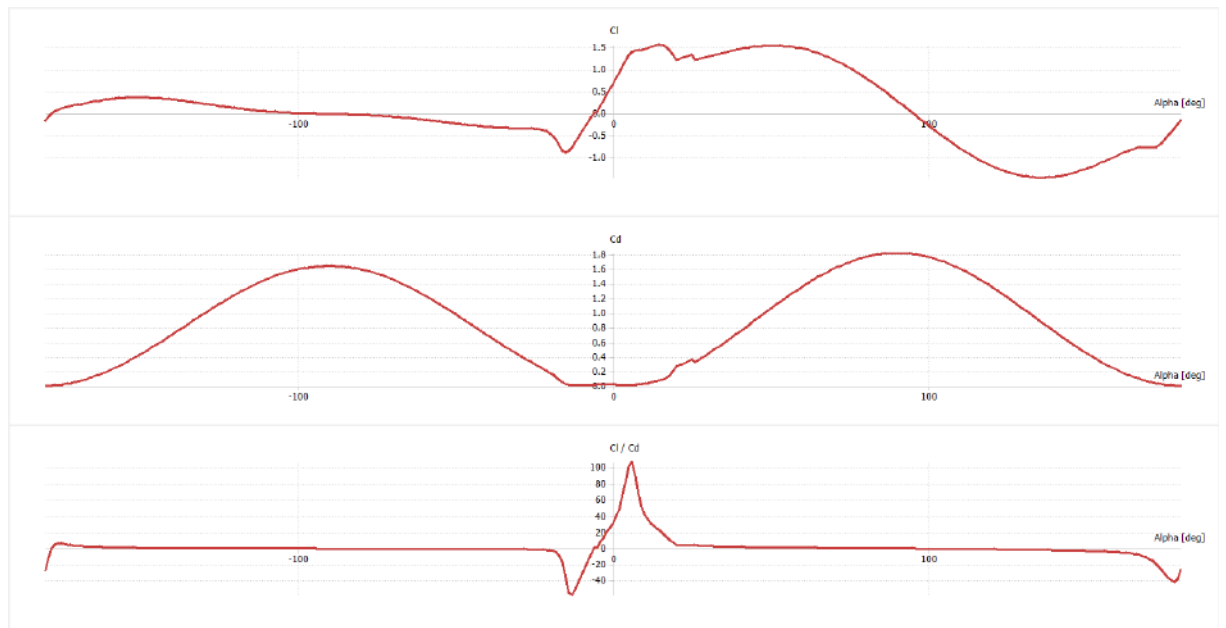
Luego de analizar detenidamente los coeficientes de cada uno de los perfiles seleccionados, se concluyo que el mejor a aplicar, dada las condiciones del diseño, era el NACA 6611, ya que a pesar de que no es el que presenta el mayor punto de coeficiente de sustentación, si es el que presenta la mayor relación entre los coeficientes de arrastre y de sustentación, precisamente lo que se busca en un diseño optimo. En las figuras 9 a 16 se puede evidenciar las gráficas que llevaron a tomar esta decisión

Figura 9: NACA 5504



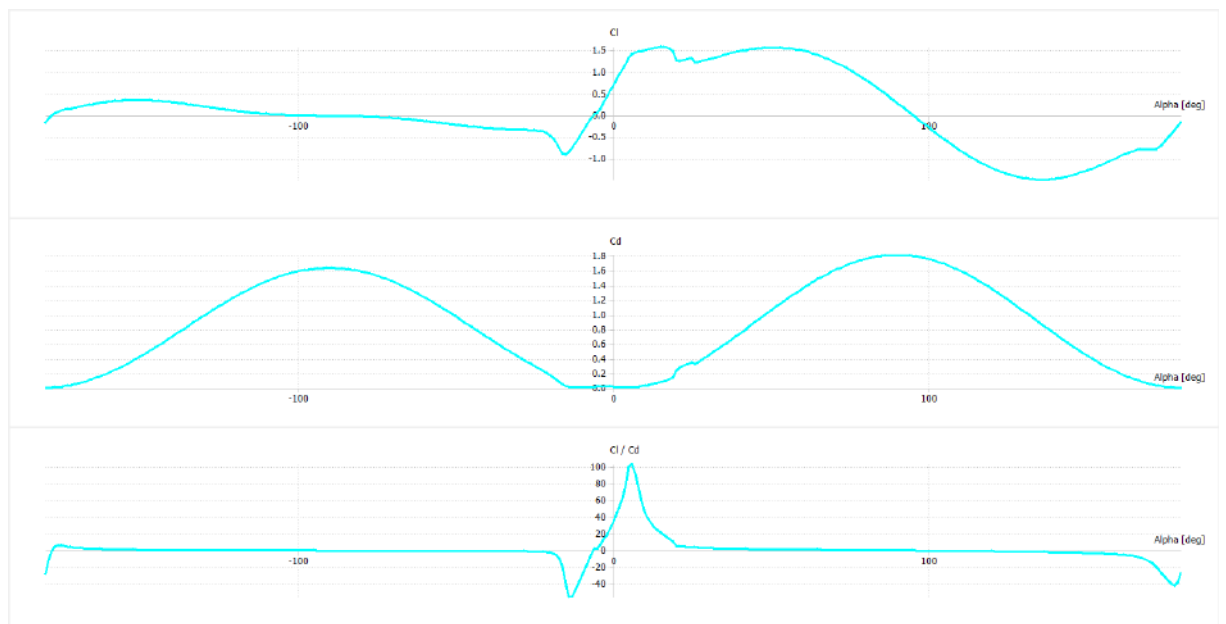
Fuente: Autor

Figura 10: NACA 6611



Fuente: Autor

Figura 11: NACA 6612



Fuente: Autor

Figura 12: NACA 6613

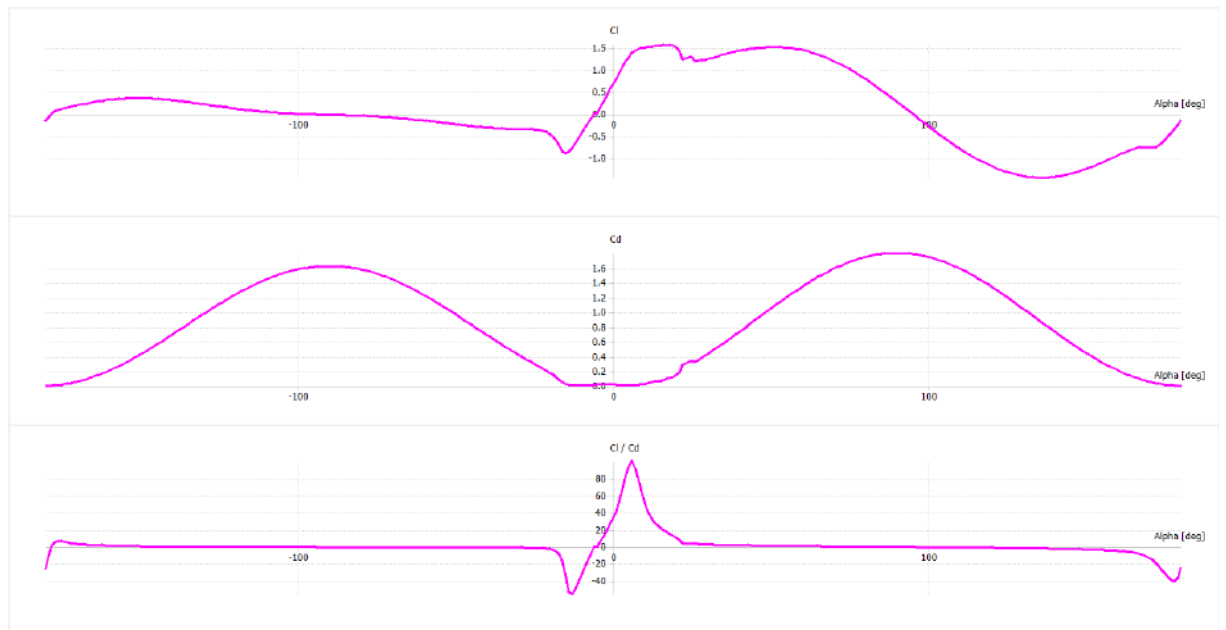
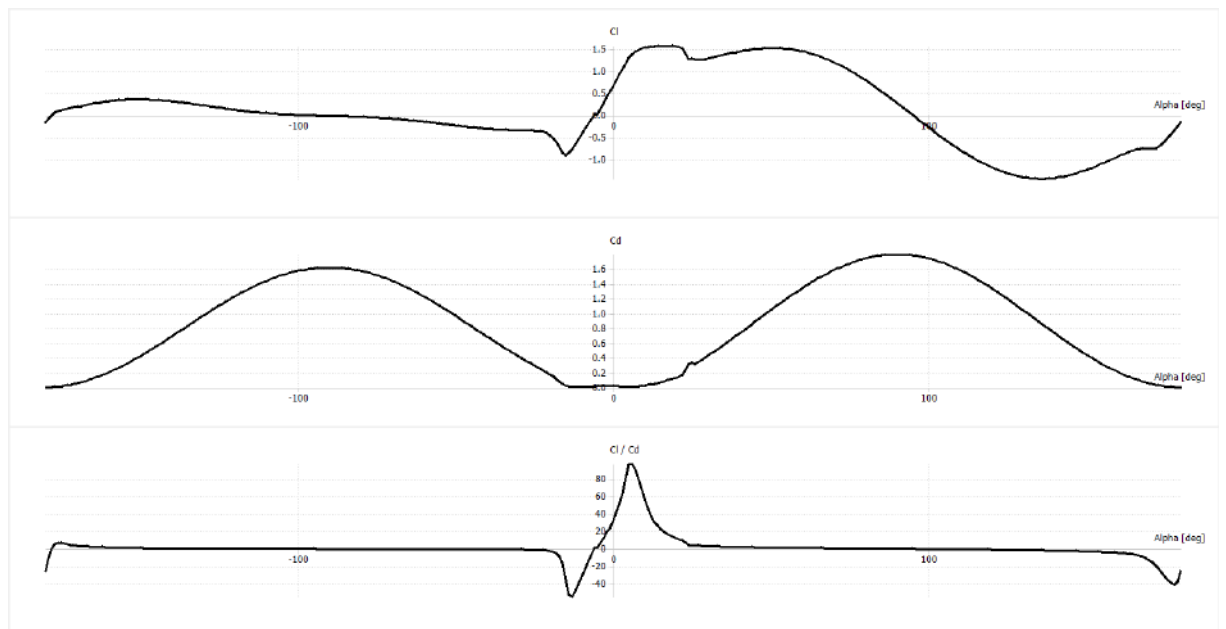
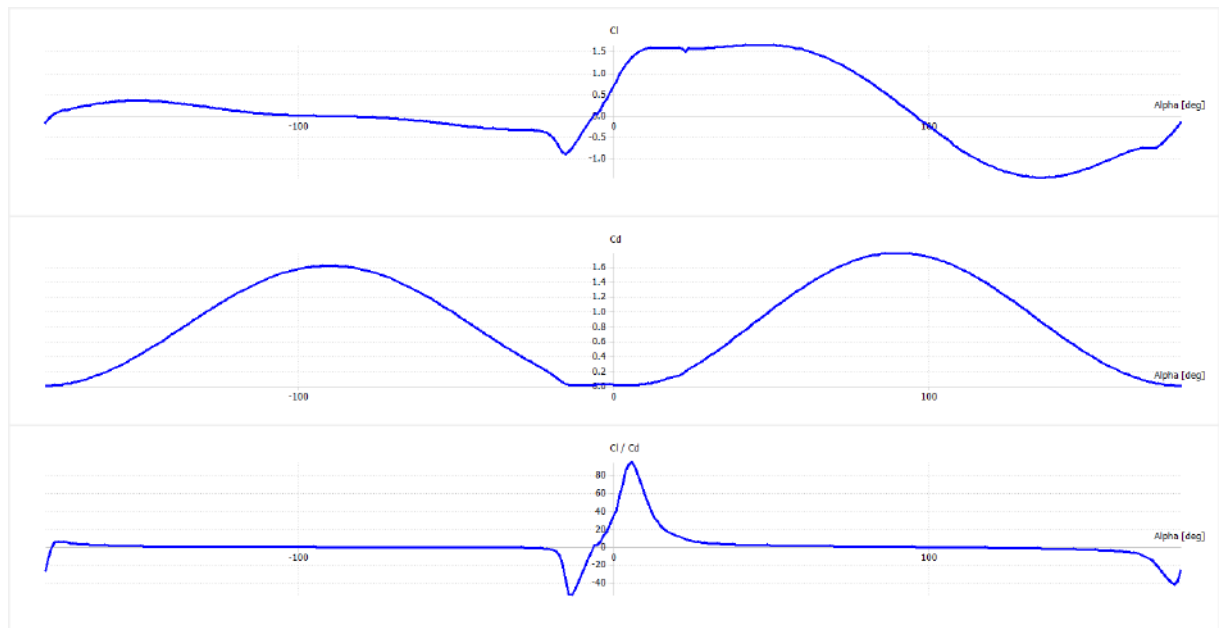


