

Diseño y simulación de un aerogenerador tripala en Boyacá, mediante dinámica
de fluidos computacional

Alumno: Andrés Parra Báez

Carrera:

Ingeniería Mecánica

Directores: Ing. Yina Faizully Quintero Gamboa

Ing. Edwin Rúa Ramírez

Universidad Santo Tomás

Tunja

2021

Diseño y simulación de un aerogenerador tripala en Boyacá, mediante dinámica
de fluidos computacional

ANDRÉS PARRA BÁEZ

Tesis realizada para optar el título de Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

TUNJA

2021

Nota de aceptación:

X

Presidente del jurado

X

jurado

X

Jurado

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	11
RESUMEN.....	12
ABSTRACT.....	13
1. INTRODUCCIÓN	14
2. TIPOS DE AEROGENERADORES.....	16
2.1. AEROGENERADORES VERTICALES.....	16
2.2. AEROGENERADORES HORIZONTALES.....	20
3. ESTADO DEL ARTE	25
4. COMPONENTES DE UN AEROGENERADOR TRIPALA	28
4.1. COMPONENTES EXTERNOS	28
4.1.1. Cimentación.....	29
4.1.2. Torre.....	29
4.1.3. Góndola.....	30
4.1.4. Rotor.....	31
4.2. COMPONENTES INTERNOS	33
4.2.1. Eje principal:.....	33
4.2.2. Multiplicadora:	33
4.2.3. Equipamiento eléctrico:	34
4.2.4. Sistema de control:.....	35
4.2.5. Mecanismos auxiliares:	35
4.2.6. Buje:	35
5. DEPARTAMENTO DE BOYACA.....	37
5.1. MUNICIPIOS APTOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE AEROGENERADORES.....	38
6. PARAMETROS Y REQUERIMIENTOS.....	39
6.1. EL VIENTO.....	39
6.2. DIRECCIÓN DEL VIENTO.....	39

6.3.	VELOCIDAD DEL VIENTO.....	40
6.4.	POTENCIA DEL VIENTO.....	41
6.5.	ORIENTACION DEL VIENTO PARA LAS TURBINAS.....	41
6.5.1.	Orientación a Barlovento:.....	41
6.5.2.	Orientación a Sotavento:.....	42
6.6.	DENSIDAD DE LA ENERGIA EÓLICA.....	43
6.7.	LIMITE DE BETZ.....	44
9.	PRINCIPIOS BASICOS PARA EL DISEÑO Y SELECCIÓN DE UN PERFIL AERODINAMICO.....	50
9.1.	CONTROL DE LA POTENCIA DE UN AEROGENERADOR.....	56
7.1.1.	Control activo por cambio de paso del ángulo de las palas:.....	56
7.1.2.	Control pasivo por desprendimiento o pérdida de flujo.....	57
10.	METODOLOGIA.....	58
10.1.	LOCALIZACIÓN DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS UBICADAS EN EL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ.....	59
10.2.	REGISTROS E INFORMACIÓN RECOPIADA DE LAS ESTACIONES METEOROLOGICAS.....	60
10.2.1.	Ciclo diurno y anual.....	61
11.	MODELO Y UBICACIÓN DE LA TURBINA EÓLICA.....	64
11.1.	SELECCIÓN DE EL PERFIL AERODINAMICO RESPECTO A LAS VELOCIDADES DEL SITIO.....	65
12.	DISEÑO DEL AEROGENERADOR EN 3D INVENTOR.....	74
12.1.	DISEÑO DEL PERFIL AERODINAMICO NACA 4412.....	74
12.2.	DISEÑO DEL BUJE.....	82
12.3.	DISEÑO DE LA TORRE Y DE LA GONDOLA.....	83
12.4.	DISEÑO DE LA NARIZ.....	84
12.5.	ENSAMBLE DEL AEROGENERADOR.....	85
13.	SIMULACIÓN ANSYS CFD.....	86
13.1.	INTRODUCCIÓN A LA SIMULACIÓN FLUODINÁMICA.....	86
13.1.1.	Pasos para realizar una simulación CFD.....	86
13.1.2.	Aplicaciones de CFD en la industria.....	87
13.2.	DISCRETIZACIÓN ESPACIAL.....	87

13.2.1. Mallados estructurados.	87
13.2.2. Mallados no estructurados.	88
13.3. DISCRETIZACIÓN DE LAS ECUACIONES	88
13.3.1. Método de las diferencias finitas	88
13.3.2. Método de volúmenes finitos.....	88
13.3.3. Método de elementos finitos	89
13.4. DISCRETIZACIÓN TEMPORAL.....	89
13.5. CONDICIONES DE CONTORNO.	91
13.6. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL CFD.	92
13.7. ANSYS.	92
13.8. DESIGN MODELER.	93
13.9. MALLADO DE LA GEOMETRIA.....	100
13.9.1. Funciones de pared.....	104
13.10. MODULO SETUP FLUENT.	107
14. ANALISIS DE LOS RESULTADOS.....	113
14.1. VELOCIDAD.....	113
14.2. PRESIÓN	116
14.3. TURBULENCIA Y VISCOSIDAD DE TURBULENCIA.....	119
14.4. FUERZAS Y MOMENTOS	120
CONCLUSIONES	122
BIBLIOGRAFIA.	124
ANEXOS.....	128

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Aerogenerador Savonius.	17
Figura 2. Aerogenerador Darrieus.	18
Figura 3. Aerogenerador Giromill.	19
Figura 4. Aerogenerador Windside.	20
Figura 5. Aero turbina lenta.	21
Figura 6. Aerogenerador Tripala.	22
Figura 7. Aerogenerador tipo bipala.	23
Figura 8. Aerogenerador tipo monopala.	24
Figura 9. Aerogenerador Hywind.	25
Figura 10. Aerogenerador Wind Tree.	26
Figura 11. Aerogenerador Vortex.	27
Figura 12. Partes de un aerogenerador tripala.	28
Figura 13. Cimentación.	29
Figura 14. Torre.	30
Figura 15. Góndola.	31
Figura 16. Nariz del aerogenerador.	31
Figura 17. Fabricación de las palas de un aerogenerador.	32
Figura 18. Partes internas de un aerogenerador.	33
Figura 19. Multiplicador.	34
Figura 20. Generador de turbinas eólicas.	34
Figura 21. Sistema de control.	35
Figura 22. Buje.	36
Figura 23. Mapa municipal del departamento de Boyacá.	37
Figura 24. Atlas de vientos de Colombia.	38
Figura 25. Rosa de los vientos.	40
Figura 26. Aerogenerador a Barlovento.	42
Figura 27. Aerogenerador a Sotavento.	42
Figura 28. Modelo de Betz.	46
Figura 29. Principales variables del funcionamiento de un aerogenerador.	51
Figura 30. Curvas del rendimiento aerodinámico C_p	53
Figura 31. Diagrama de fuerzas para un perfil aerodinámico.	54
Figura 32. Flujo laminar y flujo turbulento.	54
Figura 33. Comportamiento del viento al chocar con un perfil aerodinámico.	55
Figura 34. Diagrama de fuerzas para un perfil aerodinámico.	57
Figura 35. Desprendimiento de flujo en un perfil aerodinámico.	58

Figura 36. Localización de estaciones meteorológicas ubicadas en el departamento de Boyacá.....	60
Figura 37. Periodo de registro y resolución de información recopilada.....	61
Figura 38. Diagrama Hovmoller de la estación Villa Carmen.....	62
Figura 39. Diagrama Hovmoller de la estación Guachaneca.....	63
Figura 40. Características que conforman el diseño de un perfil aerodinámico....	65
Figura 41. Parámetros de perfiles aerodinámicos.....	67
Figura 42. Boceto de un perfil aerodinámico Naca 4412.	68
Figura 43. Gráfica Cl vs Alpha.	70
Figura 44. Grafica Cd vs Alpha.	70
Figura 45. Sitio web Airfoil Tools.....	74
Figura 46. Resultados de la búsqueda del perfil Naca 4412.....	75
Figura 47. Perfil aerodinámico Naca 4412.....	76
Figura 48. Puntos importados del perfil Naca a Inventor.	76
Figura 49. Plano de inclinación del perfil.	77
Figura 50. Pala del aerogenerador formada por los perfiles en distintos planos paralelos.	79
Figura 51. Eje de la pala del aerogenerador.	79
Figura 52. Solevación de los bocetos.	80
Figura 53. Pala del aerogenerador creada a partir del comando Solevación Inventor.....	81
Figura 54. Extrusión de la raíz de la pala.....	81
Figura 55. Buje del aerogenerador.	82
Figura 56. Base de la torre.	83
Figura 57. Torre – Góndola.....	83
Figura 58. Comando Revolución - Nariz del aerogenerador.....	84
Figura 59. Nariz del aerogenerador.	84
Figura 60. Ensamble de las piezas.	85
Figura 61. Condición de contorno de no deslizamiento (izquierda) y de tangencia (derecha)	91
Figura 62. Importación de la geometría desde el software Inventor al software CAE.	93
Figura 63. Coordenadas del comando translación.....	94
Figura 64. Resultado de la operación translación.....	94
Figura 65. Operación escalada.....	95
Figura 66. Resultado de la operación escalado.....	95
Figura 67. Detalles de la función rotación.....	96
Figura 68. Superficies creadas en la raíz de cada pala.	96
Figura 69. Circunferencias creadas en planos equidistantes.....	97
Figura 70. Detalles de la operación Skin.	97
Figura 71. Volumen de control.....	98

Figura 72. Resultado del primer Boolean.....	99
Figura 73. Resultado del segundo Boolean.....	99
Figura 74. Identificación de la superficie por donde entra el fluido.	100
Figura 75. Identificación de la superficie por donde sale el fluido.....	101
Figura 76. Identificación de la superficie por donde fluye el fluido.....	101
Figura 77. Identificación de las palas del aerogenerador.....	102
Figura 78. Características determinantes para generar el mallado.....	102
Figura 79. Modificaciones en el comando Sizing para beneficio del mallado.	103
Figura 80. Estimación del tamaño del elemento para las palas del aerogenerador.	105
Figura 81. Mallado final de la estructura.....	105
Figura 82. Cell Zone Conditions.....	107
Figura 83. Boundary Conditions (Inlet).	108
Figura 84. Boundary Conditions (outlet).	109
Figura 85. Solutions Methods.	110
Figura 86. Residuals Monitors.	110
Figura 87. Solution Initialization.	111
Figura 88. Run Calculation.	112
Figura 89. Velocidad del viento al atravesar el rotor.....	113
Figura 90. Líneas de velocidad de flujo al impactar sobre el rotor.....	114
Figura 91. Giro del fluido observado desde el plano Z.....	115
Figura 92. Velocidad lineal de palas del aerogenerador.....	115
Figura 93. Presión sobre las palas del aerogenerador.	116
Figura 94. Presión sobre las palas del aerogenerador desde una vista isométrica.	116
Figura 95. Visualización de la presión junto a las líneas de velocidad.....	117
Figura 96. Presión junto al giro del flujo en el plano Z.	118
Figura 97. Presión de flujo al atravesar el rotor.	118
Figura 98. Zonas en que el fluido genera turbulencia.....	119
Figura 99. Zonas de turbulencia desde una perspectiva más cerca.....	119
Figura 100. Valores de Viscosidad de la turbulencia.	120

TABLA DE TABLAS

Tabla 1. Clases de aerogeneradores para las zonas con potencial eólico en el departamento de Boyacá	64
Tabla 2. Especificaciones técnicas del aerogenerador a diseñar.	73
Tabla 3. Datos de los perfiles en los planos.	78
Tabla 4. Criterio de la calidad de mallas creadas.	106
Tabla 5. Valores de fuerza sobre el aerogenerador	121
Tabla 6. Valores de momentos que actúan sobre el aerogenerador.	122

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo tengo que agradecer a mi familia que siempre ha estado conmigo apoyándome, ayudándome en las decisiones que tomo para ser una mejor persona con valores y capaz.