Figura 13: NACA 6614



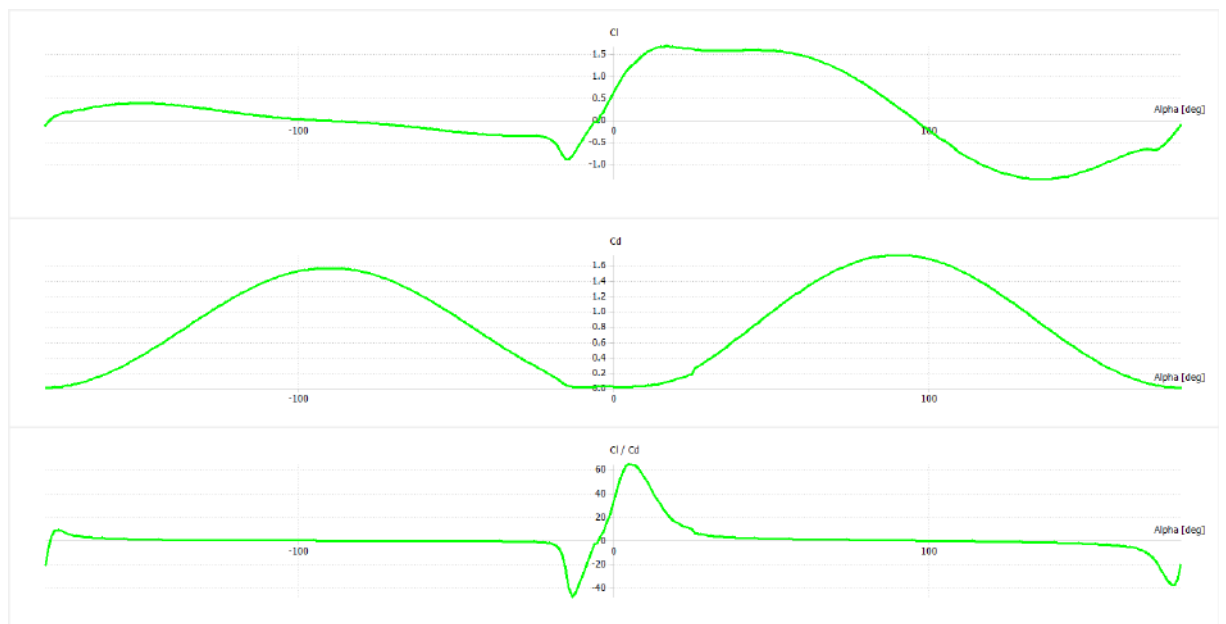
Fuente: Autor

Figura 14: NACA 6615



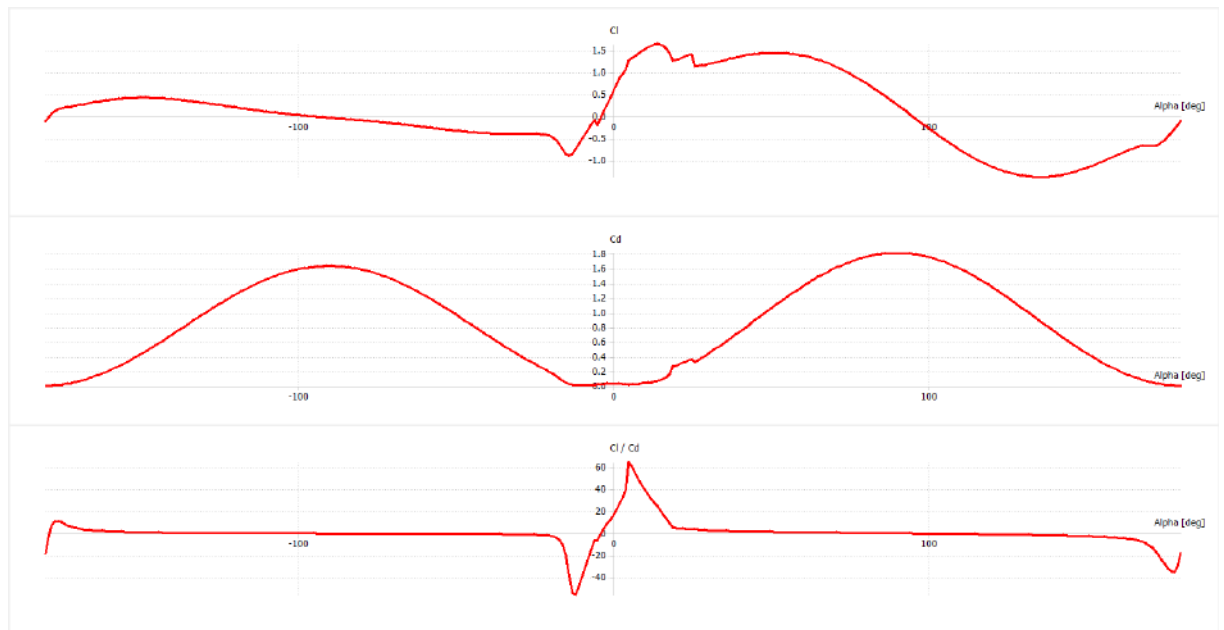
Fuente: Autor

Figura 15: NACA 6622



Fuente: Autor

Figura 16: NACA 6812



Fuente: Autor

Para la selección del perfil alar se analizaron las anteriores gráficas generadas al simular el comportamiento de cada uno de los perfiles, a través del software Qblade, en las condiciones dadas del diseño planteado, teniendo en cuenta que el número de Reynolds para el caso particular estaría rondando los 250.000. Las gráficas presentadas reflejan el desempeño de los coeficientes de arrastre y levante en correspondencia con la variación del ángulo de ataque del perfil correspondiente. Esto determinará la posición a la cual debe ubicarse el perfil en la geometría del ala para poder generar la mayor cantidad de sustentación posible.

6.3 Modelamiento

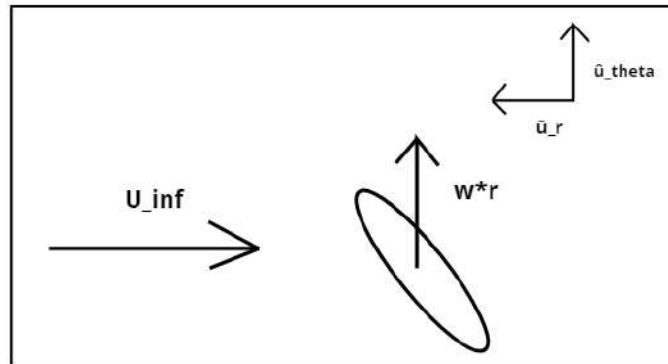
Se realiza un modelamiento físico de la situación con la finalidad de poseer un mayor control de los resultados en Qblade, una manera matemática más sencilla de corroborar los resultados de las simulaciones y poder realizar las modificaciones al diseño de una manera más fácil y rápida, sin requerir muchos recursos de cálculo computacional.

Este modelamiento se basa en un modelo ideal bidimensional del ala

de la turbina, en el cual se analizan las fuerzas a las que el determinado perfil se someterá en el accionar de la turbina.

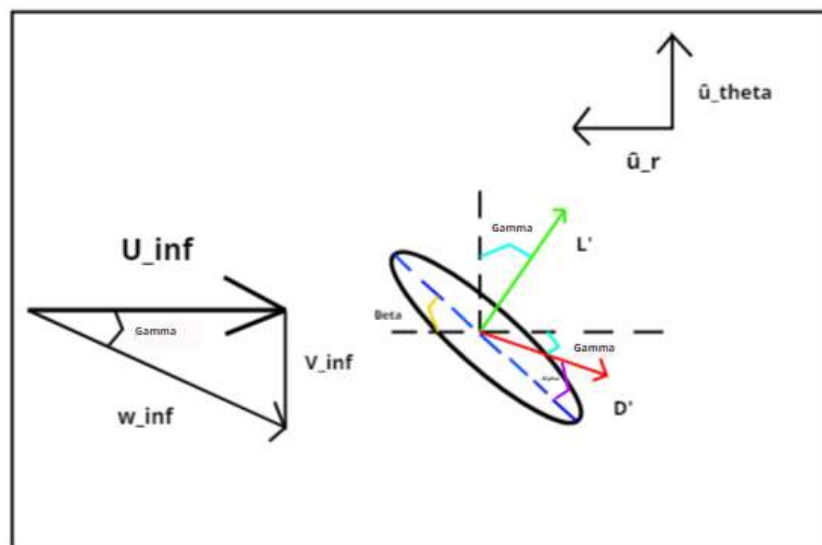
Se analiza a partir de la sección transversal del perfil, donde se forman triángulos de fuerzas y velocidades, los cuales luego se analizan de forma radial para así determinar el torque generado por las alas y en ultimas la potencia teórica que generaría la turbina. En ultimas, se tiene un modelo bidimensional y tridimensional para analizar las fuerzas con las que interactua el ala. En las figuras 17 y 18 se pueden apreciar los marcos de referencia previamente mencionados[12].

Figura 17: Marco de referencia inicial



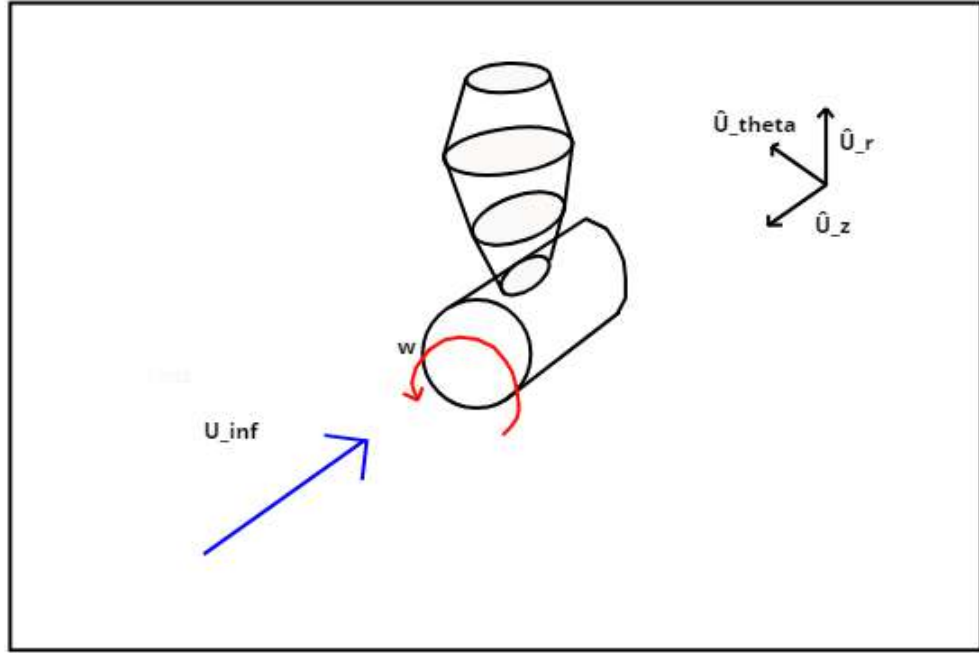
Fuente: Autor

Figura 18: Marco de referencia bidimensional



Fuente: Autor

Figura 19: Marco de referencia tridimensional



Fuente: Autor

A partir de la figura 18 se realiza el análisis de fuerzas sobre el elemento, el cual se termina definiendo en las ecuaciones (44) y (45).

$$F'_\theta = L' \times \cos(\gamma) - D' \times \sin(\gamma) \quad (44)$$

$$F'_z = -L' * \text{sen}(\gamma) - D' * \text{cos}(\gamma) \quad (45)$$

En las ecuaciones (44) y (45) encontramos que son dependientes, además del ángulo γ , de las fuerzas de levante y arrastre, las cuales se definen en las ecuaciones (46) y (47)

$$L' = \frac{1}{2} \times \rho \times \omega_\infty^2 \times c_l \times c \quad (46)$$

$$D' = \frac{1}{2} \times \rho \times \omega_\infty^2 \times c_d \times c \quad (47)$$

Donde:

- ρ : Densidad del aire, $1,2225 \frac{kg}{m^3}$

- ω_{∞} : Velocidad relativa del viento, varia para cada segmento
- c_l : Coeficiente de sustentación del perfil, varia según el mismo
- c_d : Coeficiente de arrastre del perfil, varia según el mismo
- c : longitud de cuerda del perfil, varia para cada segmento

Una vez teniendo definidas cada una de las variables previamente presentadas, se procede a calcular el momento generado por el ala, los cálculos corresponden a la acción del viento sobre una sola ala del rotor, ecuación (48).

$$M' = r * F'_{\theta} \quad (48)$$

Donde:

- M' : Momento generado en el elemento
- r : longitud del radio en donde se ubica el elemento

Cabe denotar que todas las cantidades de fuerza y momento previamente mencionadas son magnitudes por unidad de radio, es decir, la magnitud actual de estas fuerzas se halla multiplicando el valor hallado a través de las ecuaciones, por el radio en el que se encuentra el elemento. Lo anterior en ultimas se traduce en una integral para hallar la cantidad total de momento que genera un ala, la cual para esta metodología en particular es resuelta de manera numérica a través de la ley de trapecios, siendo descrita en la ecuación (49).

$$M = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{2} \times (M'_i + M'_{1+i}) \times \delta r \quad (49)$$

La cantidad de momento generada se halla para poder estimar teóricamente la cantidad de potencia generada por el ala, debido a que esta se define en la ecuación (50).

$$P = M \times \omega \quad (50)$$

Donde:

- M : Cantidad de momento generada por el ala
- ω : velocidad angular de diseño

Esta es la manera más sencilla de calcular y diseñar las alas de una turbina eólica, aunque su sencillez depende de la cantidad de energía que se requiera generar y de la disponibilidad de un software de calculo el cual facilite ciclos e iteraciones, se mantiene dentro de las concepciones básicas que cualquier ingeniero debe manejar.

6.4 Creación del algoritmo

En orden de poder manipular de manera mas sencilla los datos generados por el modelo físico a usar, se programa un algoritmo en Matlab, el cual ayuda no solo en la manipulación de datos, sino también en la velocidad de calculo y en ultimas a tomar decisiones sobre el diseño que puedan aumentar o disminuir la eficiencia del mismo.

En primera instancia, se crean las divisiones del ala a través de su longitud, operación fundamental y que acorde a los lineamientos del BEM y los apuntes de Grant Ingram[14], de 10 a 20 divisiones son las que se usan comúnmente. En este caso debido a la longitud del ala se realizan 15 divisiones, dejando así elementos a tratar de 5 cm de altura, basándonos en un sistema coordenado X-Y-Z convencional, donde la sección transversal del perfil esta ubicada en el plano X-Z.

A partir de esto, se definen todas las constantes y condiciones iniciales del diseño, las cuales son las siguientes:

- $U_{\infty} = 4$
- $\omega = 15.708$
- $\alpha_1 = 10$
- $\alpha_2 = 6$
- $C_{L1} = 1.39$
- $C_{D1} = 0.0131$
- $C_{L2} = 1.05$
- $C_{D2} = 0.025$

- $\rho = 1.2225$
- $c_1 = 0.2$
- $c_2 = [0.16 \ 0.15 \ 0.14 \ 0.13 \ 0.12 \ 0.11 \ 0.10 \ 0.09 \ 0.08 \ 0.07 \ 0.06]$

En donde se marca la diferencia en los subíndices 1 y 2, debido a que estos son usados en dos partes distintas de un mismo bucle de cálculo. El algoritmo se centra en un bucle principal que calcula los datos de fuerza y momento en cada uno de los elementos previamente descritos, el cual está dividido en dos partes, del 1 al 5 y del 5 en adelante, haciendo referencia en este caso a los elementos del vector que contiene las divisiones del radio realizadas previamente. Esta división se realiza por el hecho de que dentro del diseño se tratan dos perfiles distintos, con coeficientes diferentes, NACA 0024 y NACA 6611, el primero con finalidad estructural para darle mayor soporte al ala en su base, y el segundo buscando el mayor desempeño aerodinámico posible, lo que traduce en tener que usar las ecuaciones dos veces con diferentes constantes asignadas, lo anterior con la finalidad de no complicar en exceso el diseño del algoritmo.

Fue necesario almacenar los datos de cada uno de los elementos para luego poder ser usados en el cálculo de potencia, lo cual requirió un comportamiento matricial de parte de los cálculos, es decir, las fuerzas y ángulos hallados en cada una de las divisiones fueron guardados en una matriz, la cual a su vez fue guardada en arreglo de celdas, donde cada una de estas representaba cada uno de los elementos que comprendían el ala del rotor. Para ello son creadas las entidades M y A, siendo M la matriz donde se guardan los coeficientes del elemento que está siendo calculado, y A el arreglo de celdas donde se ubica la matriz M una vez esta termina su paso por el ciclo.

En las figuras ?? y 21 se puede observar la manera cómo el código opera de forma matricial.