También quiero agradecer a todos mis compañeros, amigos y futuros colegas que conocí a medida que avanzaba la carrera, ya que con ellos enfrentamos varios retos que nos propuso la Universidad para seguir avanzando y formarnos como profesionales.

Le agradezco a la Universidad Santo Tomas de Tunja, a todos los docentes y demás directivas que me ayudaron en este proceso de formación profesional y así adquirir los conocimientos necesarios para afrontar futuros problemas ingenieriles. Por último y no menos importante le doy gracias a mis tutores, la ingeniera Yina Quintero y al ingeniero Edwin Rúa, por ayudarme en la realización de este proyecto.

RESUMEN

Este proyecto tuvo como objetivo diseñar y simular el funcionamiento de un aerogenerador tripala con las condiciones climáticas del departamento de Boyacá; el proyecto comenzó con la historia de las primeras turbinas eólicas que existieron y su evolución hasta el día de hoy, también se dieron a conocer las partes externas e internas que componen un aerogenerador, definiendo sus funciones.

Se hizo una investigación acerca de las diferentes variables y ecuaciones que hacen poner en funcionamiento un aerogenerador para producir energía eléctrica a partir de la energía cinética del viento. Se estableció un municipio con buenas condiciones de viento para los respectivos análisis de la turbina.

Después, se realizaron cálculos para el diseño del perfil aerodinámico que conforma la pala del aerogenerador, el diseño de toda la estructura se hizo en el software Inventor y su simulación en el software ANSYS Fluent® aplicando la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

En cuanto a la parte final, cuando se obtengan los resultados de la simulación, se realizará un análisis y conclusiones para establecer posibles mejoras.

ABSTRACT

The objective of this project was to design and simulate the operation of a three-bladed wind turbine with the climatic conditions of the department of Boyacá; The project began with the history of the first wind turbines that existed and their evolution until today, the external and internal parts that make up a wind turbine were also revealed, defining their functions.

An investigation was carried out on the different variables and equations that make a wind turbine work to produce electrical energy from the kinetic energy of the wind. A municipality with good wind conditions was established for the respective turbine analyzes.

Subsequently, the calculations were made for the design of the aerodynamic profile that makes up the wind turbine blade, the design of the entire structure was carried out in the Inventor software and its simulation in the ANSYS Fluent® software applying Computational Fluid Dynamics (CFD).

As for the final part, when the simulation results are obtained, an analysis and conclusions will be carried out to establish possible improvements

1. INTRODUCCIÓN

La explotación de recursos naturales es un problema que siempre ha estado presente para la sustentación y generación de energía eléctrica, por lo tanto, existe la obligación de modificar la manera en que se está generando dicha energía, debido al gran impacto de contaminación medio ambiental a nivel mundial.

Las grandes Plantas eléctricas presentan procesos complejos para la obtención de la energía, que implican costos muy elevados para el diseño y construcción de dichas instalaciones, incluyendo el gran volumen de materiales, equipos y mano de obra que se debe conseguir; por esta razón es necesario investigar sobre los beneficios que se tiene al implementar e invertir en energías renovables como lo es la eólica, que es un modelo generador limpio, sostenible a un bajo costo, siendo una alternativa de la energía producida por los combustibles fósiles.

Al día de hoy se puede observar con claridad las consecuencias de producir energía eléctrica y mecánica a través de la combustión de minerales o fósiles (recurso natural o descompuestos de animales y plantas que tardan millones de años en regenerarse), provocando el aumento de temperatura en todo el planeta tierra, derritiendo polos y glaciares, afectando drásticamente las estaciones climáticas, contaminando el aire, y así perjudicar a la los distintos ecosistemas que albergan vida en el planeta Tierra.

Boyacá es uno de los departamentos de Colombia que posee potencial para desarrollar este proyecto en pro del medio ambiente y de la población, la región está ubicada en la cordillera oriental que presenta una altitud considerable y produce fuertes corrientes de viento, de tal manera que, se puede aprovechar este recurso que, además es gratis para la generación de energía eléctrica¹.

Es por esta razón, que el proyecto tiene la intención de diseñar y simular un aerogenerador que sea conveniente para algún municipio del departamento, para lo cual es imprescindible averiguar el estado en que esta la energía eólica respecto

¹ D. Ojeda, «El medio ambiente en Colombia,» [En línea]. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/000001/cap7.pdf>

a las tecnologías, antecedentes y proyectos a futuro que esta zona del país pueda presentar.

La energía eólica es aquella que se adquiere a partir del viento, es decir, se utiliza la energía cinética del viento para transformarla en electricidad; esto se consigue con la ayuda de las hélices, su forma y la posición en que se ubiquen, estas van unidas a su vez con un generador eléctrico, proporcionando un movimiento mecánico y así transformarlo en electricidad.

Los aerogeneradores principalmente dependen del viento, lo que quiere decir que, es importante tener en cuenta la actividad de masa de aire que se generan debido al cambio de temperatura y de las zonas de altas y bajas presiones, esto hace que el aire se mueva de un lugar a otro en distintas condiciones y direcciones. A lo largo del día el aire que está en los continentes suele calentarse, aumentando su densidad y haciendo que se eleve, el aire que se encuentra sobre los océanos se enfría, lo que hace que su densidad disminuya y permanezca sobre el nivel del mar; es por esto que existe el viento con altas y bajas velocidades, siendo un factor muy importante para los aerogeneradores. Convirtiendo a la energía eólica en uno de los medios energéticos más limpios y económicos que existen.

2. TIPOS DE AEROGENERADORES

La energía contenida por el viento ha sido utilizada desde la antigüedad en los años 3000 a.C. la energía eólica fue empleada en el antiguo Egipto, para los barcos de vela que funcionaban con el viento para poder trasladarse por mares y océanos, ya en el siglo VII aparecieron los molinos de viento en Afganistán, los cuales utilizaban las velocidades del viento para mover piedra, bombear agua y triturar trigo.

Un inventor llamado Lord Kelvin tuvo la intención de unir un generador eléctrico a una máquina para que utilizara la energía del viento y así en 1802 producir el primer aerogenerador, sin embargo no fue hasta 1850 que se logró extraer electricidad, porque fue el año en que se descubrió el dínamo. Años más adelante en 1888 fue Charles Brush quien invento el primer aerogenerador eléctrico².

En el siglo XX, Estados Unidos fue uno de los primeros países en donde comenzaron a aparecer modelos de aerogeneradores para implementarlos en zonas rústicas, capaces de generar hasta 3KW de potencia. En 1940, a pesar de la segunda guerra mundial cuando el petróleo estaba más económico, aparece uno de los primeros molinos más rápidos y grandes capaces de producir una potencia de 1MW de potencia los cuales ignoraron por causa de la gran demanda que estaba presentando el petróleo.

En los años 70 los gobiernos comenzaron a interesarse por la nueva forma en que se estaba obteniendo energía, gracias a las protestas que iban en contra de la energía nuclear y a la crisis en que estaba el petróleo, debido a esto, los gobiernos promovieron su desarrollo y disminuyeron el costo energético. Su implementación se potencializó cuando en el año 1981 se fabricó un aerogenerador de 55KW que reducía los costos de generación de electricidad hasta la mitad³.

A partir de entonces, se ha avanzado mucho en las tecnologías de los aerogeneradores hasta el día de hoy, encontrando diversos tipos de geometrías y principios de funcionamiento, sin embargo, se pueden clasificar en: aerogeneradores de eje vertical y de eje horizontal.

2.1. AEROGENERADORES VERTICALES.

Son aerogeneradores que se caracterizan por no presentar dispositivos o mecanismos de orientación, porque gracias a su buen diseño estos logran utilizar el viento que provenga de cualquier dirección, asimismo, el generador eléctrico va ubicado en el piso. El inconveniente que posee este tipo de aerogeneradores es

² D. Ojeda, «El medio ambiente en Colombia,» [En línea]. Available: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/000001/cap7.pdf>.

³ D. Osorio, «issuu,» 10 Noviembre 2017. [En línea]. Available: https://issuu.com/valentinamartinezpata/docs/energia_20eolica.

que para activar su funcionamiento necesitan ser propulsados, lo que hace que su producción de electricidad sea inferior a los de eje horizontal. Se pueden destacar tres tipos:

2.1.1. Tipo Savonius:

Es un rotor que utiliza energía eólica para convertirlo en torsión a través de su eje giratorio. El ingeniero finlandés Sigurd J. Savonius fue quien lo inventó en 1922. Su diseño es de dos mitades de cilindro cortado por generatriz y ligeramente descentrado, como se muestra en la figura 1, el funcionamiento que resalta es que, cuando la hoja comienza a rotar, la hoja tiene menos firmeza. La dirección de rotación es opuesta a la dirección del viento. Pueden operar a bajas velocidades del flujo del aire, que es una de las turbinas más económicas en la actualidad⁴.

Figura 1. Aerogenerador Savonius.



Fuente: STRUCTURALIA, 16 Julio 2018. [En línea]. Disponible en: <https://blog.structuralia.com/aerogeneradores-de-eje-vertical-y-horizontal-tipos-ventajas-e-inconvenientes>.

⁴ A. Measurement, «Ammonit,» 8 Mayo 2018. [En línea]. Available: <https://www.ammonit.com/es/informacion-eolica/energia-eolica#top>.

2.1.2. Tipo Darrieus.

Está constituido por dos palas biconvexas, que se fijan por encima y por debajo del eje vertical, como se observa en la figura 2. El ingeniero G.J.M. Darrieus fue quien lo creó en 1931. Si nos concentramos en sus ventajas, veremos que tiene un buen rendimiento y la capacidad de operar a grandes velocidades de viento. Ahora, si nos fijamos en sus deficiencias, consideramos necesario electrificar las turbinas para poder arrancar las turbinas porque tienen un par de arranque más alto. Además, dado que cada pala del generador está sujeta a una tensión de par fluctuante debido al efecto de blindaje, también es necesario colocar un tensor para asegurar la estabilidad estructural del generador.

Figura 2. Aerogenerador Darrieus.



Fuente: A. Measurement, «Ammonit,» 8 Mayo 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.ammonit.com/es/informacion-eolica/energia-eolica#top>

2.1.3. Tipo Giromill.

Este tipo de generador también ha obtenido la patente de G.J.M. Darius. Consisten en palas verticales conectadas mediante brazos horizontales al eje, como se puede observar en la figura 3, además, estas palas pueden salir del extremo o incluso del centro de la cuchilla. Las palas verticales cambian de dirección cuando el rotor gira para aprovechar mejor el viento⁵. Resalta por sus características palas verticales unidas con dos barras horizontales al principal eje vertical, ofreciendo suministro energético en un rango de 10 a 20 KWh.