Figura 20: Código Matlab 1

```
48 - for j = 1:16
49 -
50 -     V_inf(j) = omega * r(j);      %% Velocidad del perfil en el punto de estudio m/s
51 -     omega_inf(j) = sqrt(U_inf^2+V_inf(j)^2);    %% velocidad angular del viento
52 -     ghama(j) = atand(V_inf(j)/U_inf);          %% angulo entre fuerzas y planos
53 -
54 -
55 -     M(j,1) = r(j);
56 -     M(j,2) = V_inf(j);
57 -     M(j,3) = omega_inf(j);
58 -     M(j,4) = ghama(j);
59 -
60 -     if j < 6      %%%% Estructural
61 -         Beta(j) = alpha_1 - ghama(j);
62 -
63 -         L_prime(j) = 1/2*rho*omega_inf(j)^2*C_L2*c_1;
64 -         D_prime(j) = 1/2*rho*omega_inf(j)^2*C_D2*c_1;
65 -         F_prime_theta(j) = L_prime(j)*cosd(ghama(j))-D_prime(j)*sind(ghama(j));
66 -         F_prime_z(j) = -L_prime(j)*sind(ghama(j))-D_prime(j)*cosd(ghama(j));
67 -         M_prime(j) = r(j)*F_prime_theta(j);
68 -
69 -         M(j,5) = L_prime(j);
70 -         M(j,6) = D_prime(j);
71 -         M(j,7) = F_prime_theta(j);
72 -         M(j,8) = F_prime_z(j);
73 -         M(j,9) = M_prime(j);
74 -         M(j,10) = Beta(j);
75 -         M(j,11) = c_1;
76 -
```

Fuente: Autor

Figura 21: Código Matlab 2

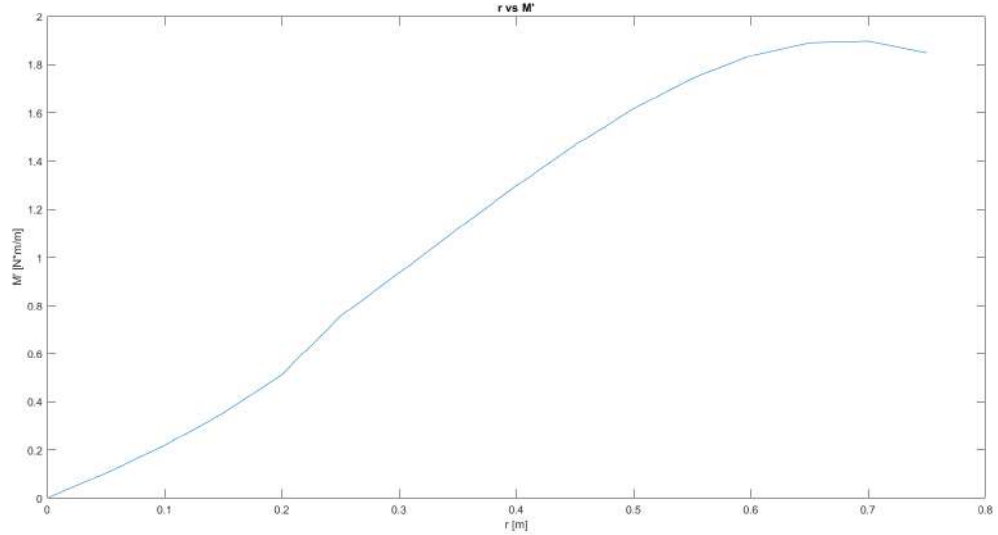
```
76 -
77 -     else
78 -
79 -         Beta(j) = alpha_2 - ghama(j);
80 -
81 -         L_prime(j) = 1/2*rho*omega_inf(j)^2*C_L1*c_2(j-5);
82 -         D_prime(j) = 1/2*rho*omega_inf(j)^2*C_D1*c_2(j-5);
83 -         F_prime_theta(j) = L_prime(j)*cosd(ghama(j))-D_prime(j)*sind(ghama(j));
84 -         F_prime_z(j) = -L_prime(j)*sind(ghama(j))-D_prime(j)*cosd(ghama(j));
85 -         M_prime(j) = r(j)*F_prime_theta(j);
86 -
87 -         M(j,5) = L_prime(j);
88 -         M(j,6) = D_prime(j);
89 -         M(j,7) = F_prime_theta(j);
90 -         M(j,8) = F_prime_z(j);
91 -         M(j,9) = M_prime(j);
92 -         M(j,10) = Beta(j);
93 -         M(j,11) = c_2(j-5);
94 -
95 -     end
96 -
97 -     A{1,j} = M;
98 -
99 -     plot(r,M_prime);
100 -
101 - end
```

Fuente: Autor

Al final del código se observa el comando "plot" el cual realiza una grafica r vs M', la cual indica la manera cómo se comporta la cantidad

de momento unitario a través del ala. En la figura 22 se puede observar la gráfica obtenida.

Figura 22: Gráfica r vs M'



Fuente: Autor

Luego de tener todos los datos almacenados fueron analizados a través de Excel, donde es más fácil analizarlos e identificar que puntos del diseño se pueden optimizar, generalmente el mayor cambio que se realizó fue variar la longitud de la cuerda del perfil, para así obtener un punto ideal entre desempeño y uso de material.

En ultimas, el calculo de potencia fue realizado en otro ciclo aparte, esto es necesario debido a que este ciclo representa la integral representada en la ecuación (49), donde se le resta uno a la cantidad de indices presentes, por lo tanto este ciclo termina siendo de 14 indices. En la figura 23 se puede observar el código usado para el cálculo de potencia, donde fue necesario extraer los datos de las matrices M previamente guardadas en el arreglo de celdas A . Estos datos extraídos fue necesario guardarlos en nuevas variables para así llevar a cabo las operaciones correspondientes. En ultimas, los resultados son guardados en una nueva matriz N , para finalmente calcular la potencia generada.

Figura 23: Código para cálculo de potencia

```
102 -  
103 - M_TO = 0;  
104 -  
105 - for h = 1:15  
106 -  
107 -     M_i = A{1,h}(h,9);  
108 -     M_ii = A{1,h+1}(h+1,9);  
109 -     r_i = A{1,h}(h,1);  
110 -     r_ii = A{1,h+1}(h+1,1);  
111 -     MT = 1/2*(M_i+M_ii)*(r_ii - r_i);  
112 -     M_TO = M_TO + MT;  
113 -  
114 -     N(h,1) = M_i;  
115 -     N(h,2) = M_ii;  
116 -     N(h,3) = r_i;  
117 -     N(h,4) = r_ii;  
118 -     N(h,5) = MT;  
119 -     N(h,6) = M_TO;  
120 - end  
121 -  
122 - P = M_TO*omega*3;
```

Fuente: Autor

Luego de este proceso, se obtuvo que la turbina, teóricamente, produciría 36,2769 W de potencia.

Nota : Los cálculos mostrados en el código son los cálculos finales del diseño, las demás geometrías y cálculos fueron evolucionando con el uso en paralelo de Matlab y Qblade. A continuación se hará muestra de la evolución de las geometrías.

6.5 Diseño y simulación

Como se menciono en la nota final de la sección anterior, el trabajo de diseño fue realizado en paralelo entre ambos software, por dos razones principales:

1. No diseñar a ciegas : Esta fue la principal razón, ya que a pesar de que ciertos aspectos del diseño se realizaron a prueba y error, la repetición excesiva de este método se evita cuando se pueden manipular de manera más sencilla los coeficientes y fuerzas que se ejercen sobre la geometría del ala, de lo contrario, se hubiera convertido en una tarea de proporciones titánicas el diseño del ala solo usando prueba y error.

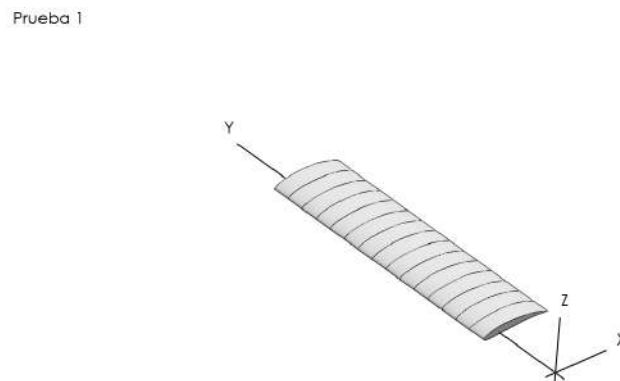
2. Comparar resultados: Más que por el uso del software en sí, por la combinación de metodologías de cálculo, en Matlab se usaron ecuaciones de fuerzas y teoría aerodinámica básica, mientras que Qblade usa BEM. Al final los resultados concuerdan con la teoría que presentan cada uno de los métodos.

Luego de probar múltiples geometrías durante el proceso de prueba inicial, se decidió partir de un diseño simple e ir implementando diferentes modificaciones a lo largo de su desarrollo. Para esto se definió una longitud de cuerda que fuese acorde con las dimensiones previamente establecidas.

Fueron requeridos 5 diseños previos hasta obtener el más óptimo dentro de las condiciones probadas.

En la figura 13 se puede apreciar el diseño de prueba número 1

Figura 24: Diseño de prueba No. 1

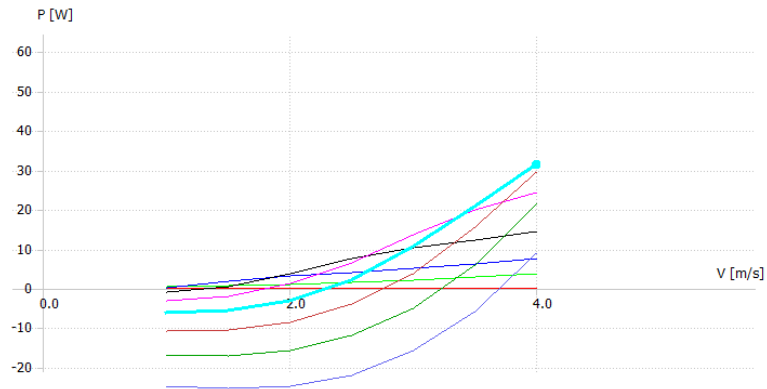


Fuente: Autor

Este diseño inicial se basó únicamente en el perfil NACA 6611, una longitud de cuerda de 0.2 m, como previamente se mencionó, y la longitud de 0.75 m.

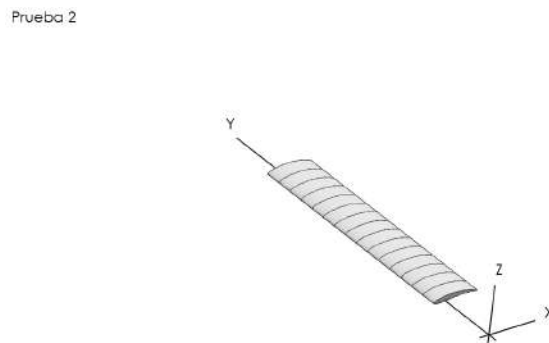
Al simular el ala a través del BEM, los resultados obtenidos se pueden observar en la figura 25.

Figura 25: Gráfica de potencia vs velocidad del viento, diseño de prueba No.1



En la figura anterior se denota el desempeño que tendría el rotor de la turbina, llegando a generar un poco mas de 30 W de potencia a un máximo de velocidad del viento de 4 m/s y una velocidad angular del rotor de 150 rpm. Luego de obtener estos resultados iniciales, se optó por variar la longitud de cuerda, ya que el valor anterior fue definido de manera arbitraria. El nuevo valor es determinado de igual manera, pero es en esto en lo que se basa el método de prueba y error. Para el diseño de prueba número 2 este valor es determinado en 0.15 m y su geometría se puede evidenciar en la figura 26.

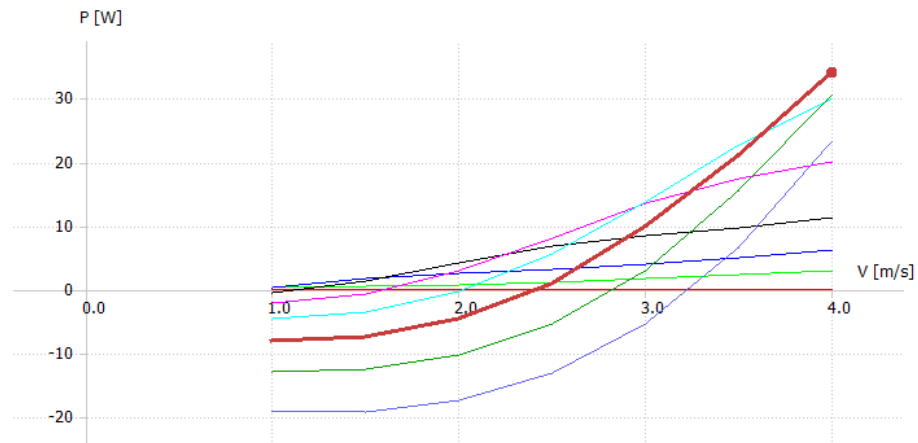
Figura 26: Diseño de prueba No.2



Fuente: Autor

Luego de simular el diseño de prueba número 2, encontramos los resultados consignados en la figura 27.

Figura 27: Gráfica de potencia vs velocidad del viento, diseño de prueba No.2



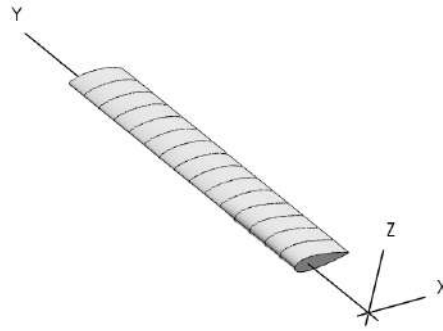
Fuente: Autor

Como lo evidencia la figura 27, al reducir la longitud de cuerda del perfil se obtuvo una mejora en el desempeño del rotor, produciendo mas potencia en su accionar. Esto se debe a que algunos perfiles, dependiendo de las condiciones, mejoran sus propiedades aerodinámicas al ser reducidos. Cabe mencionar que dentro de la revisión bibliográfica realizada no existe una manera exacta de calcular la longitud de cuerda para una aplicación o situación determinada, esto se debe a que el diseño aerodinámico se basa en complejas ecuaciones diferenciales o sistemas de ecuaciones a resolver por medio de iteraciones, lo que hace que desarrollar un modelo para solucionar esta situación requiera de muchos recursos, ensayos y sobretodo tiempo.

En un siguiente paso, para aumentar la resistencia estructural del ala, para el diseño de prueba número 3, la variante consistió en cambiar el perfil de las primeras 5 secciones de la base, donde el ala presenta generalmente sus puntos críticos y requiere de mayor rigidez estructural. Para esto se selecciono el perfil NACA 0024, el cual posee un mayor espesor pero aún conserva un buen comportamiento aerodinámico para un perfil de su tipo. En la figura 28 se puede observar el diseño de prueba número 3.[18]

Figura 28: Diseño de Prueba No. 3

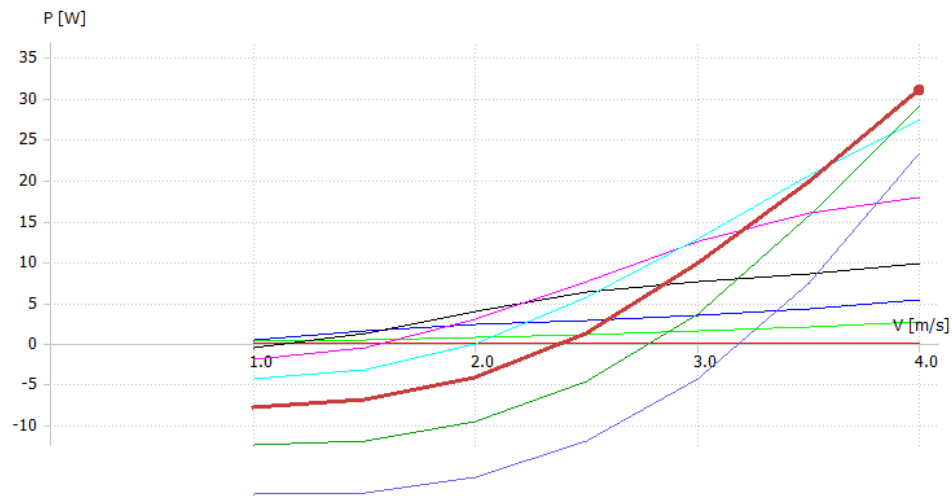
Prueba 3



Fuente: Autor

Al simular el desempeño de este diseño, se encuentra que la producción de potencia se reduce levemente, efecto esperado debido a que el perfil agregado posee una menor relación entre coeficientes de sustentación y levante que el usado anteriormente. Sin embargo, este es un cambio que debe mantenerse debido a lo mencionado anteriormente acerca de la resistencia estructural del ala. En la figura 29 se puede observar el cambio en el desempeño del rotor.