Figura 3. Aerogenerador Giromill.



Fuente: A. Measurement, «Ammonit,» 8 Mayo 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.ammonit.com/es/informacion-eolica/energia-eolica#top>.

2.1.4. Aerogenerador con rotor Windside.

Es un diseño parecido al rotor Savonius, en lugar de la estructura cilíndrica que utiliza para aprovechar el viento, este consiste en un perfil doblado con torsión que sube por el eje vertical, tal como se observa en la figura 4. La diferencia más

⁵ «Structuralia,» 16 Julio 2018. [En línea]. Available: <https://blog.structuralia.com/aerogeneradores-de-eje-vertical-y-horizontal-tipos-ventajas-e-inconvenientes>.

importante respecto a los otros diseños de eje vertical, es el modelo aerodinámico que posee, acercándose a las eficiencias de los aerogeneradores de eje horizontal.⁶

Figura 4. Aerogenerador Windside.



Fuente: «Structuralia,» 16 Julio 2018. [En línea]. Disponible en: <https://blog.structuralia.com/aerogeneradores-de-eje-vertical-y-horizontal-tipos-ventajas-e-inconvenientes>.

2.2. AEROGENERADORES HORIZONTALES.

Son generadores en los que su eje rotacional se ubica de manera horizontal, es decir, paralelo al suelo para que sus palas o hélices giren perpendicularmente a la velocidad del viento. Es correcto decir que el número de palas es inversamente proporcional a la velocidad de giro de las turbinas⁷, por esto se clasifican en Aero turbinas rápidas y lentas, a continuación, se hablara un poco de estos dos tipos:

⁶ Ibíd.

⁷ Structuralia, «Structuralia,» 16 Julio 2018. [En línea]. Disponible en: <https://blog.structuralia.com/aerogeneradores-de-eje-vertical-y-horizontal-tipos-ventajas-e-inconvenientes>.

2.2.1. Aero turbina Lenta o Rotores multipala.

Principalmente contienen de 6 a 24 hélices, como se observa en la figura 5, por lo tanto, necesitan altos pares de arranque proporcionando velocidades de giro no tan elevadas. No están diseñados para la generación de energía eléctrica, sino, para el bombeo de agua.⁸

Figura 5. Aero turbina lenta.



Fuente: J. F. R. Buenestado, Análisis y diseño de un aerogenerador mediante simulación 3d de dinámica de fluidos computacional, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2017.

2.2.2. Aero turbina rápida o rotor tipo hélice.

Están diseñados para tener entre dos y tres palas con un complejo perfil aerodinámico que hacen que dispongan de velocidades superiores a las que incide las corrientes de viento sobre el rotor, de 6 a 14 veces superiores, convirtiéndose en equipos ideales para la generación de electricidad, como se puede observar en

⁸ Felix, «LBA INDUSTRIAL,» 11 Mayo 2019. [En línea]. Disponible en: <http://www.lbaindustrial.com.mx/aerogeneradores-verticales/>.

la figura 6. También, posee un par de arranque muy pequeño y pueden ponerse en funcionamiento por si mismos con velocidades de viento bajas.

Los componentes en estos aerogeneradores que son necesarios para el buen funcionamiento y transformación de energía van ubicados en la góndola que se sitúa en la parte más alta de la torre, allí el rotor va acoplado a las hélices que son las que convierten la energía cinética del viento en energía mecánica, el movimiento rotacional que se genera cuando el viento atraviesa las hélices es transferido a un multiplicador de velocidades para después ir al generador eléctrico.

Estos tipos de rotores, poseen microprocesadores que les permite controlar muchas variables como la parada y el arranque, entre otras, también traen incorporados varios dispositivos eléctricos como interruptores, transformadores, protectores de sobretensión que les permite llevar la electricidad generada con seguridad y confiabilidad hacia puntos de consumo específicos⁹.

Figura 6. Aerogenerador Tripala.



Fuente: A. B. Boveri, Cuaderno de aplicaciones técnicas n°12 Plantas eólicas, Barcelona: ABB.

2.2.3. Aerogenerador Bipala.

Economiza el peso y precio de una de las hélices o palas respecto a los aerogeneradores tripala y como su nombre lo indica, consta de dos palas como se observa en la figura 7, sin embargo, necesitan de mayores velocidades de giro para

⁹ Felix, «LBA INDUSTRIAL,» 11 Mayo 2019. [En línea]. Disponible en: <http://www.lbaindustrial.com.mx/aerogeneradores-verticales/>.

lograr producir la misma energía. Para obviar el efecto desestabilizador se requiere de un diseño de mayor complejidad, con un rotor basculante y amortiguadores que impidan el golpe de las palas contra la torre¹⁰.

Figura 7. Aerogenerador tipo bipala.



Fuente: «IBERDROLA,» [En línea]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/palas-aerogeneradores>.

2.2.4. Aerogenerador Monopala.

Como su nombre lo indica, poseen una sola pala y en gran medida, los mismos problemas que los aerogeneradores bipala, requieren de un contrapeso en el lado

¹⁰ «Structuralia,» 16 Julio 2018. [En línea]. Disponible en: <https://blog.structuralia.com/aerogeneradores-de-eje-vertical-y-horizontal-tipos-ventajas-e-inconvenientes>.

contrario de la pala, como se observó en la figura 8, es decir, el ahorro que se hace al suprimir una pala o hélice no es de gran relevancia¹¹.

Figura 8. Aerogenerador tipo monopala.



Fuente: J. F. R. Buenestado, Análisis y diseño de un aerogenerador mediante simulación 3d de dinámica de fluidos computacional, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2017.

¹¹ «Opex Energy,» [En línea]. Disponible en: http://opexenergy.com/eolica/tipos_aerogeneradores.html.

3. ESTADO DEL ARTE

A la fecha, los aerogeneradores horizontales están siendo los más utilizados, sobre todo las Aero turbinas rápidas o de rotores tipo hélice, entre los cuales están los monopala, bipala y tripala que según como su nombre lo indica, están clasificados por el número de palas, sin embargo, los tripala se han escogido por encima de los demás gracias a su gran estabilidad estructural y aerodinámica, su alto rendimiento energético y el poco ruido que generan¹². Es por esto que los aerogeneradores de tres palas son los más confiables para la realización de este proyecto.

Para que esta tecnología sea más barata y eficiente, a partir de los últimos años se ha notado un gran progreso, por ejemplo, en 2014 teniendo como líderes Alemania, poseían una capacidad total energética de 336 GW; entre estas instalaciones de generadores eólicos a países como Estados Unidos, China, España países también destaca Noruega, quien en 2009 hizo instalaciones marinas de aerogeneradores, mejor conocida como la turbina de viento flotante Hywind (figura 9).

Figura 9. Aerogenerador Hywind.



Fuente: A. Measurement, «Ammonit,» 8 Mayo 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.ammonit.com/es/informacion-eolica/energia-eolica#top>.

¹² Structuralia, «Structuralia,» 16 Julio 2018. [En línea]. Disponible en: <https://blog.structuralia.com/aerogeneradores-de-eje-vertical-y-horizontal-tipos-ventajas-e-inconvenientes>.

La empresa norteamericana New Wind en 2017, llevo a cabo un proyecto llamado "Wind tree" que quiere decir turbina eólica con la apariencia de un árbol, una estructura de 2500 kg, con ocho metros de diámetro y nueve de alto, de la cual cuelgan 54 pequeños aerogeneradores verticales en forma de hojas cónicas que giran silenciosamente capaces de generar electricidad con magnitudes de viento de 2m/s. Está construida de plástico tratada con resina para protegerla de las condiciones climáticas, capaz de generar 3,5KW, 65 vatios por hoja, no es una cifra muy significativa, pero cobra importancia cuando se agrupan¹³.

Figura 10. Aerogenerador Wind Tree.



Fuente: F.L.Smith, «Danish Wind Industry Association,» 2 Julio 2003. [En línea]. Disponible en: <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wpcontent/wind/miller/windpower%20web/es/pictures/fifties.htm>.

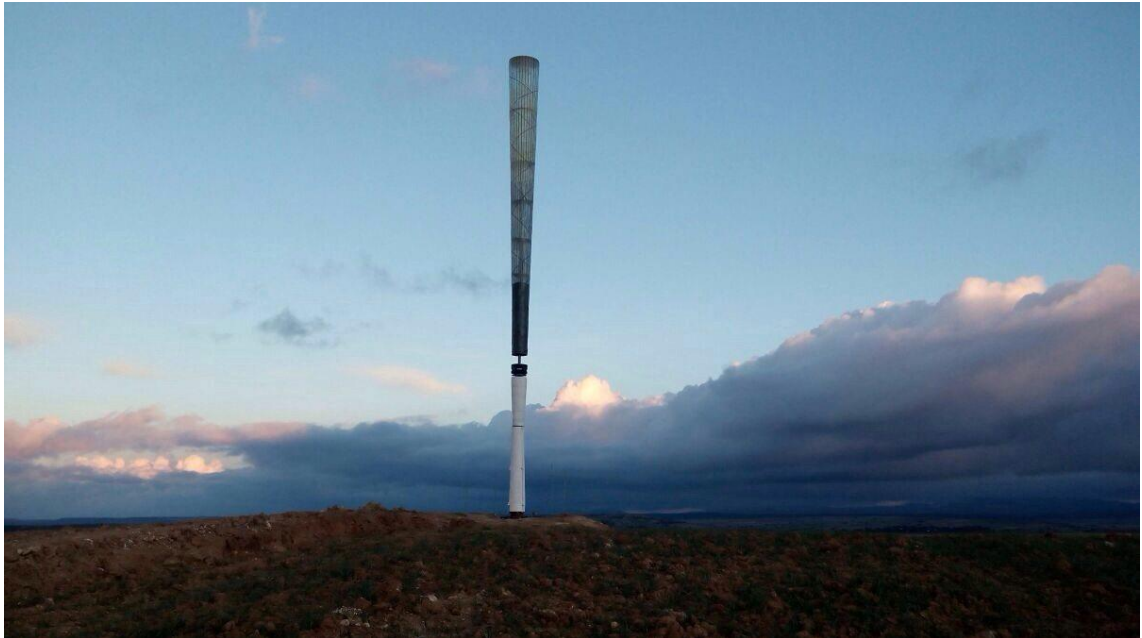
En el año 2006, se presenta la primera patente de un proyecto llamado Vortex Bladeless el cual trata de evolucionar los aerogeneradores con palas a uno sin palas, son totalmente diferentes en cuanto su diseño y forma en que generan la

¹³ J. F. R. Buenestado, ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN AEROGENERADOR MEDIANTE SIMULACIÓN 3D DE DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2017.

energía, su simplificación es tal que puede ahorrar en materiales y mantenimiento resultando ser económico y eficiente.

El aerogenerador es básicamente un cilindro vertical semirrígido, que va anclado a un terreno con materiales piezoeléctricos (generan una carga eléctrica bajo tensión mecánica), por consiguiente, la energía eléctrica se genera debido a la deformación que producen estos materiales al entrar en contacto con el viento. La empresa responsable de que este proyecto lograra salir al comercio es Deutecho y sus socios David Suriol, David Yáñez y Raúl Martín¹⁴.