Figura 29: Gráfica de potencia vs velocidad del viento, diseño de prueba No 5



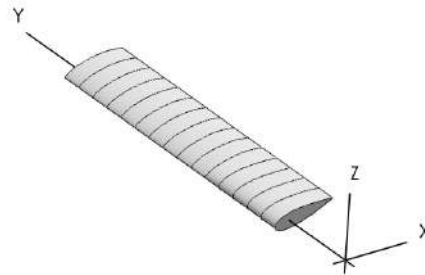
Fuente: Autor

En búsqueda de aumentar la cantidad de potencia a producir, se experimento con el ángulo de torsión general del ala, y se encontró un nuevo punto de mejoría, donde rotando el ala 12° a contra reloj, se encuentra el mejor desempeño posible hasta el momento. Esto se debe a que las fuerzas aerodinámicas varían acorde con el ángulo de ataque del perfil. Este proceso se realizo a prueba y error entre ambos software debido a que aunque existen estudios para predecir el ángulo de ataque ideal de un perfil alar, eran modelos demasiado complejos tanto en términos matemáticos como en términos de recursos de computación[11], por lo que se optó por optimizar esta característica por medio del tanteo.

En las figuras 30 y 31 se pueden observar correspondientemente el diseño de prueba número 4 y la gráfica de potencia correspondiente a la simulación del rotor.

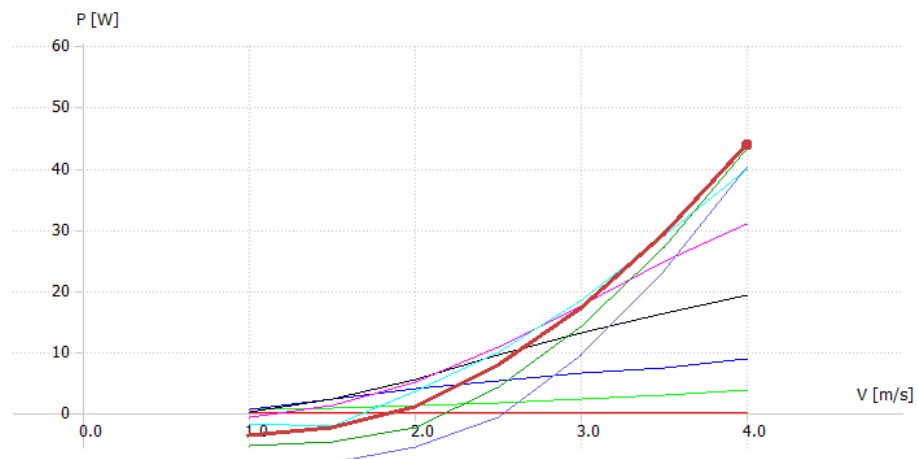
Figura 30: Diseño de prueba No.4

Prueba 4



Fuente: Autor

Figura 31: Gráfica de potencia vs velocidad del viento, diseño de prueba No.4



Fuente: Autor

Para el ultimo diseño de prueba, se buscó variar la cantidad de material a usar en el rotor, afectando lo mas mínimo posible el desempeño de este, para esto se variaron las longitudes de cuerda de los elemen-

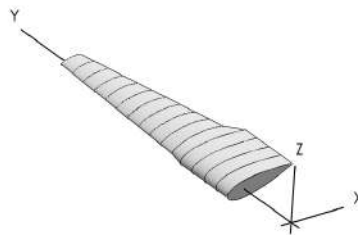
tos del 6 en adelante, quienes son los que mas efecto tienen en el desempeño aerodinámico. Mencionado anteriormente, las variaciones de las longitudes de cuerda se realizaron en base al tanteo, obteniendo que la mejor geometría a usar para poder reducir cantidad de material manteniendo desempeño seria la siguiente:

- Zona estructural : 0.2 m de longitud de cuerda
- Zona aerodinámica : [0.16, 0.15, 0.14, 0.13, 0.12, 0.11, 0.10, 0.09, 0.08, 0.07, 0.06] m de longitud de cuerda

Se llegó a este diseño luego de analizar las gráficas y matrices proporcionadas por el algoritmo de Matlab, el cual mostró una relación directa, a mayor radio del punto de diseño, menor se puede hacer la longitud de cuerda, por lo cual se termina usando una leve disminución de un centímetro entre elementos, que va desde 0.16 m hasta llegar a los 0.06 m. En cuanto a la zona estructural se decide aumentar la longitud de la cuerda para así aprovechar todo el desempeño aerodinámico que este perfil pueda brindar. En esta zona y con este perfil, no se puede aplicar la afirmación deducida anteriormente. En las figuras 32 y 33 se observan correspondientemente el diseño de prueba número 5 y su correspondiente gráfica de potencia.

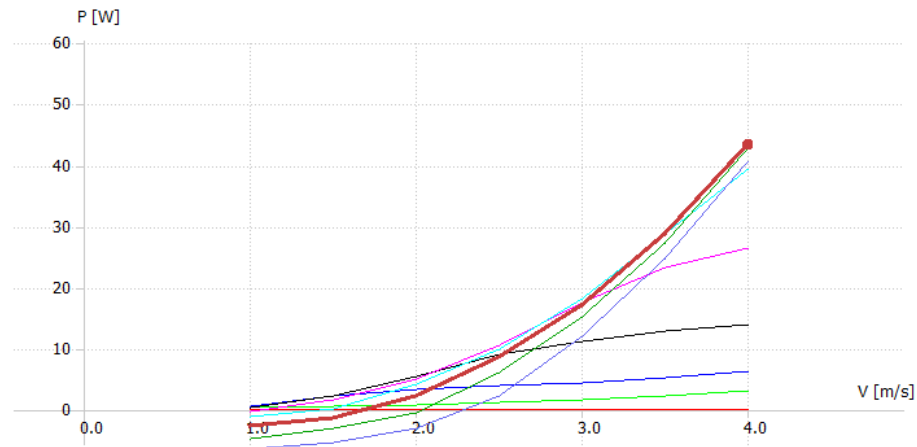
Figura 32: Diseño de prueba No.5

Prueba 5



Fuente: Autor

Figura 33: Gráfica de potencia vs velocidad del viento, diseño de prueba No.5



Fuente: Autor

En ultimas se tomó el diseño de prueba número 5 como el más optimo para el proyecto debido a la cantidad de potencia producida con relación a la cantidad de material usada en el diseño.

Una vez estando la geometría definida, se dibujo en el software de CAD Solidworks, para así poder adelantar un proceso de simulación de fluidos, CFD, en busca de simular la interacción del viento con el rotor y saber si va en concordancia con lo obtenido anteriormente. El proceso de simulación CFD fue realizado usando el software de simulación ANSYS, en el entorno CFX, proceso que comprende las siguientes etapas:

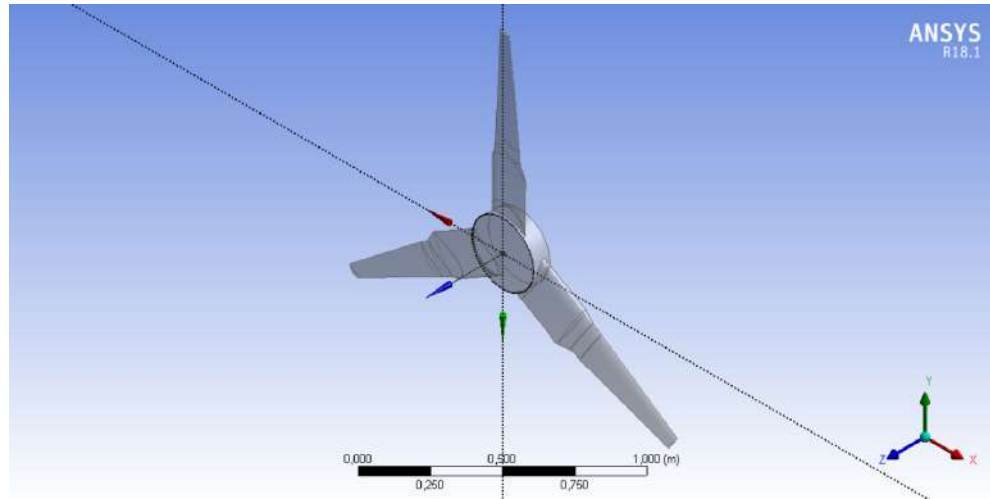
- Definición de la geometría
- Definición de la zona de fluido
- Mallado
- Simulación
- Análisis de resultados

6.5.1 Definición de la geometría

Como se menciona anteriormente, la geometría del rotor se toma del diseño de prueba número 5, y se importa al ambiente de "Design

Modeler” en Ansys Workbench, entorno donde se realizaran las modificaciones requeridas para el mallado y posteriormente, la simulación.

Figura 34: Rotor en Design Modeler

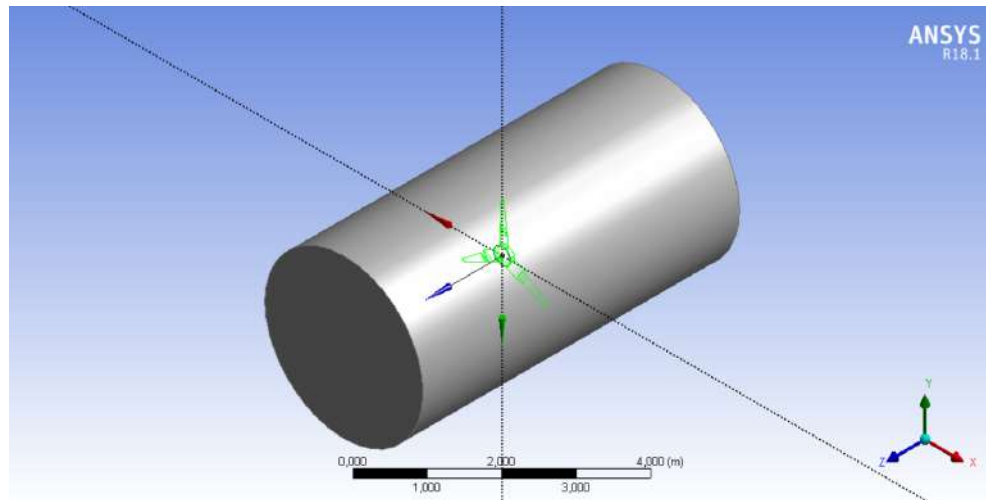


Fuente: Autor

6.5.2 Definición de la zona de fluido

Este proceso es clave para la simulación, se determina las dimensiones del objeto a mallar, no solo se malla el rotor, y se construye el modelo de la zona de fluido, siendo en este caso el cilindro que representa el volumen de trabajo del rotor. Se evita realizar la simulación hacia un ambiente de túnel de viento, debido a que para objeto de este estudio, esto no es relevante ni presentaría datos funcionales para el proyecto. La definición de la zona de fluido para una turbina eólica de eje horizontal debe mantener ciertos estándares, la longitud en cada sentido debe ser de entre 3 y 5 veces el radio de la turbina y un radio a consideración, dependiendo del tipo de simulación que se este realizando, para que este no afecte los resultados ni pueda crear una posible "zona de rebote" para el viento dentro de la simulación. Para finalizar este proceso, se crea un "booleano", el cual retira la intersección entre el rotor y el cilindro creado para el fluido, dejando el espacio vacío donde se encontraba el rotor.

Figura 35: Zona de fluido definida



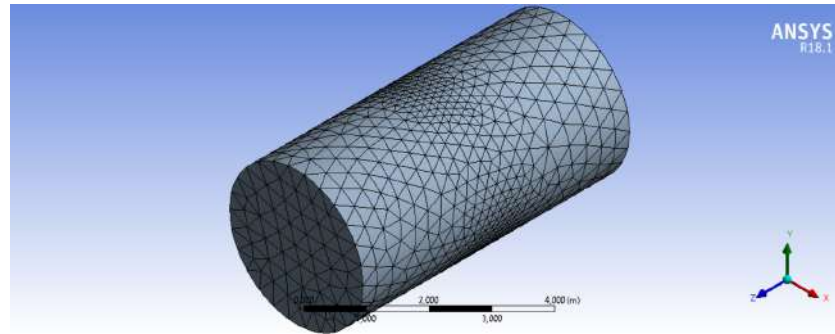
Fuente: Autor

En la figura 35 se observa la zona de fluido definida y lo que se puede observar resaltado en color verde, es el espacio vacío al interior del cilindro, resultado del "booleano" creado.

6.5.3 Mallado

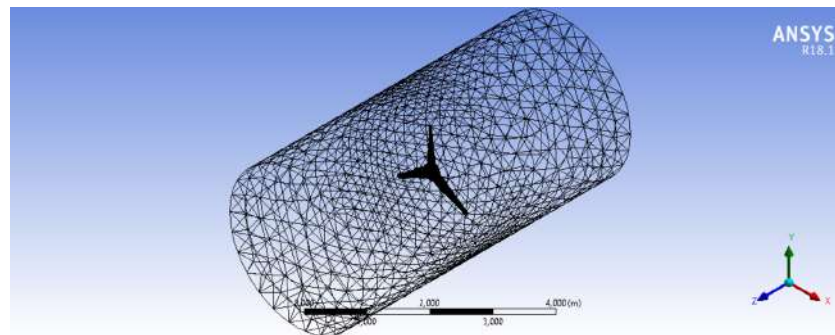
Para el caso particular, se utilizó el mallado automático de la herramienta "mesh" de Ansys Workbench, y se refinaron aspectos como la velocidad de transición, hasta encontrarse con una malla de calidad de 0.83108 en un rango de 0 a 1, lo cual es considerado suficientemente buena en sus resultados. No se amplía la búsqueda hacia una calidad de malla superior debido a que esto trae consigo mejores resultados pero aumento en el tiempo de computo de una manera exponencial, por lo cual se considera innecesario dentro de este caso.

Figura 36: Geometría Mallada



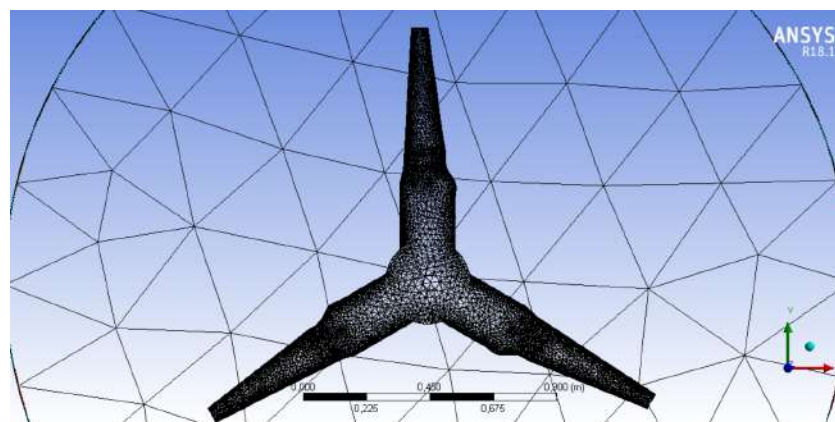
Fuente: Autor

Figura 37: Geometría Mallada.detalle general



Fuente: Autor

Figura 38: Geometría Mallada-detalle del rotor



Fuente: Autor

En las figuras 36, 37 y 38 se puede observar el detalle de la malla y la principal razón por la cual se decide no aumentar la calidad de la malla, ya que en la figura 37 se observa la diferencia del tamaño de la malla entre el rotor y su zona de fluido, al aumentar la calidad de la malla, lo hace en un aspecto en general, ya que es dependiente del tamaño promedio de elementos, por lo tanto requeriría una reducción abrupta del tamaño del elemento en la zona de fluido, causando un costo computacional muy elevado a comparación de lo que aumenta la precisión del calculo para este caso.