Figura 11. Aerogenerador Vortex.



Fuente: J. M. Lopez, «Hipertextual,» 13 Septiembre 2020. [En línea]. Disponible en: <https://hipertextual.com/2020/09/aerogeneradores-reinventar-energia-eolica-vortex-bladeless>.

¹⁴ A. B. Boveri, Cuaderno de aplicaciones técnicas nº12 Plantas eólicas, Barcelona: ABB.

4. COMPONENTES DE UN AEROGENERADOR TRIPALA

Como se había mencionado anteriormente, los aerogeneradores tripalas son los más utilizados y comercialmente los más vendidos, es decir, su fabricación es masiva gracias a su económica construcción, facilidad de instalación y eficiencia para generar electricidad. Lo que nos lleva a comprender de una manera más¹⁵ precisa los principales componentes que lleva un aerogenerador para garantizar un buen funcionamiento.

Las partes de un aerogenerador se pueden catalogar en dos grupos, los componentes internos y los externos.

4.1. COMPONENTES EXTERNOS

Los componentes externos de un aerogenerador tripala se muestran en la siguiente figura:

Figura 12. Partes de un aerogenerador tripala.



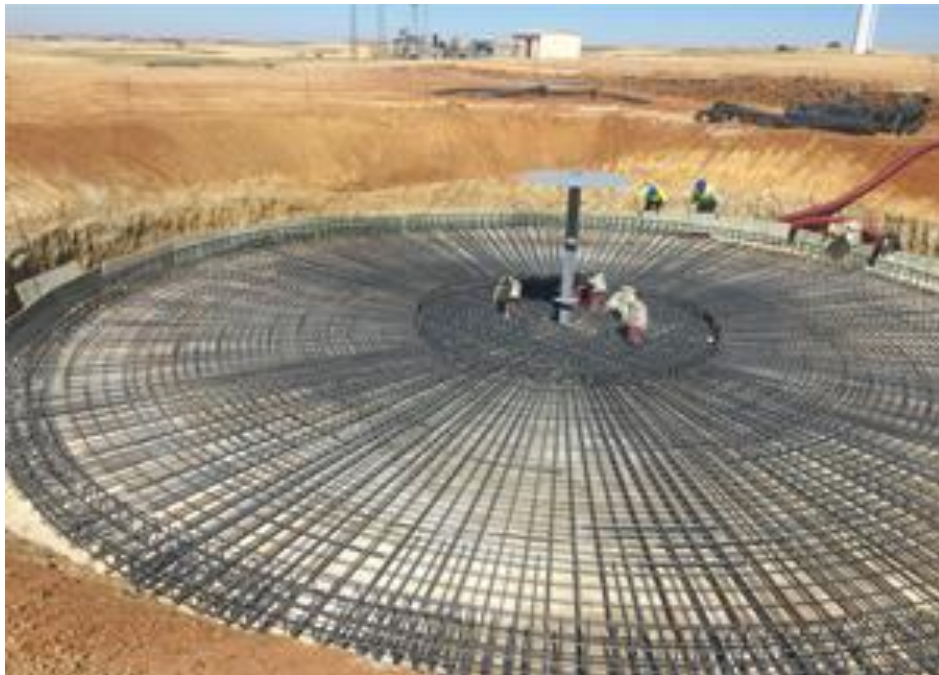
Fuente: G. Portillo, «Renovables Verdes,» [En línea]. Disponible en: <https://www.renovablesverdes.com/los-nuevos-aerogeneradores-sin-palas/>.

¹⁵ D. Osorio, «issuu,» 10 Noviembre 2017. [En línea]. Disponible en: https://issuu.com/valentinamartinezzapata/docs/energia_20eolica.

4.1.1. Cimentación.

Se construye especialmente para soportar el peso y las fuerzas del viento a las que estará sometida la torre. La cimentación está constituida por el anclaje y la zapata, en el anclaje va una brida interior con un diseño específico para atornillarla a la torre y así transmitir los esfuerzos de la zapata. La zapata se construye a base de hormigón en masa de forma circular o cuadrada, reforzada con hierro.

Figura 13. Cimentación.



Fuente: «TecnoBlogSanMartín,» 20 Marzo 2012. [En línea]. Disponible en: <https://tecnoblogsanmartin.wordpress.com/2012/03/20/aerogenerador-partes/>.

4.1.2. Torre.

Se encarga de soportar la góndola y el rotor, es un componente muy importante debido a que, entre mayor sea su altura, mayor será la velocidad del viento a la que se estará enfrentando sus aspas, porque cada que se asciende más, la velocidad del viento aumenta, sin embargo, aumentar la altura de la torre genera un mayor costo en cuanto a la cimentación y los materiales.

Figura 14. Torre.



Fuente: «IBERDROLA,» [En línea]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/palas-aerogeneradores>.

4.1.3. Góndola.

Es el compartimento que se sitúa en la parte más alta de la torre, tiene como función almacenar el generador eléctrico, la caja multiplicadora, sistemas de control, de frenado, orientación y regulación. También, en la parte superior de la góndola se encuentran ubicadas unas partes externas como el refrigerador, anemómetro, veleta, baliza y el para rayos que son componentes importantes a los cuales se debe acceder para hacer trabajos de mantenimiento¹⁶.

¹⁶ «El Molino Verde,» 3 Febrero 2016. [En línea]. Disponible en: <http://elmverde.blogspot.com/2016/02/partes-que-componen-un-aerogenerador.html>.

Figura 15. Góndola.



Fuente: «Energiza,» 2018. [En línea]. Disponible en: http://www.energiza.org/index.php?option=com_k2&view=item&id=1246:principales-componentes-de-un-aerogenerador.

4.1.4. Rotor.

El rotor se constituye por una serie de partes cuya misión es transformar la energía cinética del viento en energía mecánica. Una característica importante de los aerogeneradores tripala es que, cuanto mayor sea el área barrida por el rotor, mayor será el potencial de generación eléctrica, y por tanto, mayores serán la potencia del aerogenerador y la energía que produce¹⁷.

Los elementos o partes que constituyen el rotor son los siguientes: Nariz, palas, buje, eje principal, rodamientos de palas.

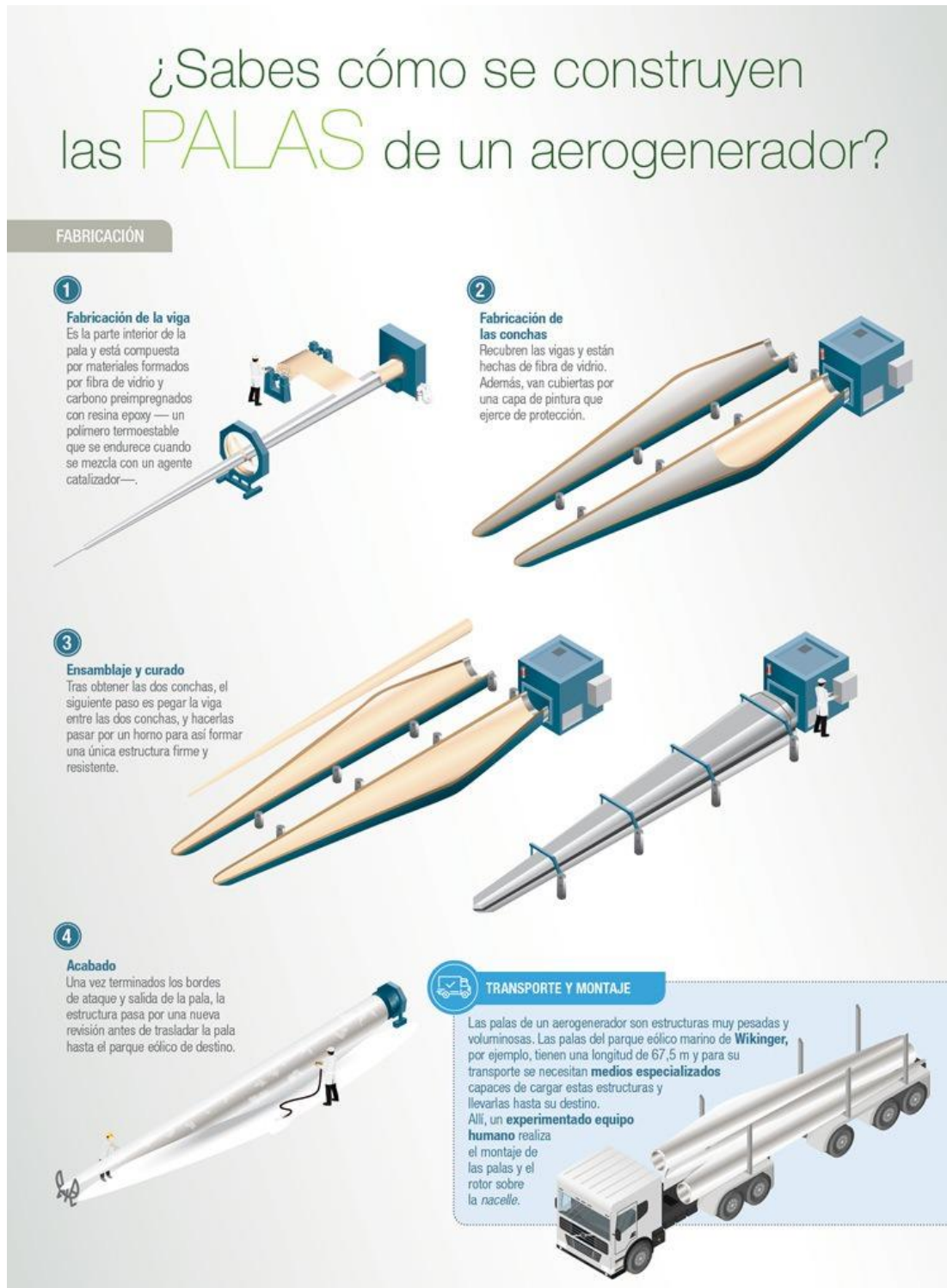
Figura 16. Nariz del aerogenerador.



Fuente: «El Molino Verde,» 3 Febrero 2016. [En línea]. Disponible en: <http://elmverde.blogspot.com/2016/02/partes-que-componen-un-aerogenerador.html>.

¹⁷ «El Molino Verde,» 3 Febrero 2016. [En línea]. Disponible en: <http://elmverde.blogspot.com/2016/02/partes-que-componen-un-aerogenerador.html>.

Figura 17. Fabricación de las palas de un aerogenerador.

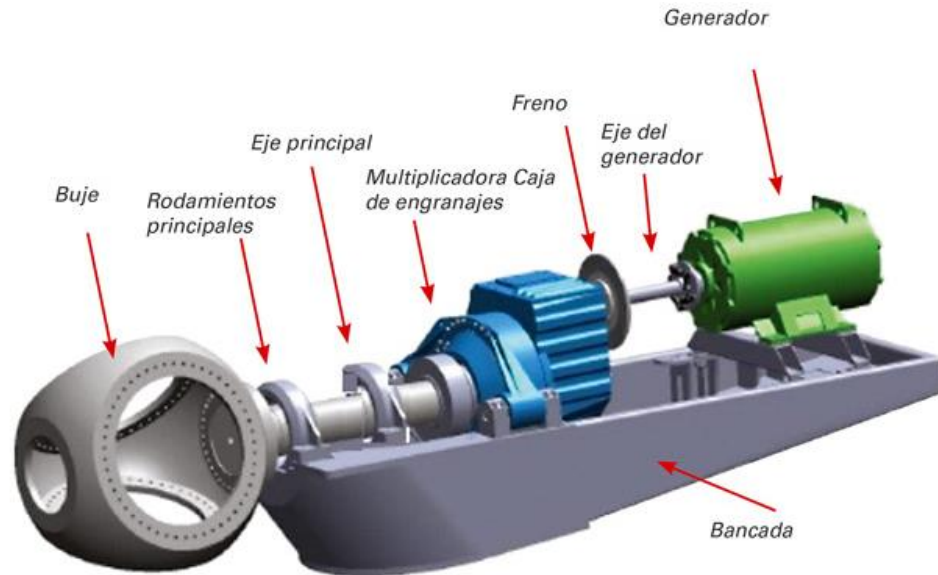


Fuente: A. B. Boveri, Cuaderno de aplicaciones técnicas nº12 Plantas eólicas, Barcelona: ABB.

4.2. COMPONENTES INTERNOS

Son aquellas partes fundamentales en las que se transforma la energía cinética proporcionada por el viento en energía eléctrica, por lo tanto se encuentran dentro de la góndola en la parte más alta de la torre, los componentes internos de un aerogenerador tripala se exponen en la siguiente figura:

Figura 18. Partes internas de un aerogenerador.



Fuente: «Iberdrola,» [En línea]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/palas-aerogeneradores>.

4.2.1. Eje principal: Su función es unir el rotor con la multiplicadora

4.2.2. Multiplicadora: su función es aumentar la velocidad de giro del rotor desde unas 10 a 15 revoluciones por minuto a unas 1500 (figura 19).

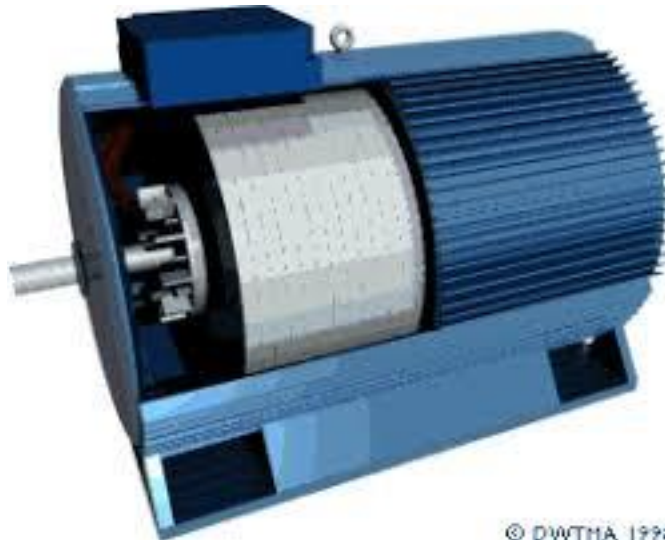
Figura 19. Multiplicador.



Fuente: «SENSORICX,» [En línea]. Disponible en: <https://sensoricx.com/termodinamica-y-procesos-industriales/aerogenerador/>.

4.2.3. Equipamiento eléctrico: se trata del transformador, generador eléctrico (figura 20) y cableado.

Figura 20. Generador de turbinas eólicas.



Fuente: «IBERDROLA,» [En línea]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/palas-aerogeneradores>.

4.2.4. Sistema de control: Es el encargado del arranque, la parada, orientación y paso de las aspas. Por esto, es necesario un mecanismo que garantice el buen desempeño de las partes del aerogenerador y que al soportar climas extremos garantice que dichos elementos no produzcan ningún desperfecto, tales mecanismos están constituidos por sensores, válvulas, interruptores y bombas hidráulicas.

Figura 21. Sistema de control.



© 1998 www.WINDPOWER.org

Fuente: «IBERDROLA,» [En línea]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/palas-aerogeneradores>.

4.2.5. Mecanismos auxiliares: delegan funciones como: bloquear el rotor, bloquear el sistema de orientación de la góndola y de las aspas, manejan también el sistema de lubricación para elementos que permanentemente están en fricción.

4.2.6. Buje: Es el encargado de transmitir todas las fuerzas, momentos y vibraciones a la torre, también es la pieza en que van acopladas las palas y el rotor, además, es el único componente externo que transmite la

energía del viento al interior de la góndola, como se observa en la figura 22.

Figura 22. Buje.



Fuente: C. E. M. L. I. H. A. G. V. F. Ignacio Torres Contreras, «Desarrollo de una caja de engranes para un aerogenerador de 30 KW de capacidad,» Querétaro, México.

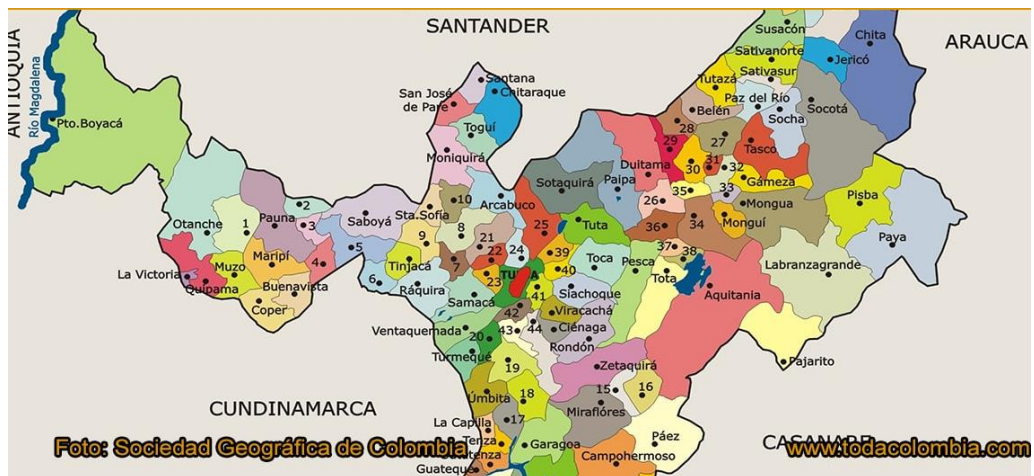
5. DEPARTAMENTO DE BOYACA.

El departamento de Boyacá estaría en la mira para el desarrollo de cuatro parques eólicos para la generación de energía eléctrica mediante fuentes no convencionales.

Un estudio de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional (sede Medellín), se convertiría en la hoja de ruta con la que el Gobierno Nacional despejaría el camino para llevar a cabo 4 parques eólicos con capacidad total instalada de 52,5 megavatios (Mw) a partir de 21 aerogeneradores de potencia nominal, cada uno de 2,5 Mw, que producirían una energía neta superior a los 20.000 megavatios hora año (Mwh/a).¹⁸

En el municipio de Aquitania se desarrollarían dos parques eólicos según la investigación académica, también se visualiza un parque en Samacá y otro en Duitama. Conforme al documento, Boyacá es un departamento que cuenta con condiciones favorables, en cuanto a recursos renovables asociados con la energía del viento, brindando velocidades de viento iguales o superiores a los 5 m/s en casi todos los meses del año.¹⁹

Figura 23. Mapa municipal del departamento de Boyacá.



Fuente: «Refocosta,» 18 Julio 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.refocosta.com/noticias/68-tres-municipios-de-boyaca-con-potencial-para-generar-energia-eolica>.

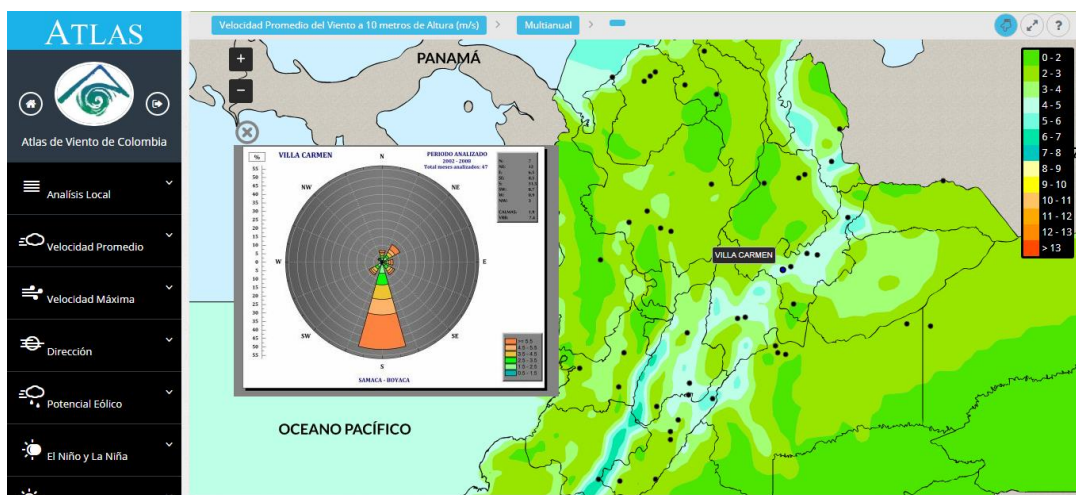
¹⁸ F.L.Smidth, «Danish Wind Industry Association,» 2 Julio 2003. [En línea]. Disponible en: <http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/pictures/fifties.htm>.

¹⁹ A. L. Suárez, «Portafolio,» 17 Julio 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.portafolio.co/economia/boyaca-nuevo-foco-para-las-fuentes-de-energia-renovable-531662>.

5.1. MUNICIPIOS APTOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE AEROGENERADORES.

Es importante tener presente que, en los municipios el viento debe alcanzar como mínimo una velocidad de 3 metros por segundo para desempeñar un aerogenerador de pequeño tamaño y una velocidad de 6 metros por segundo para un aerogenerador de gran tamaño, por lo tanto, según el atlas de vientos de Colombia, existen varias estaciones meteorológicas en distintos municipios del departamento de Boyacá midiendo variables del viento como su densidad, su velocidad y dirección (figura 24), la frecuencia en que se presentan en distintos meses del año.²⁰

Figura 24. Atlas de vientos de Colombia.



Fuente: R. C. S. Benavides, Identificación de proyectos con potencial de generación de energía eólica como complemento a otras fuentes de generación eléctrica en el departamento de Boyacá, Medellín, Colombia, 2018.

Los puntos negros que aparecen en el mapa, indican las estaciones climáticas que tiene el municipio, en Boyacá existen seis estaciones: La estación Villa Carmen en Samacá Boyacá, La estación UPTC en Tunja, la estación INST AGR en Macanal, estación Surbata Bonza en Duitama, estación Belencito en Nobsa y estación Sierra Nevada del Cocuy en Güicán.²¹

²⁰ «Toda Colombia,» 21 Febrero 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.todacolombia.com/departamentos-de-colombia/boyaca/municipios-division-politica.html>.