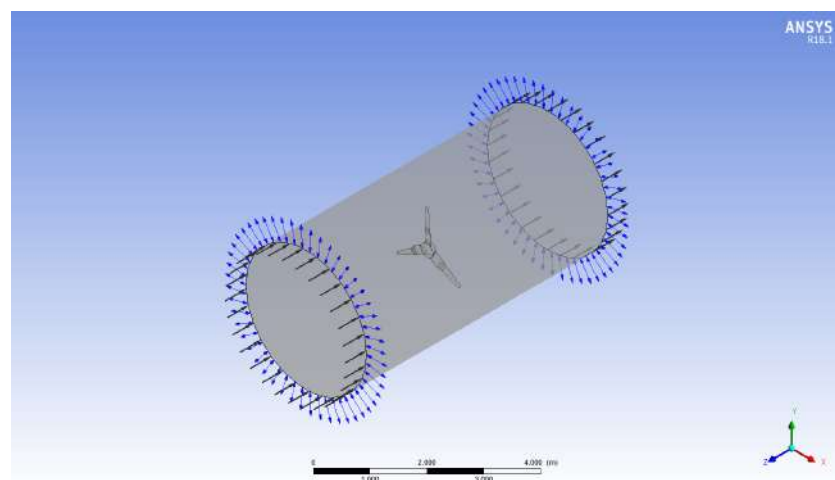
6.5.4 Simulación

La simulación se define como un análisis estático del rotor y su interacción con el viento como fluido, esto para poder hallar el torque generado en el eje z por dicha interacción y así calcular la potencia generada.

La simulación se realizó en el entorno "CFX", donde se establecen las siguientes condiciones de frontera.

- Inlet: Zona de entrada del viento, $V = 4\text{m/s}$
- Open Wall: Zona abierta sometida a presión atmosférica.
- Wing: Pared estática.
- Outlet: Zona de salida del viento a presión atmosférica.

Figura 39: Modelo en CFX

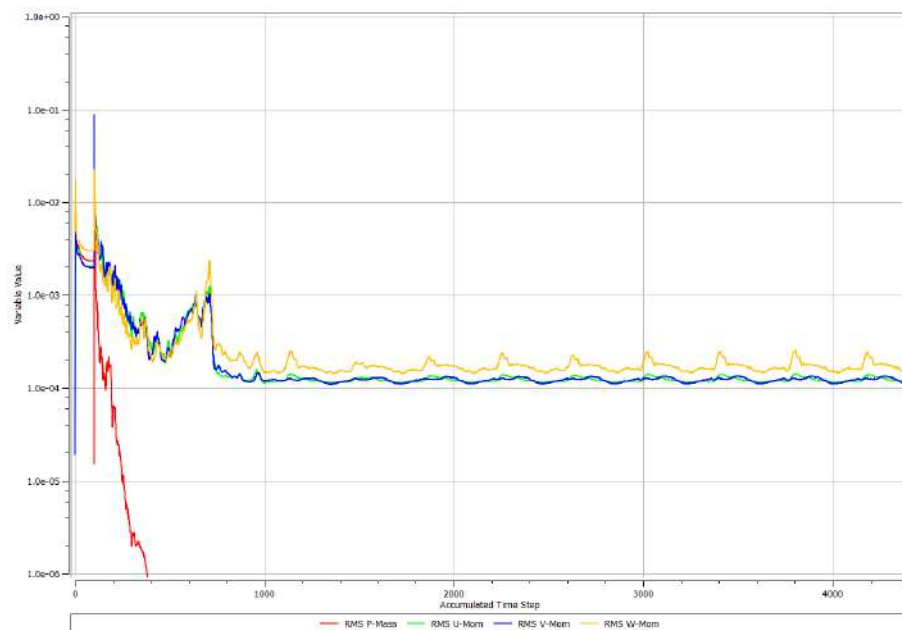


Fuente: Autor

En la figura 39 se puede observar los señalamientos que el entorno de CFX realiza en la geometría, indicando las condiciones de frontera que se le son asignadas al modelo a simular.

Para la solución, en búsqueda de un comportamiento uniforme de los residuales, se instauró un máximo de 10.000 iteraciones en el cálculo y un límite generalizado para todos los residuales en $1\text{E}-08$. El solucionador se interrumpió luego de 4385 iteraciones, momento en el cual el patrón de residuales, mostrado en la figura 40, se estabiliza y se puede deducir que la solución llegó a su punto de convergencia. Este proceso tomó un tiempo de $4.285\text{E}+04$ segundos, 11,92 horas.

Figura 40: Gráfica de residuales

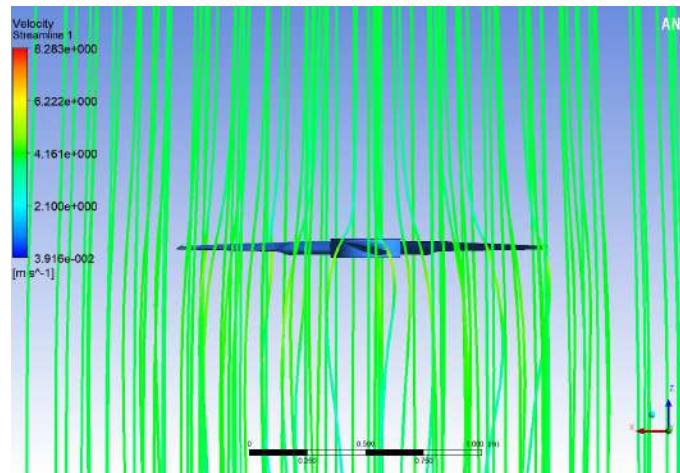


Fuente: Autor

6.5.5 Análisis de resultados

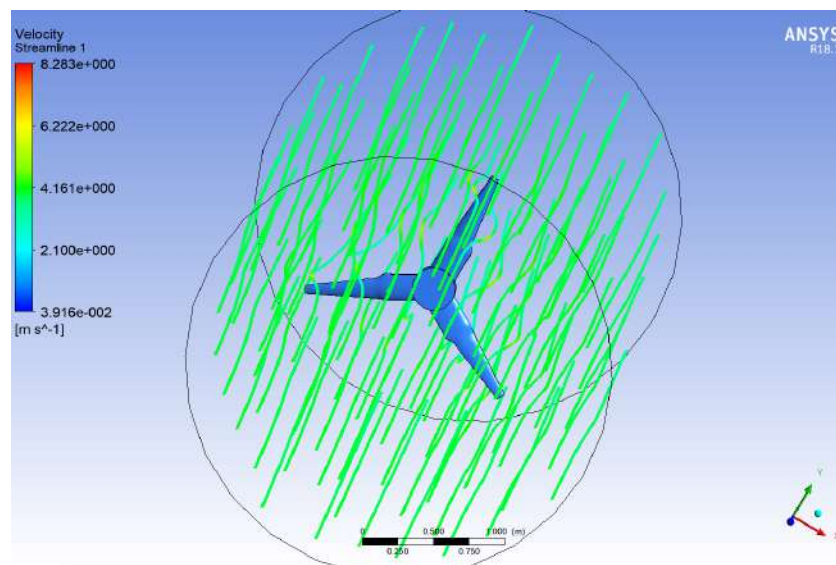
El proceso de análisis de resultados se realizó en el entorno "Post CFD" del bloque de CFX, donde se crearon líneas de campo con la finalidad de observar la interacción entre el viento y el rotor. Este comportamiento se detalla en las figuras 41 y 42.

Figura 41: Líneas de campo-vista superior



Fuente: Autor

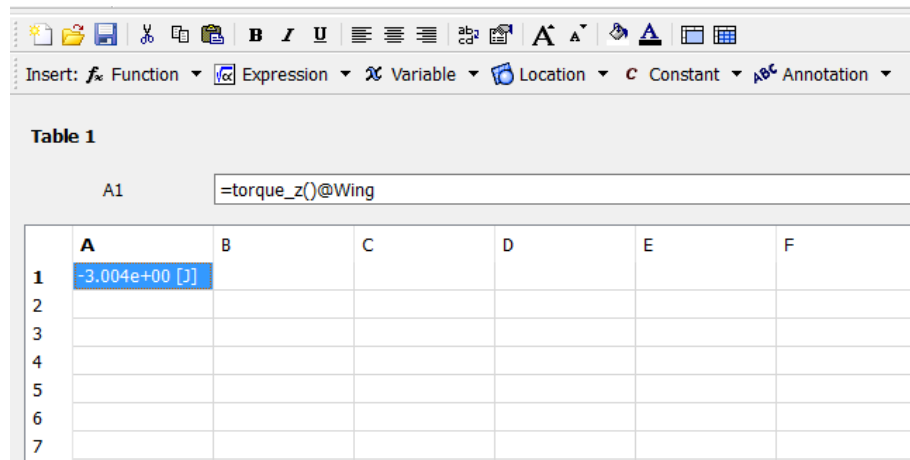
Figura 42: Líneas de campo-vista en detalle



Fuente: Autor

Una vez se observó que las líneas de campo indicaban un trazado correcto, lo esperado acorde con la física de la problemática, se calculo el torque generado, el cual se calcula a través de una tabla en el mismo entorno y se puede observar en la figura 43.

Figura 43: Torque calculado



The screenshot shows a spreadsheet interface with a toolbar at the top containing icons for file operations, text formatting, and data manipulation. Below the toolbar is a menu bar with options like 'Insert', 'Function', 'Expression', 'Variable', 'Location', 'Constant', and 'Annotation'. The main area displays 'Table 1' with a formula bar showing '=torque_z()@Wing'. The table has 7 rows and 6 columns labeled A through F. The value '-3.004e+00 [J]' is entered in cell A1.

	A	B	C	D	E	F
1	-3.004e+00 [J]					
2						
3						
4						
5						
6						
7						

Fuente: Autor

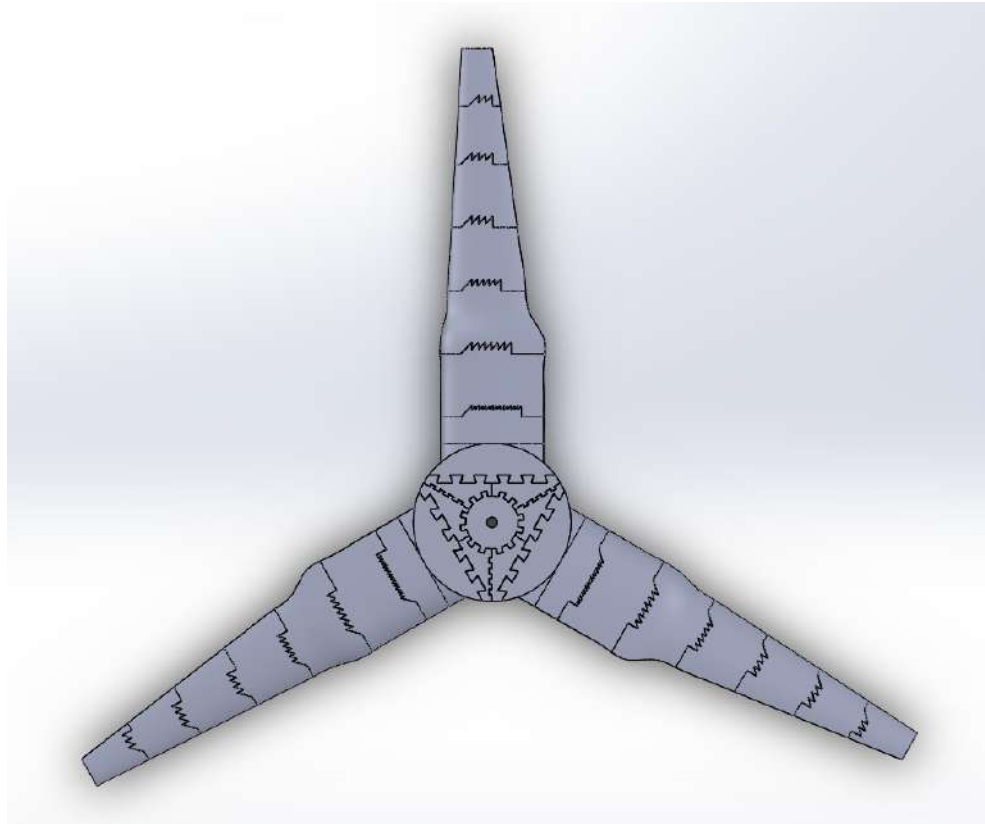
En ultimas, a través de la ecuación (50) se calculó la potencia generada, que es igual a 47,223[W]

6.6 Diseño para impresión 3D

Fue necesario particionar el rotor entero en diferentes secciones debido a las limitaciones comprendidas por el tamaño de la impresora 3D, las cuales son 24 x 20 x 14 [cm]. Por esta misma razón y tambien limitaciones de tiempo y material, se decide escalar el rotor a la mitad de sus dimensiones, 1:2, en busca de disminuir tiempo de impresión y material a usar.

En la figura 44 podemos observar el diseño de las particiones y cómo quedaría el rotor una vez se ensamble completamente. Los pequeños espacios que se pueden apreciar actúan como tolerancia para la impresión y también son el lugar el cual debe ocupar el pegamento para fijar completamente las secciones entre sí, el pegamento a usar es epóxico líquido de dos fases.

Figura 44: Diseño de particiones para impresión 3D



Fuente: Autor

6.7 Proceso de impresión 3D

El proceso de impresión 3D fue largo y complejo debido a diversos factores ajenos al proyecto, como suspensión del servicio de energía en las instalaciones de la universidad, causando así errores y generando desperdicio de material. Además de esto, se encontraron diversos errores con el cabezal de impresión y algunos con la precisión de la impresión, la última pudo ser en causa de las dimensiones reducidas de las juntas de las alas, consecuencia de la reducción en escala del rotor, factor que no se tuvo en cuenta en un principio.

Figura 45: Impresión 3D



Fuente: Autor

En la figura 45 se puede observar los componentes impresos del rotor, y el proceso de ensamblaje hasta obtener el rotor completamente ensamblado.

Luego de un largo proceso de refinamiento y desbaste de las geometrías, las piezas se unieron formando el rotor de la turbina. El ensamblaje fue de alta complejidad debido a que se presentaron algunos errores de impresión, lo que conllevó al debilitamiento de algunas de las piezas que ante ciertos movimientos presentaron fracturas o pérdida de material. Los inconvenientes se pudieron sortear, volviendo a pegar los componentes fracturados y finalizando el ensamblaje total. De la figura 46 a la 48 se puede observar el proceso de ensamblaje y pegado del rotor.

Figura 46: Ensamblaje



Fuente: Autor

Figura 47: Ensamblaje



Fuente: Autor

Figura 48: Ensamblaje



Fuente: Autor

6.8 Pruebas en físico

Para las pruebas en físico se propuso construir una estructura donde se pudiera sostener un generador DC junto con el circuito de carga. Esta estructura fue bastante sencilla, 4 tubos rectangulares soldados a una lamina cuadrada la cual fue taladrada para poder ajustar el generador a esta. La altura de la estructura fue determinada por la altura a la que se encontraba el ventilador con el cual se simularían las condiciones del viento para la prueba, esta altura fue de 1,3 m.

6.8.1 Definición de la prueba

La prueba en físico se define para corroborar los resultados teóricos con los que se podrían llegar a tener en la realidad, a pesar de que se trabaja con un modelo a escala. Para esto se diseñó un circuito de carga y se definió un montaje que permitiera recrear las condiciones de las simulaciones.

6.8.2 Diseño del montaje de prueba

Para el montaje fue necesario realizar un montaje de eje y chumaceras para garantizar la transmisión de potencia hacia el generador. Para este se usaron los siguientes componentes:

- Dos chumaceras con rodamientos para eje de 12 mm de diámetro.
- Eje escalonado de 12 mm de diámetro mayor y 5 mm de diámetro menor.
- Tornillos de 6 mm de diámetro nominal.
- Abrazadera de 1 ”.
- Arandelas de 6 mm de diámetro interno.
- Tuercas.

Cabe denotar que el eje era originalmente de 1/2” de diámetro, 12.7 mm, por lo que tuvo que ser maquinado tanto para llegar al diámetro requerido, como para formar el escalón a 5 mm de diámetro, donde se acopla con el rotor. Además, se perforaron dos agujeros roscados de 3 mm en la parte posterior para poder realizar el acople entre el eje y el generador, a través de dos prisioneros y un agujero de 2 mm en el centro del eje donde iría el eje del generador.

Por problemas experimentados en la alineación del sistema, se decidió realizar un acople flexible entre el eje y el generador, garantizando que los defectos por la alineación generen el mínimo arrastre posible en el montaje. El acople fue llevado a cabo con una manguera de catéter, proporcionando la parte flexible, y una varilla de metal en su extremo, que embona en el agujero del eje, el cual tuvo que ser ampliado hasta un poco más de 3.5 mm. Al otro extremo de la manguera, esta contaba con una punta hueca de un material mas rígido, el cual permitió acoplar en apriete el eje del generador sin problema alguno.

En las siguientes figuras se puede observar en detalle el montaje realizado.

Figura 49: Flecha conductora entre el rotor y el generador



Fuente: Autor

En la figura 49 se puede observar el montaje realizado, donde se perforaron agujeros en la lamina para sujetar las chumaceras de los rodamientos.

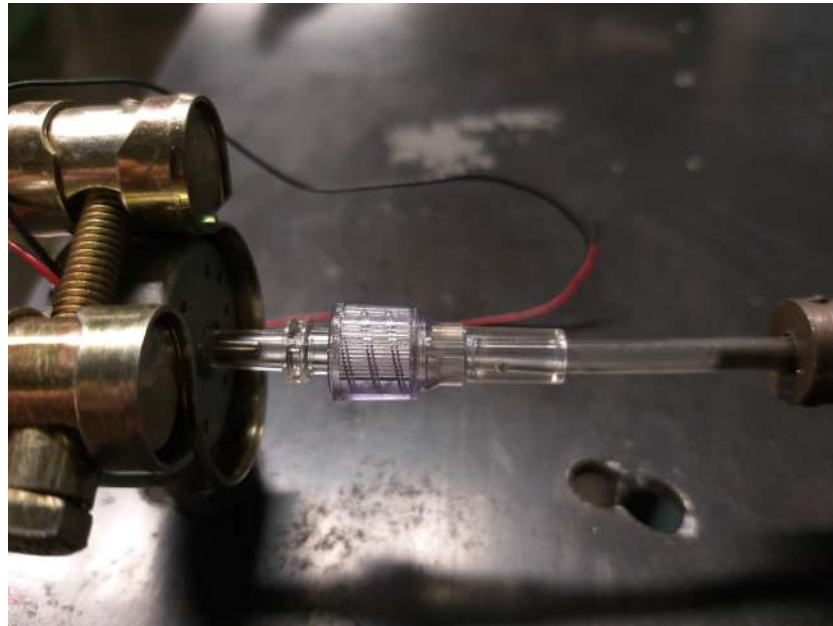
Figura 50: Flecha conductora entre el rotor y el generador



Fuente: autor

En la figura 50 se puede observar aun en mayor detalle la sujeción del eje a los rodamientos y de las chumaceras a la lámina. Se decidió levantar las chumaceras aproximadamente 5 mm, la altura de una tuerca, para evitar posibles roces entre el rotor y la estructura y también para tener una mayor facilidad de acoplar el generador a la flecha.

Figura 51: Generador-acople-flecha



Fuente: Autor

En la figura 51 se puede observar con mayor detalle lo mencionado anteriormente acerca del acople flexible. a la derecha la flecha unida a la manguera por medio de los prisioneros, a la izquierda el generador acoplado a la punta de la manguera. La sujeción del generador a la placa se realizó a través de una arandela de tornillo perforada para poder usar un tornillo y una serie de arandelas y tuercas para lograr el ajuste y nivel deseado.

Figura 52: Estructura de soporte



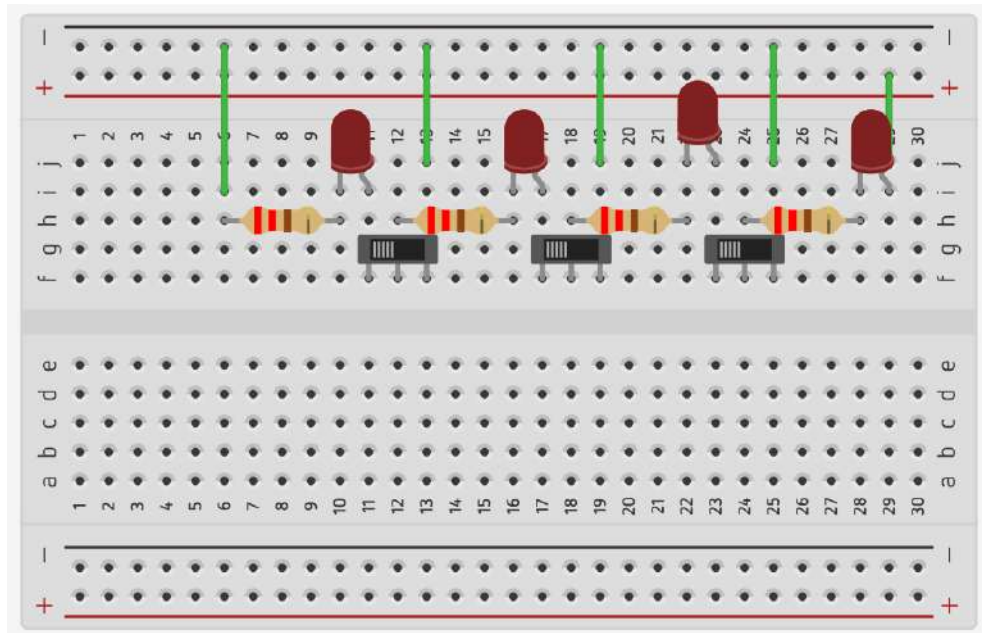
Fuente: Autor

En la figura 52 se puede apreciar la estructura que se fabricó para soportar la turbina y su circuito de potencia.

6.8.3 Diseño del circuito de carga

Para el diseño del circuito se partió del voltaje máximo a producir por el generador, ya que esto delimitaría las condiciones del circuito y la máxima cantidad de elementos que podrían ser alimentados. El generador usado fue un dinamo de 12 V. En base a lo anterior, se decidió usar bombillos LED de 3 V cada uno junto con resistencias de $220\ \Omega$. Para el montaje se decidió entonces realizar un circuito con 4 bombillos y 4 resistencias, colocando un interruptor al final de cada uno de los arreglos de LED y resistencia, para así poder variar la cantidad de carga que se le ejerce al generador y obtener una curva de potencia. Para mayor practicidad y facilidad en su manejo, el circuito fue ensamblado en una protoboard tal como lo muestra la imagen 53

Figura 53: Circuito de potencia



Fuente: Autor

6.8.4 Montaje de la prueba

Para el montaje de la prueba fue necesario recrear la velocidad del viento planteada a través de un ventilador disponible, variando la frecuencia de este y al mismo tiempo midiendo la velocidad del viento producido hasta encontrar el punto deseado para la ejecución de la prueba. La medición del viento fue realizada con un anemómetro sujetado a la estructura donde se montaría el rotor.

Para el control de la frecuencia del ventilador, se hizo uso de un PLC programandolo de tal manera que controlar la variación de la frecuencia del ventilador fuese de manera sencilla y precisa.

Figura 54: Montaje para medición de velocidad del viento



Fuente: Autor

Figura 55: Montaje para medición de velocidad del viento



Fuente: Autor

A continuación se pueden observar en las figuras 56, 57 y 58 los resultados de la medición de la velocidad de la corriente de viento generada por el ventilador, medición realizada a 2,04 m de distancia de la salida del ventilador.

Figura 56: Velocidad promedio del viento



Fuente: Autor

Figura 57: Punto máximo de la velocidad promedio



Fuente: Autor

Figura 58: Punto mínimo de la velocidad promedio



Fuente: Autor

Luego de observar los resultados de la medición, se encontró con que la frecuencia con la que se trabajaría el ventilador sería de 21 Hz, lo cual arrojó una velocidad del viento promedio de 4.09 m/s, donde se pueden señalar los valores máximos y mínimos de la medición en 4.98 m/s y 2.40 m/s respectivamente.

6.8.5 Ejecución de la prueba

Al ejecutar la prueba en una primera instancia se encontró con que no se tuvo en cuenta la velocidad de generación del dinamo, el cual al poseer dos pares de polos requeriría de 1800 rpm para poder producir los 12 V de su capacidad nominal a 60Hz. Esto se deduce a partir de una medición de voltaje la cual marcó solo 0.5 V, una medición de velocidad angular, arrojando 290 rpm y la siguiente ecuación.

$$N_s = \frac{60 * f}{pp} \quad (51)$$

Donde:

- N_S : Velocidad de sincronismo en rpm
- f : Frecuencia de la corriente en Hz
- pp : Pares de polos en el generador

Por lo anterior se decide aplicar un sistema de transmisión simple de polea y correa por lo cual se vuelve a la mesa de diseño para calcular los elementos necesarios.

6.8.6 Diseño de sistema de transmisión

Basándose en el calculo sencillo de relación de transmisión:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{D_1}{D_2} \quad (52)$$

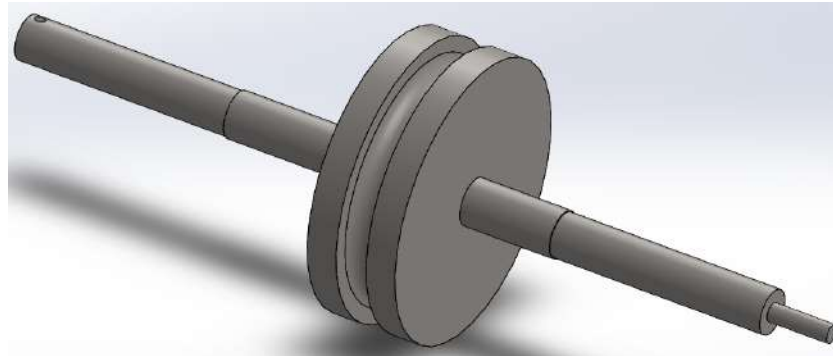
Donde N hace referencia a la velocidad angular de los ejes, D a los diámetros requeridos y los subindices 1 y 2 al eje del rotor y el del generador correspondientemente. Se usó en primera instancia $D_2 = 12mm$ por el hecho de que ya había en existencia una barra de acero sobrante del primer eje la cual cumplía con esta característica. Resolviendo entonces la ecuación se obtuvo que el diámetro de la polea sería de 74.48 mm, obteniendo una relación de transmisión $i = 6.21$.

En búsqueda de hacer el diseño lo más sencillo posible, se propone realizar un escalón de diámetro menor en el eje 2 para asegurar la correa en su lugar, por lo que se propone desbastar el diámetro del eje 2 mm, reduciendo su medida a $D_2 = 10.7mm$.

Para hallar el nuevo diámetro requerido por la polea se multiplica el resultado anterior por la relación de transmisión i y se obtiene que $D_2 = 66.45mm$.

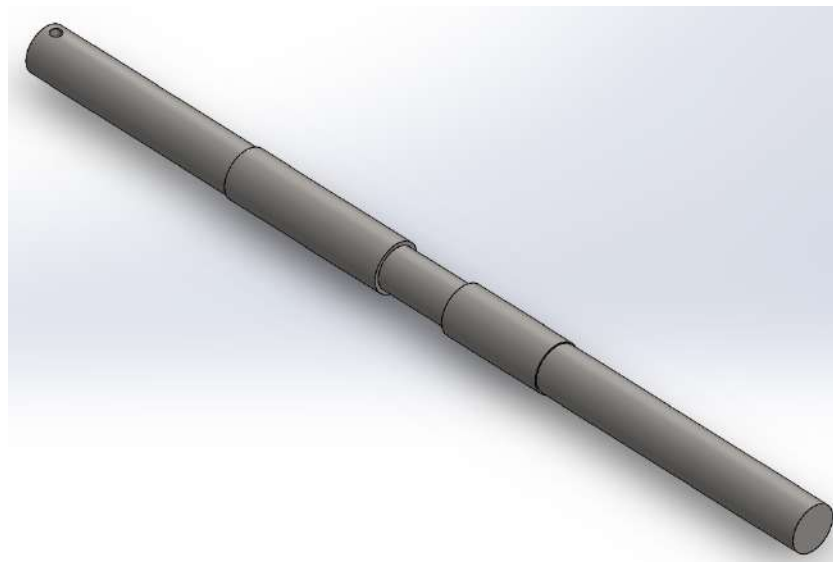
Con los cálculos anteriores se realiza un modelo 3D representativo de los ejes, los cuales se pueden observar en las siguientes figuras:

Figura 59: Eje conductor del rotor



Fuente: Autor

Figura 60: Eje conductor del generador



Fuente: Autor

Cabe mencionar que para dicho caso los ejes no contaron con un debido proceso de diseño, ya que se consideró que las fuerzas producidas por la rotación de la turbina no comprometerían su integridad estructural debido a las pequeñas magnitudes que estas representaban. Las geometrías maquinadas en estos se basaron mas en necesidad del montaje que en cálculos de esfuerzos.

6.8.7 Retroalimentación del diseño

Como ultima medida el sistema de transmisión de potencia debió ser modificado para ajustarse a las prestaciones del montaje. Se experimentaron problemas con el torque requerido por los elementos de transmisión, entre los que se probaron una correa y un o-ring, ambos requiriendo un par mucho mayor al que el rotor puede brindar.

Por lo anterior y tratando de acomodarse a relaciones que se tuviesen en existencia, se redujo un poco la relación de transmisión a $i = 5.11$ y se dividió en dos relaciones de transmisión, cada una con $i = 2.555$. Para esto se dividió el sistema en 3 ejes de movimiento, entrada, paso y salida, siendo el primero aquel que conecta con el rotor, el segundo como paso intermedio en ambas multiplicaciones y el tercero conectado al eje del generador.

Para el montaje se uso piñoneria y correas dentadas tipo servos, equipo usado generalmente en montajes electrónicos, donde los piñones grandes tenían un diámetro de 48.5 mm y los pequeños de 19 mm. Estos se ajustaron al eje de una bicicleta el cual ya contaba con rodamientos, haciendo posible el paso intermedio de la relación.

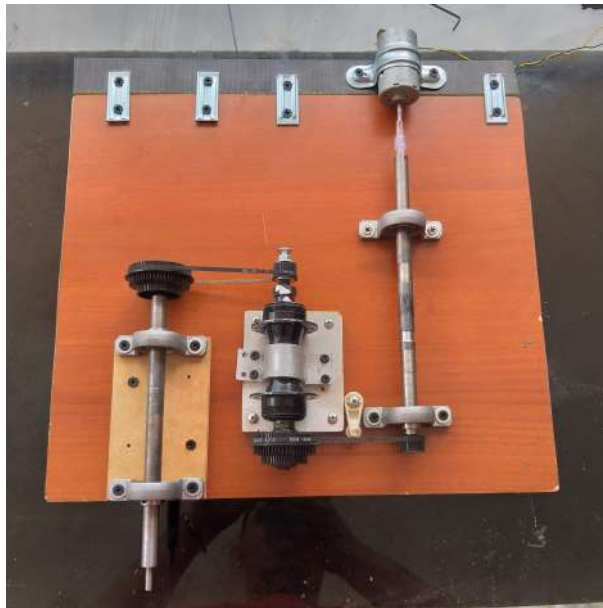
El acople flexible al generador se mantuvo por su versatilidad para manejar desalineaciones del sistema.