²¹ L. N. Muñoz, «Experimenta,» 24 Febrero 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.experimenta.es/noticias/tecnologia/wind-tree-el-aerogenerador-en-forma-de-arbol-de-newwind/>.

La ventaja que tiene el Atlas es el estudio de la velocidad y la dirección a unos 10 metros de altura en los municipios ya nombrados del departamento durante determinados años, para calcular un promedio de dichas variables.

6. PARAMETROS Y REQUERIMIENTOS.

6.1. EL VIENTO.

El viento es producto del movimiento rotacional de la tierra, el efecto de insolación que crea la entrada y salida de los rayos solares a través de la atmósfera y las diferencias de presión atmosférica provocadas por aires fríos y calientes.²²

A partir estos sucesos, el viento produce una velocidad que se mide a través de un anemómetro ya sea en metros por segundo o kilómetros por segundo, también tiene una dirección que es medida por una veleta, instrumento que indica el lugar de donde proviene el viento, es decir, de norte, sureste, noreste, o este.

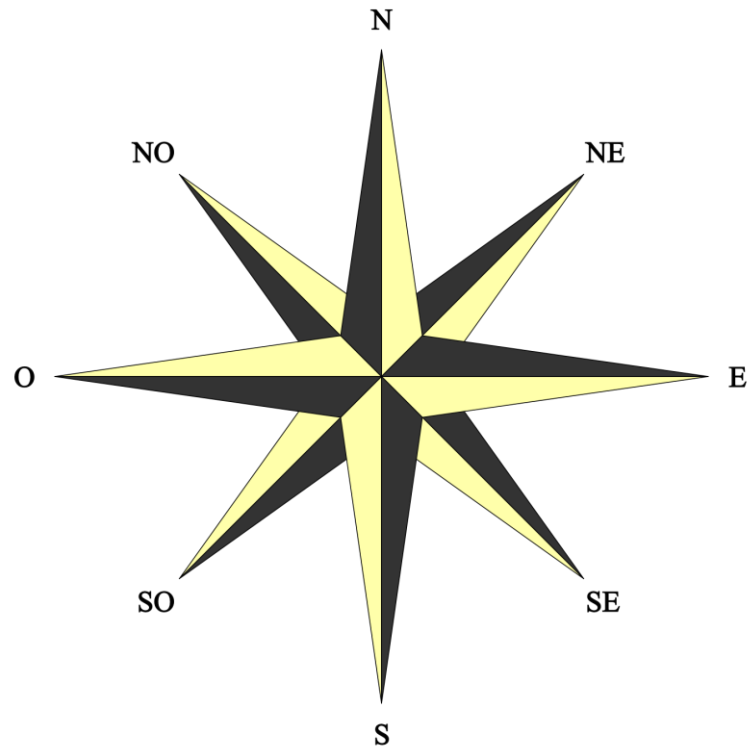
El viento puede ser medido por su velocidad y dirección. El anemómetro es un instrumento que mide su velocidad en metros por segundo o kilómetros por segundo, mientras la veleta (instrumento colocado encima de una rosa de los vientos) muestra la dirección de donde proviene el viento como, por ejemplo, norte, nordeste, sudoeste, este, entre otros.

6.2. DIRECCIÓN DEL VIENTO.

Punto de origen de donde proviene el viento medido en grados sexagesimales a través de la rosa de los vientos que está dividida en 8 direcciones y va desde los 0° hasta los 360° girando en sentido de las manecillas del reloj en un plano horizontal visto desde la parte superior. Las ocho direcciones principales son: Norte (N), Noreste (NE), Este (E), Sureste (SE), Sur (S), Suroeste (SO), Oeste (O) y Noroeste (NE) como se puede observar en la figura 25.

²² J. M. Lopez, «Hipertextual,» 13 Septiembre 2020. [En línea]. Disponible en: <https://hipertextual.com/2020/09/aerogeneradores-reinventar-energia-eolica-vortex-bladeless>.

Figura 25. Rosa de los vientos.



Fuente: «Significados,» 28 Noviembre 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.significados.com/viento/>.

6.3. VELOCIDAD DEL VIENTO.

El viento es un factor importante que ayuda a refrigerar o a nivelar la temperatura del planeta tierra, además, es imprescindible para el buen funcionamiento de molinos y turbinas eólicas. Este gran flujo o corriente de aire que se genera en la atmosfera es producida por la diferencia de presiones y a su vez una diferencia de temperaturas, el aire frio tiende a descender y el aire caliente asciende debido a la poca densidad que posee; ese movimiento del aire caliente y frio es el que genera el viento, además, el movimiento rotacional de la tierra y su efecto Coriolis son pilares fundamentales en la generación del viento.²³

²³ «Sicily Sailing Experience,» 12 Noviembre 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.sicilysailingexperience.com/la-rosa-de-los-vientos/>.

Es la relación entre la distancia recorrida por el viento y el tiempo que tarda en recorrerla. Su velocidad disminuye en cuanto más se acerque a la superficie terrestre, debido al rozamiento que se genera entre el suelo, las montañas, los árboles, edificios, y demás objetos. Por esto es que la velocidad del viento no es constante y se debe medir a una altura estable para luego extrapolar a la altura del aerogenerador.

6.4. POTENCIA DEL VIENTO.

Los aerogeneradores tienen la ventaja de comenzar a producir energía eléctrica con una mínima velocidad de viento, por ejemplo, para grandes turbinas se necesita una velocidad cercana a los 6 m/s y para pequeñas turbinas la velocidad de 3m/s como mínimo. La potencia eólica disponible que estos aerogeneradores proporcionan depende mucho de la velocidad del viento, por esto, la potencia es proporcional al cubo de la velocidad del viento, esto quiere decir que si una o dos veces más alta sea su velocidad, ocho veces más será su potencia.²⁴

6.5. ORIENTACION DEL VIENTO PARA LAS TURBINAS.

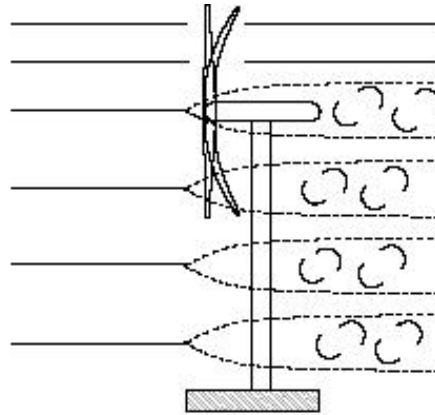
Existen dos formas en que se debe de orientar la turbina o aerogenerador tripala cuando entra en contacto con el viento, que afecta considerablemente el rendimiento de las palas y la generación de potencia, las dos orientaciones que existen son:

- 6.5.1. Orientación a Barlovento: Cuando el rotor se orienta de frente a la dirección del viento dominante (figura 26), aprovecha más la fuerza del viento que en la opción contraria o sotavento, pero requiere un mecanismo de orientación hacia el viento. Es el caso más empleado para el diseño actual de aerogeneradores.²⁵

²⁴ «Ciencia Divertida,» [En línea]. Disponible en: <https://cienciadivertida.gal/como-se-forma-el-viento/>.

²⁵ «Structuralia,» 16 Julio 2018. [En línea]. Disponible en: <https://blog.structuralia.com/aerogeneradores-de-eje-vertical-y-horizontal-tipos-ventajas-e-inconvenientes>

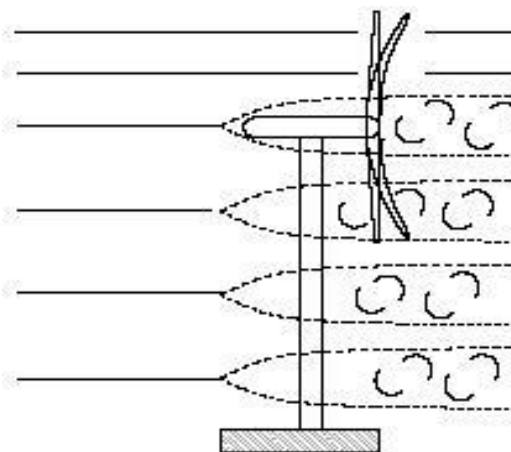
Figura 26. Aerogenerador a Barlovento.



Fuente: «Structuralia,» 16 Julio 2018. [En línea]. Disponible en: <https://blog.structuralia.com/aerogeneradores-de-eje-vertical-y-horizontal-tipos-ventajas-e-inconvenientes>.

6.5.2. Orientación a Sotavento: Cuando el rotor se encuentra enfocado en sentido contrario a la dirección del viento dominante (figura 27), la estructura de la torre y la góndola disminuye el aprovechamiento del viento por el rotor, en este caso el viento es el que orienta con su propia fuerza a la góndola, por lo que no son necesarios elementos de reorientación automatizada en la teoría, aunque si suelen utilizarse como elemento de seguridad.²⁶

Figura 27. Aerogenerador a Sotavento.



Fuente: Ibíd.

²⁶ Ibíd.

6.6. DENSIDAD DE LA ENERGIA EÓLICA.

El patrón de densidad de energía eólica es afectado por el resultado del viento en superficie, el cual está modulado por los principales sistemas atmosféricos que regulan las condiciones del tiempo en el país; es decir, aquellos lugares donde la intensidad del viento es débil, se tienen valores menores de densidad de energía, mientras que donde los valores promedio del viento son mayores, la densidad de energía aumenta de forma potencial al cubo de dicha velocidad.²⁷

La energía tiene la capacidad de producir un trabajo, mientras, la potencia es la energía por unidad de tiempo, se denota mediante la siguiente ecuación:

$$P = \frac{E}{t} \quad (\text{Ec. 1})$$

La energía eólica se caracteriza por utilizar el movimiento del viento para producir electricidad, es por esto que tiene energía cinética y se mide a partir de la siguiente ecuación:

$$E_c = \frac{1}{2} mV^2 \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde m , es la masa del aire y V es la velocidad del aire. La masa del aire está relacionada con la ecuación de la densidad:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde ρ , es la densidad del aire y “ v ” es el volumen ocupado por la masa.

El volumen de la masa es igual a la velocidad del aire en un tiempo dado por unidad de área.

Por lo tanto, la potencia P es igual a:

²⁷ G. Portillo, «Renovables Verdes,» [En línea]. Disponible en: <https://www.renovablesverdes.com/los-nuevos-aerogeneradores-sin-palas/>.

$$P = \frac{E}{t} = \frac{\frac{1}{2}mV^2}{t}$$

$$P = \frac{\frac{1}{2}(\rho VAt)V^2}{t} = \frac{1}{2}\rho AV^3$$

(Ec. 4)

De acuerdo a la ecuación anterior, se puede deducir que, la densidad de energía es directamente proporcional a la densidad del aire, es por esto que la densidad de potencia será menor a medida que el aire se encuentre en zonas altas lejos de la superficie terrestre. Sin embargo, la densidad de energía es directamente proporcional a la velocidad del viento al cubo, lo que quiere decir que un pequeño aumento que haya en la velocidad representa un aumento significativo en la densidad de potencia.

Además de la densidad de potencia, existe una potencia extraíble que significa la máxima energía que se puede convertir en energía mecánica por medio de un aerogenerador y esta dada por la siguiente ecuación:

$$P = C_p \eta P_{viento}$$

(Ec. 5)

Donde C_p , es el máximo coeficiente de potencia llamado también límite Betz, η es la eficiencia de conversión mecánica y eléctrica, P es la potencia del aerogenerador en vatios.