Para mayor facilidad a la rotación las tapas de los rodamientos fueron retiradas y se les roció desengrasante y lubricante durante la duración de la prueba, obteniendo un movimiento rotacional mucho mas suave. Se denota que el generador a usar también fue modificado, debido a que requería una mayor velocidad angular de la calculada para llegar al producir la cantidad de energía estimada. Se optó entonces por otro generador DC de mayor capacidad y que acorde con ensayos realizados produce alrededor de 8 V a la velocidad que se predestina se movería el sistema.

A partir de lo anterior se decide no modificar el circuito, ya que este al estar seccionado en diferentes partes, cada una con su respectivo retorno, solo es necesario accionar un número limitado de los arreglos hechos.

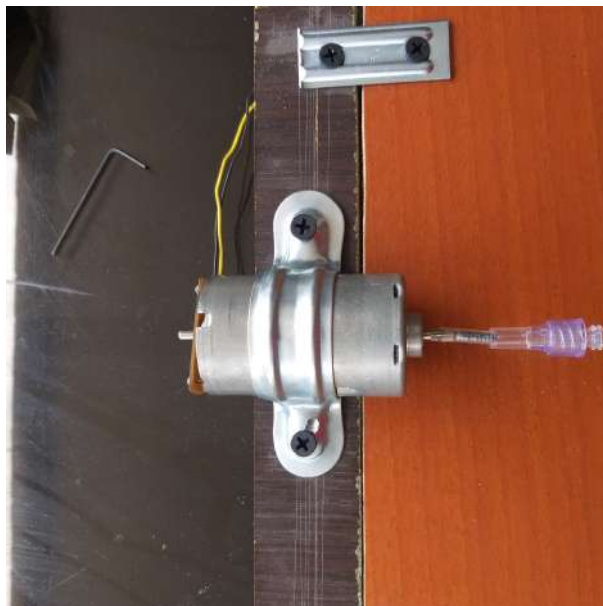
A continuación en las figuras 61, 62 y 63 se puede observar el montaje final que fue instalado en la estructura para llevar a cabo la experimentación.

Figura 61: Montaje final



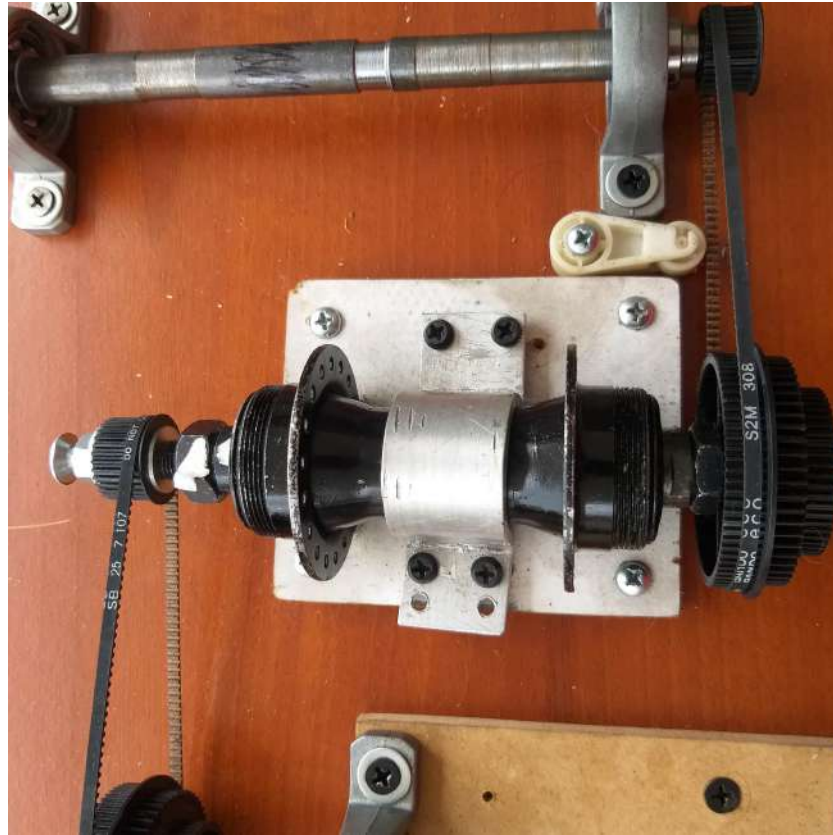
Fuente: Autor

Figura 62: Montaje final - Acople flexible



Fuente: Autor

Figura 63: Montaje final - Detalle de transmisión



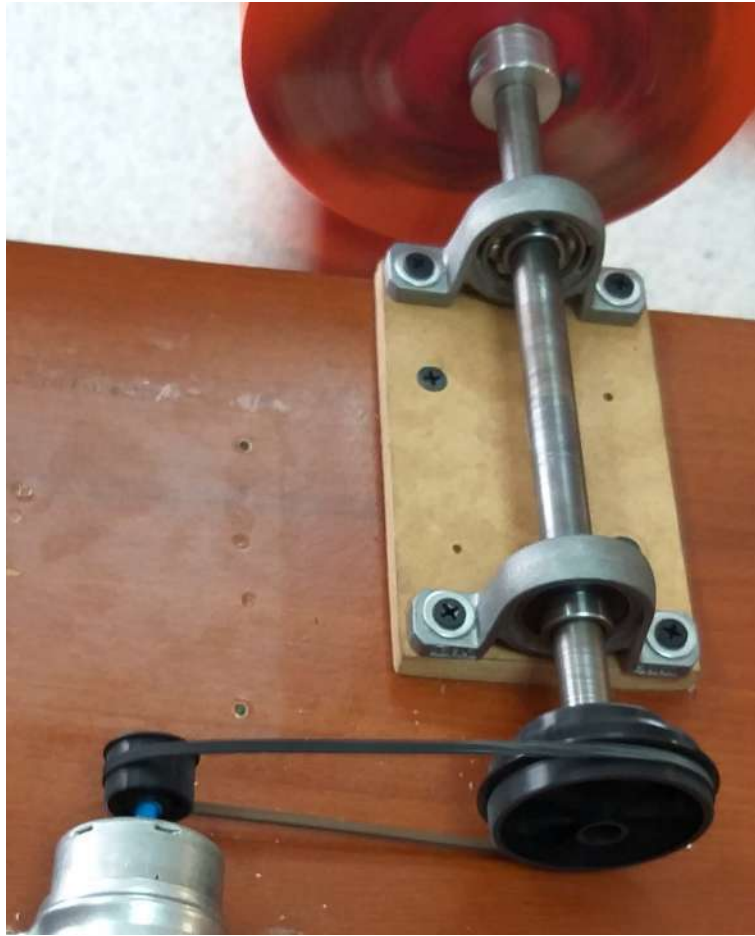
Fuente: Autor

6.8.8 Segunda ejecución de la prueba

Al intentar nuevamente ejecutar la prueba se encontró con que el montaje sufría de problemas de desalineación y exceso de fricción en el eje intermedio del sistema de transmisión, por lo que se optó por realizar una ultima modificación al sistema.

Realizando una pequeña fase de tanteo, se verifica que el torque producido por el rotor sea el suficiente para mover el nuevo sistema. Se decide entonces, acoplar el engranaje pequeño de la transmisión directo al eje del generador, acople hecho a través de secciones de manguera pequeña introducidos en apriete tanto en el eje del generador como en el agujero del engranaje, asegurando que no existiese ninguna clase de deslizamiento. En la figura 64 se puede observar la transmisión en su montaje definitivo.

Figura 64: Modificación de la transmisión



Fuente: Autor

La nueva relación de transmisión i por ende sería la mitad de lo que se había calculado anteriormente, $i = 2.555$.

Una vez verificado que el sistema fuese completamente funcional y que se estuviese generando energía eléctrica, se continuó con la fase de medición de corriente, voltaje y velocidad angular del sistema.

Al verificar que todo funcionaba correctamente y que el circuito no representaba problema alguno, se decidió modificarlo, agregando dos arreglos más LED-resistencia, para poder tener un rango más amplio de medición y trazar una mejor curva de potencia en ultimas.

6.8.9 Resultados de las mediciones.

Para las mediciones se estableció que debían ser 3 tomas de datos por medición para luego tomar encontrar un promedio aritmético. Esto

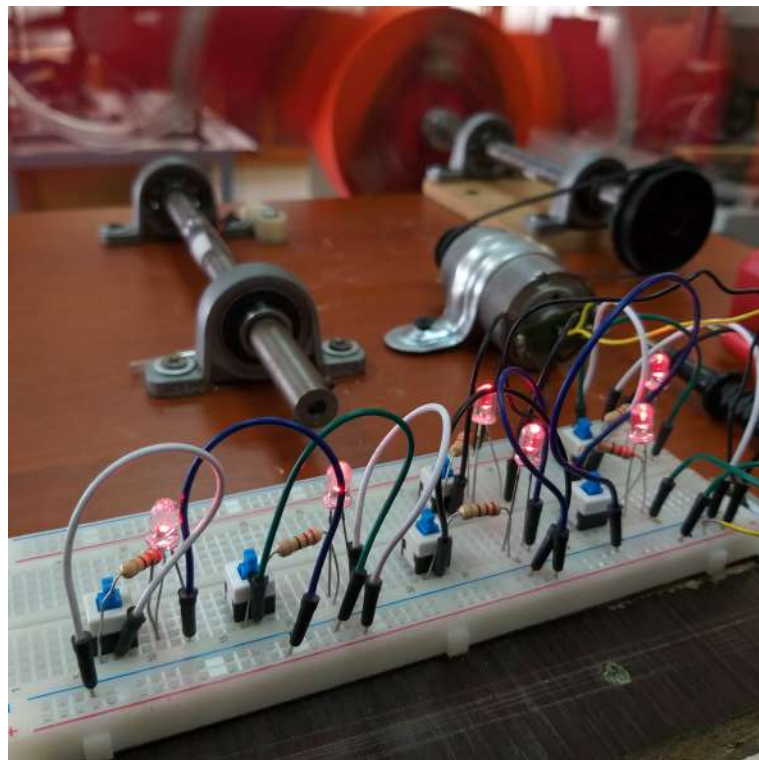
Tabla 1: Resultados de las pruebas en físico

Cantidad de bombillos	Corriente[mA]	Voltaje[V]	ω [rpm]
1	5.6	3.35	314.3
2	10.5	3.06	307.3
3	14.5	2.95	300
4	17.5	2.88	292.6
5	20.7	2.7	288.5
6	24.7	2.65	272.3

se estableció principalmente por oscilaciones en las mediciones que se discutirán mas adelante. Los resultados del promedio de estas mediciones se pueden apreciar en la tabla 1.

El proceso de medición se realizo de menor a mayor, es decir, iniciando con el generador en vacío y terminando con todos los LED encendidos. En la figura 65 podemos observar el montaje usado

Figura 65: Montaje definitivo en funcionamiento



Fuente: Autor

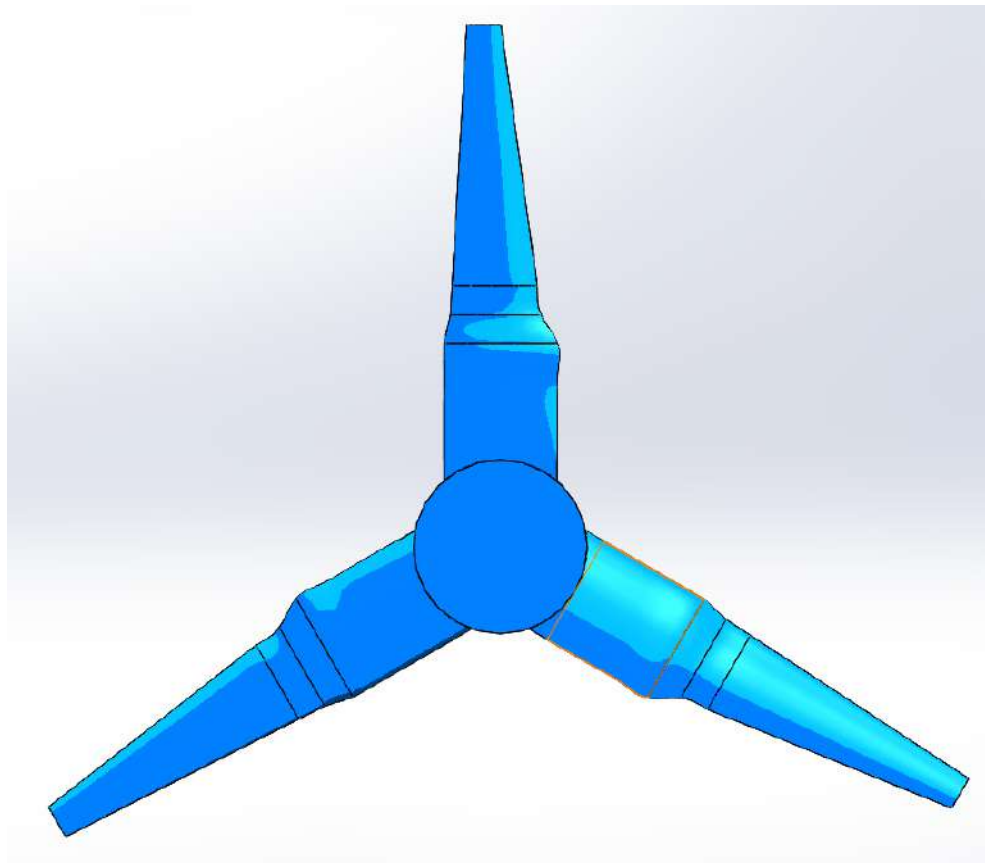
7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación los resultados serán presentados acorde con cada una de las secciones argumentadas en la metodología.

7.1 Diseño y simulación

Se hace necesario adjuntar estos dos puntos ya que, como es explico en la metodología, el proceso de diseño fue de la mano en un ciclo iterativo entre cálculos y simulaciones de BEM, lo cual permitió consolidar la geometría requerida. Para mayor información acerca del rotor, en el anexo 1 se pueden observar los planos en detalle y en las figuras 66 y 67 se observa una imagen tomada del software CAD Solidworks.

Figura 66: Diseño final - Vista Frontal



Fuente: Autor

Figura 67: Diseño final - Vista Superior



Fuente: Autor

A continuación podemos comparar los resultados de los cálculos obtenidos por las simulaciones.

Tabla 2: Comparación de cálculos de potencia

Software	Potencia [W]
Matlab	36.2769
Qblade	45
ANSYS	47.223

Como se observa en la tabla 2, los resultados de las simulaciones entre Qblade y ANSYS fueron bastante consistentes, una diferencia de solo 2.223 W entre ellas, lo cual se usó como un punto de referencia muy importante en el proceso de diseño y simulación, ya que como se puede denotar la diferencia entre el resultado de Matlab y los demás es mucho más marcada, alrededor de 5 veces mayor. Sin embargo esto no se demarca como un error o mal calculo, ya que el código en Matlab solo tiene en cuenta el área de cada ala por separado, sin tener en cuenta el centro del rotor, elemento que aumenta el radio y en ultimas la potencia, ya que se demarca una relación bastante fuerte entre estas dos propiedades del rotor. Cabe mencionar que el código de Matlab más que para tener un resultado fehaciente sobre el desempeño del rotor, se usaría para obtener las pistas necesarias sobre qué cambios deberían hacerse a la geometría y parámetros en Qblade para obtener un mayor desempeño. Lo anterior se llevó a cabo para una mayor practicidad y rapidez en la búsqueda de los ajustes posibles y necesarios.

7.2 Impresión 3D

Fijándose en la figura 48 se puede observar el rotor completamente hecho a base de impresión 3D, proceso que incurrió en muchos obstáculos

debido a inconvenientes con la impresora y el tamaño de las piezas, ya que se decidió por cuestiones de tiempo de impresión y consumo de material reducir la escala del rotor a la mitad. A pesar de la decisión anterior, el rotor requirió cerca de 100 horas de impresión y un número significativo de piezas tuvieron que ser impresas repetidas veces tanto por errores como por fallas en el servicio de energía de la zona que interrumpieron el proceso y dañaron las piezas en proceso de impresión.

7.3 Experimentación

Luego de validar el modelo propuesto a través de la experimentación se encontraron los siguientes datos:

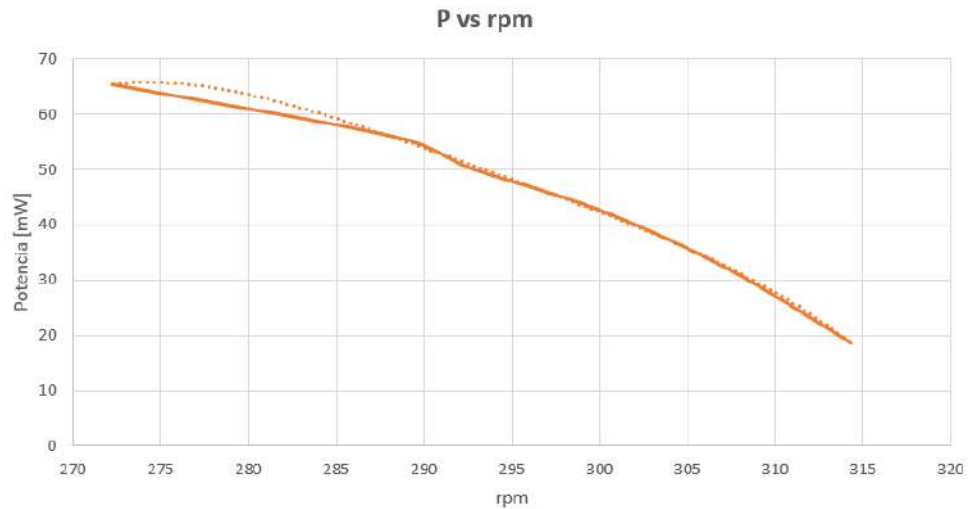
- La velocidad angular a la cual se había calculado su funcionamiento óptimo se duplicó al haber reducido la escala a la mitad del tamaño original.
- Se presentaron fluctuaciones en el movimiento rotacional del rotor.

luego de tabular los datos resultantes de las mediciones en la sección anterior, se calculó la potencia y se efectuó una curva de Potencia vs Velocidad angular, con la finalidad de trazar una regresión lineal y tomar las mediciones como punto de estudio para generar un modelo que ayude a determinar de la mejor manera la cantidad de potencia máxima que sería capaz de generar la turbina. A continuación se pueden observar estos resultados.

Tabla 3: Cálculo de potencia generada

Cantidad de bombillos	ω [rpm]	Potencia[mW]
1	314.3	18.76
2	307.3	32.13
3	300	42.775
4	292.6	50.4
5	288.5	55.89
6	272.3	65.455

Figura 68: Gráfica Potencia vs rpm



Fuente: Autor

Junto con la gráfica de la figura 68 se generó una regresión lineal de carácter polinómico con el fin de darle un trazado teórico a la cantidad máxima de generación de energía eléctrica. La regresión se expresa como la ecuación 53.

$$y = -0.0002x^3 + 0.1161x^2 - 29.513x + 2593.9 \quad (53)$$

El modelo cúbico fue el que más se acomodó a los resultados teniendo en cuenta previos cálculos de potencia, simulaciones y el montaje realizado.

Teniendo en cuenta esto, se resuelve la ecuación para cuando $x = 0$ obteniendo que teóricamente la potencia máxima a generar es de 2.5939 W.

Se podría llegar a pensar que es un valor ínfimo, casi despreciable, pero se debe tener en cuenta que un generador aumenta su producción de energía a medida que aumentan la velocidad angular de su eje de entrada, razón por la cual se trató en lo posible que la relación de transmisión fuese tan elevada como se pudiese. Ahora, la relación de transmisión fue de 2.555 y la velocidad angular máxima de la turbina en vacío se ubicó en 330 rpm, por lo que multiplicando brevemente, se encuentra que la velocidad angular máxima de entrada del generador fue de 843.15 rpm. El anterior cálculo se realiza para denotar que

aunque pareciese un desarrollo extremo para resultados tan pequeños, se muestre que el generador estaba girando a una velocidad bastante baja, ya que este tipo de dinamos están contruidos para llegar a su punto óptimo de generación alrededor de las 6000 rpm. Estos resultados podrían llegar a optimizarse mucho mas si al sistema se le diseñara un sistema de transmisión que garantice transmisión de torque suficiente y suavidad al movimiento.

Por otra parte, se encontraron fluctuaciones en el movimiento provenientes de cambios en el flujo del viento producido por el ventilador, lo cual causaba vibraciones en la estructura por las repentinas aceleraciones y desaceleraciones del rotor. Observando el comportamiento de las mediciones de velocidad angular del sistema, se encontró que las estas variaban en ± 30 rpm, situación que complicó el proceso de medición por falta de un punto donde se estabilizara con un error de menor tamaño. Esto se reflejaba en las mediciones de corriente y voltaje donde se presentaba el mismo patrón de curva senoidal entre puntos máximos y mínimos.

8 CONCLUSIONES

Se logró consolidar el diseño del rotor acorde con las especificaciones previamente establecidas entregando un desempeño aceptable para esta etapa del proyecto. En el anexo 1 se puede encontrar los planos de la vista frontal del diseño original.

La rutina de simulación desarrollada, la cual comprendió el uso de Matlab, Qblade y ANSYS, demostró ser adecuada para la metodología entregando resultados consistentes entre sí, permitiendo fácil manipulación de los datos y el diseño bajo las consideraciones tomadas.

En cuanto a la impresión 3D del rotor, como se explicó previa y ampliamente, la escala debió ser modificada por las razones mencionadas pero gracias a esto se pudieron encontrar puntos interesantes en el desarrollo de las pruebas, como por ejemplo, que al escalarlo a la mitad la velocidad angular se duplicaría. Aparte de esto, gracias a los problemas encontrados con el sistema de transmisión se puede decir que el diseño y las simulaciones deben llevarse a cabo priorizando el torque inicial producido por el rotor, elemento que ayuda a la hora de implementar sistemas de transmisión.

Para concluir, yuxtaponiendo los resultado de las simulaciones con los de las pruebas conducidas, se realiza el cálculo requerido para hallar el porcentaje de la potencia teórica alcanzado, haciendo la suposición de que la potencia se comportaría de manera casi lineal al igual que la velocidad angular en cuanto a la reducción de escala, se halla que se alcanzó el 11.11 % de la potencia teórica. Tomando para el cálculo la potencia teórica como 22.5 W y la potencia experimental como el máximo teórico a producir calculado anteriormente. A partir de esto se puede decir que el desarrollo culmina mostrando un gran potencial para futuras investigaciones que puedan optimizar el diseño y montaje del proyecto en busca de aumentar la producción de energía eléctrica a través de este método en zonas donde el perfil de vientos sea tan bajo como el de la región que se presenta en el estudio.

9 RECOMENDACIONES

se recomienda principalmente tener siempre en cuenta la velocidad de generación del dinamo y el montaje requerido para llevar el sistema a esta velocidad, punto por el cual fueron necesarios muchos ensayos a prueba y error hasta encontrar el punto óptimo de funcionamiento del montaje.

También se recomienda el uso de un pegante de una consistencia mucho más densa, así evitando el derramamiento de este a lo largo de la geometría del rotor. Lo anterior aplica para el caso en el que el rotor sea impreso en 3-D, omitir en caso contrario.

Siempre suavizar el movimiento de los rodamientos y ajustar cualquier desalineación existente, a menor resistencia al movimiento rotacional más fácil será para el rotor poder entregar potencia y menores serán las pérdidas mecánicas.

El torque al inicio debe ser priorizado en el diseño del rotor, a través de un estudio más intensivo en CFD se puede optimizar la geometría del rotor variando parámetros como la longitud de la cuerda o el ángulo del perfil de las secciones más próximas al rotor.

Se aconseja la construcción de una estructura con mayor rigidez o que sea capaz de absorber las vibraciones que se generen con el movimiento del rotor.

Se recomienda continuar el proceso investigativo, mejorando el sistema de transmisión de potencia, preferenciando el movimiento suave de la rotación del eje de entrada ya que fue el elemento que más problemas presentó durante el montaje de las pruebas, impidiendo el movimiento en la gran mayoría de estas.

Por último, en cuanto al sistema de transmisión, se recomienda diseñar el montaje de transmisión en función del cálculo de fuerzas y torque de las poleas o engranajes que se vayan a usar, conociendo este valor se puede garantizar el movimiento a través de un sistema de diversas multiplicaciones que es lo que se aconseja en el caso para evitar relaciones directas excesivas.

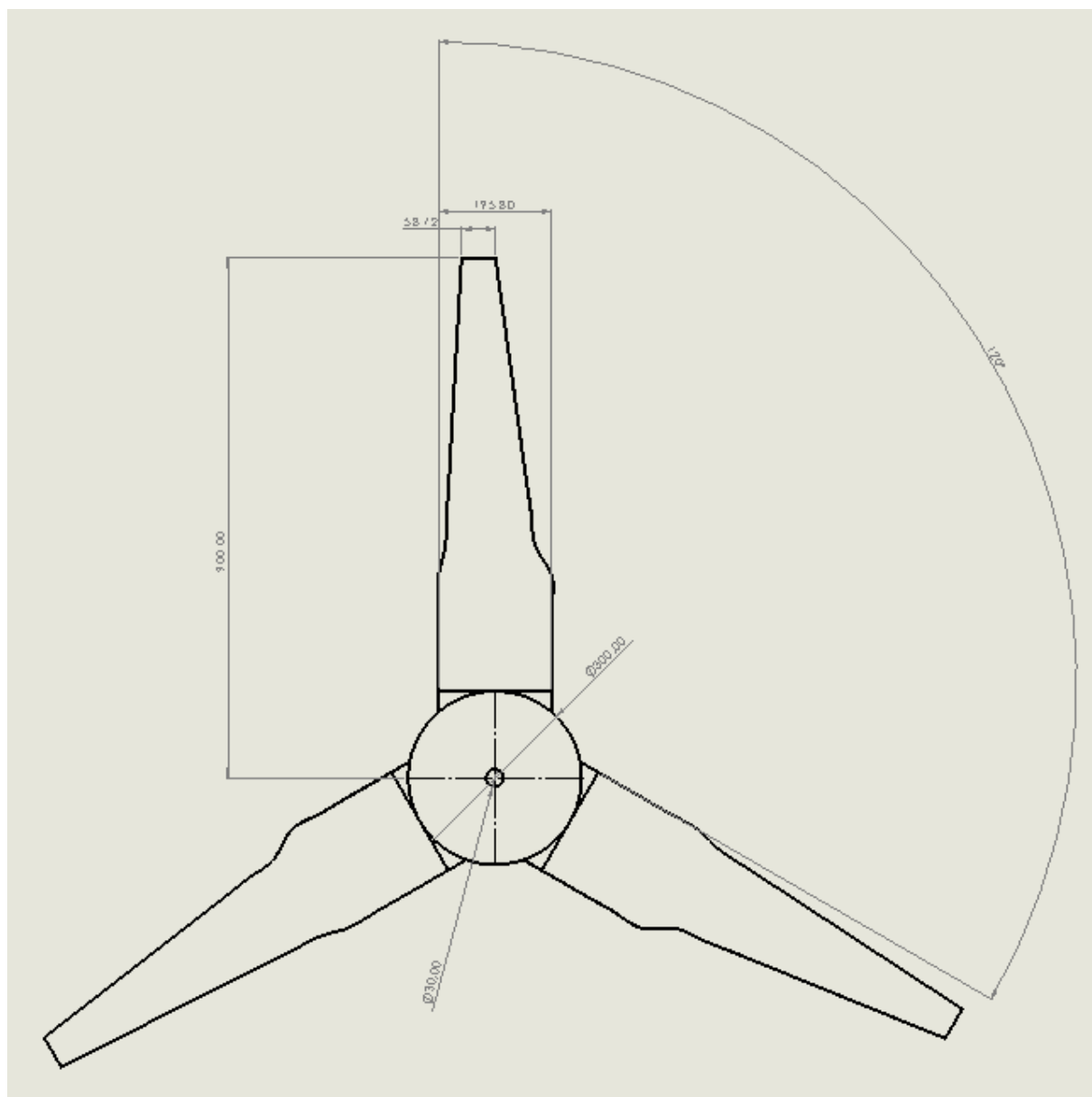
References

- [1] Sitio web de la administración de información de energía de estados unidos, eia. <https://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=electricity-generating>.
- [2] Sitio web de la agencia nacional aero espacial de estados unidos, nasa. <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/k-4/stories/nasa-knows/what-is-aerodynamics-k4.html>.
- [3] Sitio web de la ast (advanced simulation technologies). <http://www.ast-ingenieria.com/capacidades-soluciones/simulacion-cfd/cfd-simulation>.
- [4] Sitio web de la nasa, ecuaciones de navier-stokes. <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/nseqs.html>.
- [5] Sitio web de la sociedad americana de ingenieros mecánicos, asme. <https://www.asme.org/engineering-topics/turbines>.
- [6] Sitio web de noticias e información de caracter científico, live science. <https://www.livescience.com/47930-what-is-aerodynamics.html>.
- [7] Sitio web de simscale, software de simulación. <https://www.simscale.com/docs/content/simwiki/cfd/whatis CFD.html>.
- [8] Sitio web del foro de simulación australasia. <http://www.simulationaustralasia.com/about/what-is-simulation>.
- [9] Sitio web del instituto para investigación en energía, ier. <https://www.instituteforenergyresearch.org/electricity-generation-2/>.
- [10] Masoud Mirzaei Abolfazl Pourrajabian, Reza Ebrahimi. Applying micro scales of horizontal axis wind turbines for operation in low wind speed regions. 2014.
- [11] Tawit Chitsomboon Chalothorn Thumathae. Optimal angle of attack for untwisted blade wind turbine.

- [12] P. W. Carpenter E. L. Houghton. *Aerodynamics for Engineering Students*. 2003.
- [13] Jeppe Johansen Peter Fuglsang Franck Bertagnolio, Niels N. Sørensen. *Wind turbine airfoil catalogue*. Technical University of Denmark.
- [14] Grant Ingram. Wind turbine blade analysis using the blade element momentum method, version 1.1. October 18, 2011.
- [15] Louis S. Stivers jr. Ira H. Abbot, Albert E. von Doenhoff. Summary of airfoil data. 1945.
- [16] Andy P. Broeren Philippe Giguère Michael S. Selig, James J. Guglielmo. *Summary of Low-Speed Airfoil Data*. SOARTECH PUBLICATIONS, 1955.
- [17] Muhammad R. Hajj Mohamed Y. Zakaria, Daniel A. Pereira. Experimental investigation and performance modeling of centimetres-scale micro-wind turbine energy harvesters. 2015.
- [18] Richard J. Crossley Peter J. Schubel. Wind turbine blade design, 2012.
- [19] Talha Ahmed Kamel Ali Khalil Slih N. Akour, Mohammed Al-Heydari. Experimental and theoretical investigation of micro wind turbine for low wind speed regions. pages 215, 223.
- [20] Tongguang Wang. A brief review on wind turbine aerodynamics. 2012.

ANEXO 1

Figura 69: Vista Frontal



Fuente: Autor