6.7. LIMITE DE BETZ.

Esta relación indica que no todo el flujo de aire que es atravesado por el rotor será convertido en energía eléctrica, es decir, que toda la energía cinética que proporciona el viento no es aprovechada; La potencia eólica disponible es la potencia máxima que se puede extraer del viento teniendo en cuenta el límite de Betz. Permitirá únicamente y en el mejor de los casos que una turbina eólica logra convertir en energía mecánica como máximo un 59.26% de la energía cinética del viento.²⁸

El modelo de Betz se simplifica en estudiar la potencia que una turbina eólica es capaz de sacar del viento, por consiguiente, se va explicar el paso a paso que se requiere para hallar dicha potencia. Se debe tantear la cantidad de energía cinética del viento que atraviesa la parte de las hélices o palas en un determinado tiempo y se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

²⁸ D. W. I. Association, «Dromstørre,» [En línea]. Disponible en: <http://xn--drmstørre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/enrspeed.htm>.

$$Potencia\ del\ viento = \frac{E_{cinética}}{t} = \frac{\frac{1}{2} \times m \times V^2}{t}$$

(Ec.6)

La masa de aire que atraviesa el rotor es el mismo volumen del cilindro del rotor que es igual a el área por la longitud, y su longitud se podría expresar como la velocidad del viento por el tiempo en que el viento recorre el cilindro.

$$m = \rho \times Vol = \rho \times A \times L = \rho \times A \times V \times t$$

(Ec.7)

Al sustituir esta ecuación de masa en la ecuación de potencia del viento, se obtiene la siguiente expresión:

$$Potencia\ del\ viento = \frac{\frac{1}{2} \times m \times V^2}{t} = \frac{\frac{1}{2} \times \rho \times A \times V \times t \times V^2}{t} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^3$$

(Ec. 8)

De la expresión obtenida se puede deducir que la potencia que un aerogenerador extrae, depende exponencialmente de la velocidad al cubo, es decir entre mayor sea la velocidad, mayor será su potencia. Sin embargo, es necesario ponerle un límite de velocidad a los aerogeneradores para evitar averías.

También se requiere agregarle un coeficiente de potencia, ya que, el aerogenerador no logra aprovechar toda la energía cinética del viento, sí lo hiciera, el flujo de aire se detendría al llegar al rotor y esto no pasa. Por lo tanto, la ecuación de la potencia de viento quedaría de la siguiente manera:

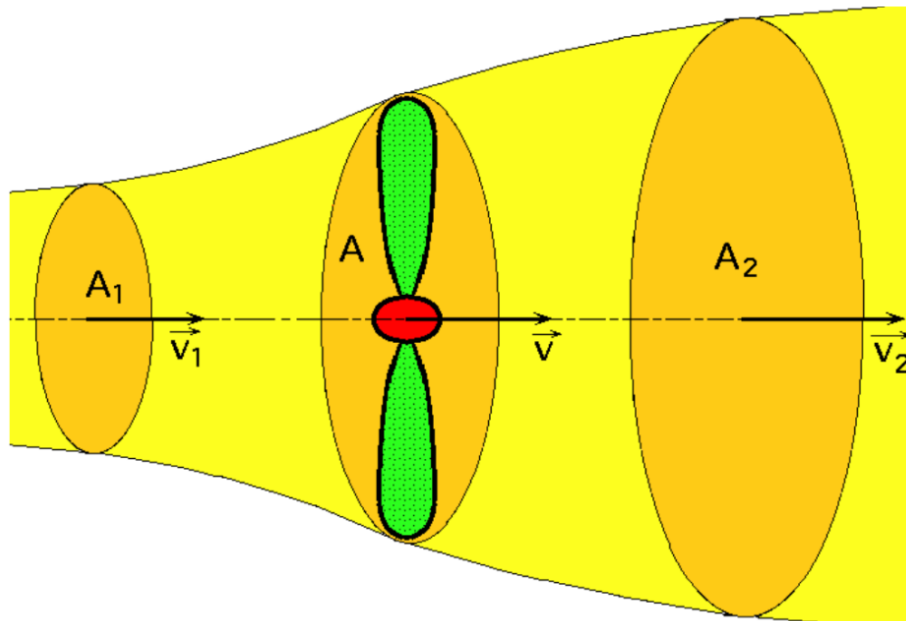
$$Potencia\ Nominal = C_p \times \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^3 \times \eta$$

(Ec. 9)

Este coeficiente de potencia (Cp) mejor conocido como límite de Betz explica como el viento pierde su velocidad al pasar por las hélices del aerogenerador, es decir, cuando el viento este soplando hacia el rotor, éste tendrá una velocidad V1 y estará

en la sección transversal del volumen de aire A1. Cuando el aire esté precisamente atravesando la sección del área de las palas A, la velocidad en ese instante será la velocidad útil del aerogenerador V. Después de que el aire pasa por el rotor, éste sale frenado, por lo tanto, poseen otros valores a los que llamaremos A2 y V2.²⁹

Figura 28. Modelo de Betz.



Fuente: L. E. R. Torres, Estudio de viabilidad técnica, económica y ambiental para la ejecución de proyectos de microgeneración eólica en zonas urbanas en el departamento de Boyacá, Bogotá, Colombia, 2019.

Teniendo el concepto de lo que quiere decir el modelo Betz, es posible calcular su valor mediante la fórmula de caudal masico, debido a que, el caudal atraviesa el rotor a un flujo constante.

$$Q_m = \rho \times Q = \rho \times A_1 \times V_1 = \rho \times A_2 \times V_2 = \rho \times A \times V \quad (\text{Ec. 10})$$

²⁹ Felix, «LBA INDUSTRIAL,» 11 Mayo 2019. [En línea]. Disponible en: <http://www.lbaindustrial.com.mx/aerogeneradores-verticales/>.

Con la fórmula del caudal másico podemos hallar la potencia útil del aerogenerador de dos maneras:

- 6.8. *Como la pérdida de energía cinética que sufre el viento al pasar por las palas del rotor:*

$$P_{util} = \frac{-\Delta E_c}{\Delta t} = \frac{E_{c1} - E_{c2}}{\Delta t} = \frac{\frac{1}{2} \times \rho \times A \times d \times (v_1^2 - v_2^2)}{\Delta t}$$

$$= \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v \times (v_1^2 - v_2^2)$$

(Ec.11)

En la ecuación 6 se ha reemplazado el valor de la masa por el producto de densidad por volumen y la expresión de $v = \frac{d}{t}$

- 6.9. *Como trabajo generado por el viento en un tiempo determinado en la sección A, es decir, justo en el momento en que el viento está en las hélices del aerogenerador.*

$$P_{util} = Fv = \frac{\rho \times A \times d \times (v_1 - v_2)}{\Delta t} \times v = \rho \times A \times v^2 \times (v_1 - v_2)$$

(Ec.12)

Según la tercera ley de Newton, en esta expresión de potencia útil, se puede observar que la fuerza del viento es igual a la fuerza ejercida sobre el viento, pero es un número negativo, como se muestra a continuación:

$$Fuerza\ del\ viento = -Fuerza\ sobre\ el\ viento = \frac{-m \times (v_2 - v_1)}{\Delta t}$$

$$= \rho \times A \times v \times (v_1 - v_2)$$

(Ec.13)

Al igualar las dos ecuaciones de potencia útil, obtenemos la siguiente expresión:

$$\frac{1}{2} \times \rho \times A \times v \times (v_1^2 - v_2^2) = \rho \times A \times v \times (v_1 - v_2)$$

(Ec.14)

Para recordar que v es la velocidad del plano medio que esta entre la velocidad de entrada a las hélices v_1 y la velocidad de salida que esta después de las hélices v_2 , por lo tanto, v es la media de ambas velocidades y su expresión quedaría de la siguiente forma:

$$v = \frac{(v_1 + v_2)}{2}$$

(Ec.15)

La v_2 siempre va depender de la v_1 según se observa en el modelo de Betz. Por ello, se puede relacionar ambas velocidades en la siguiente ecuación:

$$v_2 = b \times v_1$$

(Ec.16)

Donde el valor de “b” estará entre 0 y 1. Por consiguiente, replanteamos la ecuación de la potencia útil (ecuación 6), reemplazando los valores de v_2 y v .

$$\begin{aligned} P_{util} &= \frac{1}{2} \times \rho \times A \times \frac{v_1 + (b \times v_1)}{2} \times (v_1^2 - (b \times v_1)^2) \\ &= \frac{1}{4} \times \rho \times A \times v_1^3 \times (1 + b) \times (1 - b^2) \end{aligned}$$

(Ec.17)

Con la expresión de la potencia útil y los valores correspondientes a cada variable es posible calcular la potencia útil máxima que el aerogenerador podrá aprovechar del viento, determinando el valor exacto del coeficiente “b”, derivando la ecuación 12 con respecto a “b” e igualando a cero.

$$\frac{dP_{util}}{db} = 0$$

(Ec.18)

Desarrollamos:

$$\begin{aligned} \frac{1}{4} \times \rho \times A \times v_1^3 \times (1 - 2b - 3b^2) &= 0 \\ -3b^2 - 2b + 1 &= 0 \end{aligned}$$

(Ec.14)

$$b = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{2 \pm \sqrt{4 - 4 \cdot 1 \cdot (-3)}}{-6} = \frac{2 \pm \sqrt{16}}{-6} = \frac{2 \pm 4}{-6} = \begin{cases} -1 \\ \frac{1}{3} \end{cases}$$

(Ec.19)

Al derivar obtenemos dos resultados posibles de la ecuación de segundo grado, el valor de -1 que no se debe tomar en cuenta debido a que no tiene ningún sentido físico que “v2” tenga un sentido negativo. Por consiguiente, el valor de -1 queda descartado y recurrimos a que el valor de “b” será 1/3, de manera que la ecuación de la v2 quedaría:

$$v_2 = 1/3 \times v_1$$

(Ec. 20)

Al utilizar la ecuación de la potencia útil con el coeficiente de Betz, debemos modificarla de la siguiente manera:

$$P_{util} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v_1^3 \times \frac{(1 + b) \times (1 - b^2)}{2}$$

(Ec.21)

En donde Cp al reemplazar el valor de b obtendríamos el siguiente valor:

$$C_p = \frac{(1 + b) \times (1 - b^2)}{2} = \frac{16}{27} = 59,3\%$$

(Ec.22)

El valor obtenido se utiliza para hallar la potencia de aerogeneradores que se encuentren en condiciones ideales de funcionamiento, es decir, que no se tienen en cuenta los rendimientos mecánicos como el rendimiento de las hélices, del multiplicador, del alternador y del transformador. Sin embargo, la potencia generada por el aerogenerador debe ser lo más cercana posible a la realidad con las condiciones específicas que contiene los elementos mecánicos, por esta razón se deben considerar la eficiencia de los siguientes componentes:

- Rendimiento del multiplicador: 97%
- Rendimiento del transformador: 97%

- Rendimiento de la hélice: 84%
- Rendimiento del alternador: 94%

Lo que conlleva a calcular el rendimiento total del aerogenerador, involucrando el límite de Betz, conseguimos un rendimiento del 45% para lo que sería un valor muy importante en la ecuación de potencia. Estos coeficientes de rendimiento son muy variables, en especial el Cp que se enfoca en el perfil del alabe bajo las condiciones que presenta el viento según la región en que se vaya a ubicar el aerogenerador. Por tal motivo el coeficiente de Betz tiene mucho que ver con el diseño y selección de un perfil aerodinámico que se tratara de explicar a continuación:

7. PRINCIPIOS BASICOS PARA EL DISEÑO Y SELECCIÓN DE UN PERFIL AERODINAMICO.

Se debe tener muy presente la primera ley de la termodinámica, que trata sobre la conservación de la materia y de la energía ya que siempre va a estar aplicada en el proceso de transformar la energía cinética en energía mecánica a través de las hélices y el flujo másico del viento que estará en contacto con estas. A partir de esta ley se considera la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \cdot (\Delta h + \Delta E_c + \Delta E_p) \tag{Ec. 23}$$

En donde el termino Q se refiere a el calor que ha entrado o salido del sistema y el termino W hace referencia al trabajo que se obtiene del proceso, evidenciando que su diferencia es igual a el flujo masico del aire que multiplica a la suma de la entalpia, la energía cinética y la energía potencial [1]. En este caso, la forma en que se transforma la energía cinética en energía eléctrica mediante un aerogenerador y según la formula anterior, es posible omitir el valor de Q debido a que es un sistema abierto y no requiere de combustión ni radiación, lo que quiere decir que las propiedades del viento no van a cambiar y el valor de Δh también se omite, como la transformación de energía va a ser en el mismo eje, a la isma altura del rotor y las hélices, la energía potencial tampoco se incluirá en la siguiente ecuación:

$$-\dot{W} = \dot{m} \cdot (\Delta E_c) \cdot \eta \tag{Ec. 24}$$

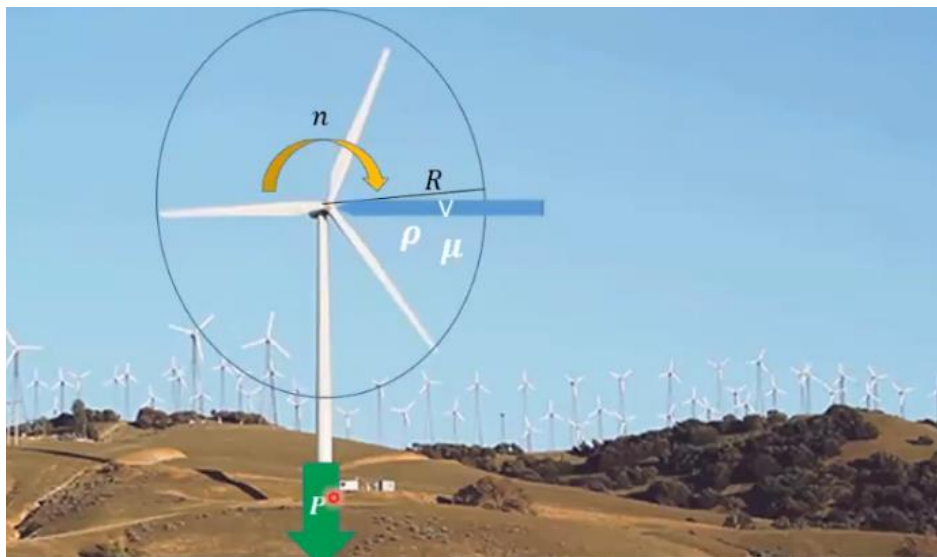
En esta ecuación se puede expresar de una mejor manera el trabajo que realiza un aerogenerador como la potencia que se obtiene a partir del viento, de tal manera que, quedaría expresado de la siguiente forma:

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

Ec. (25)

El término η de rendimiento es reemplazado por el coeficiente de potencia aerodinámico C_p , el cual se relaciona con el límite de Betz que ya lo habíamos mencionado anteriormente bajo ecuaciones matemáticas, este es el término que en realidad nos interesa, ya que es un factor muy importante a la hora de diseñar o seleccionar un perfil aerodinámico. Por lo tanto, una manera experimental de hallar el coeficiente de potencia es conocer primero que todas las variables que se pueden extraer de un aerogenerador.

Figura 29. Principales variables del funcionamiento de un aerogenerador.



Fuente: «Energética Futura,» [En línea]. Disponible en: <https://energeticafutura.com/blog/cuanta-energia-se-puede-sacar-del-viento-limite-de-betz/>.

Las variables que se pueden observar en la figura 30, nos dice que, hay una velocidad de entrada, una velocidad angular, un radio de circunferencia formado por los alabes, la densidad y la viscosidad del fluido, es decir del viento, y por último la potencia que se quiere extraer del proceso. Por tanto, se debe aplicar un análisis dimensional llamado teorema pi de Buckingham, que se refiere al cambio de perspectiva al observar un fenómeno físico, simplificándolo al reducir el número de

variables que se encuentran en él. Muchos monomios adimensionales se obtienen mediante análisis dimensional y describen el fenómeno físico inicial con la misma precisión que el método inicial, pero con menos variables.³⁰

Según el teorema, comenzamos definiendo las variables y combinando tales variables de manera que se puedan cancelar sus unidades y convertirlos en valores adimensionales como lo indica el determinado teorema.

$$f(P, V, \rho, R, \mu, w) = 0$$

Ec. (26)

$$f\left(\frac{P}{\rho \cdot V^3 \cdot R^2}, \frac{w \cdot R}{V}, \frac{V \cdot R \cdot \rho}{\mu}\right) = 0$$

Ec. (27)

A partir de la combinación de variables que menciona el teorema de pi de Buckingham nos dice que, se obtienen unos parámetros de dependencia adimensional con respecto a el rendimiento de potencia aerodinámico (C_p), a las celeridades de los alabes en función de la velocidad del viento (λ) y el flujo masico que atraviesa el área del rotor (Re).

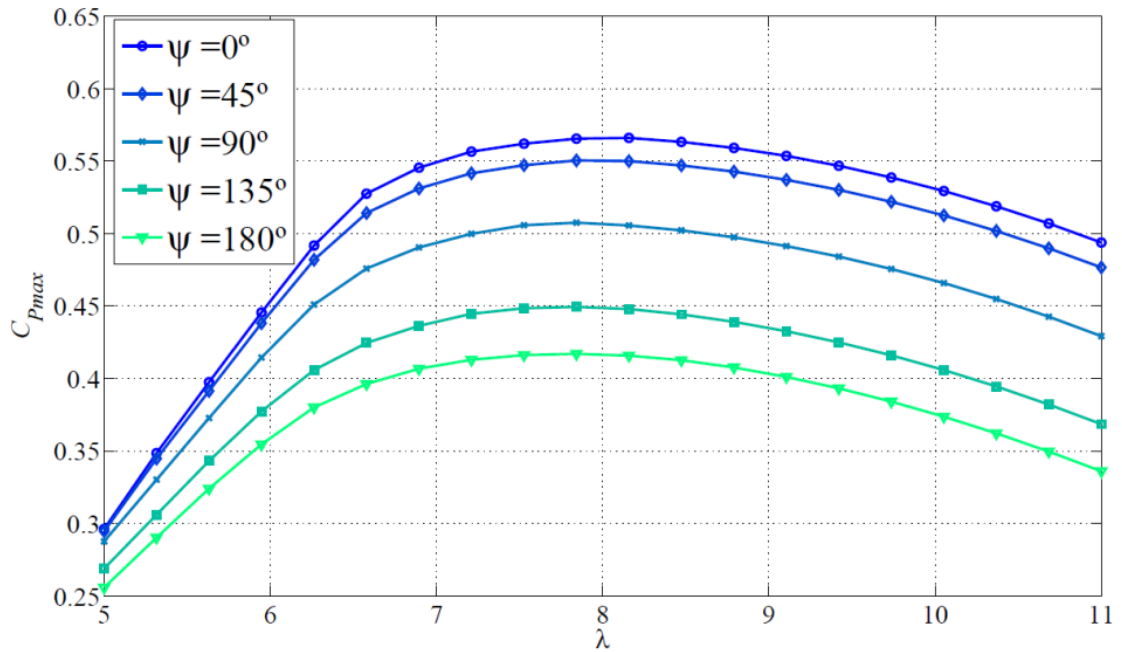
$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \cdot \pi \cdot R^2}, \quad \lambda = \frac{\omega \cdot R}{V}, \quad Re = \frac{V \cdot R \cdot \rho}{\mu}$$

Ec. (28)

Con un diseño ya preestablecido podemos definir los valores del coeficiente de potencia aerodinámico, de la celeridad y del número de Reynolds para conseguir la curva del comportamiento de C_p , que es una curva que se grafica experimentalmente en la siguiente figura:

³⁰ «TecnoBlogSanMartin,» 20 Marzo 2012. [En línea]. Disponible en: <https://tecnoblogsanmartin.wordpress.com/2012/03/20/aerogenerador-partes/>.

Figura 30. Curvas del rendimiento aerodinámico C_p .



Fuente: I. C. F. P. Luján, «Facebook,» 19 Marzo 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.facebook.com/CipLaLibertad/videos/179790077286292/>.

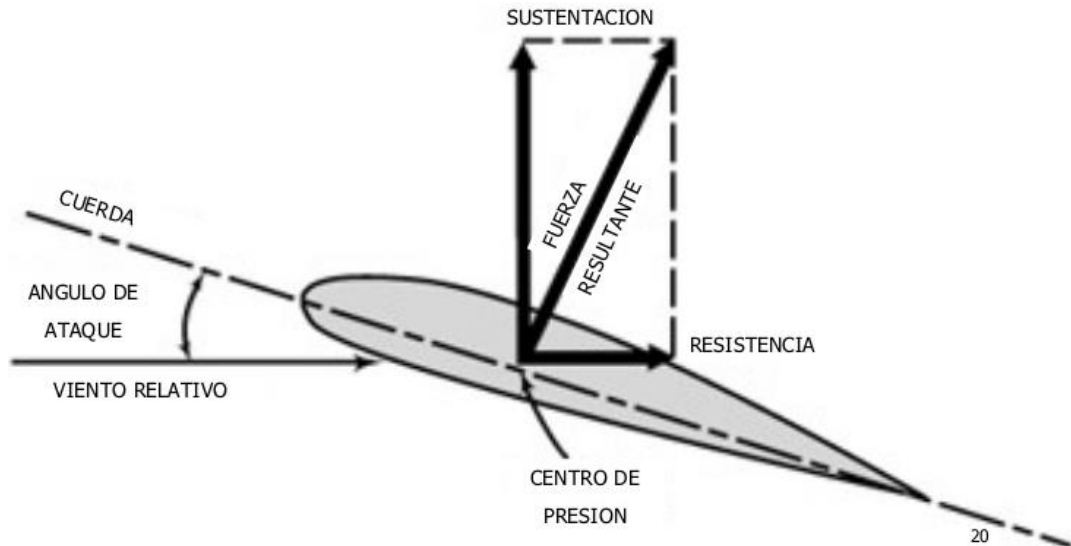
La grafica nos indica el coeficiente de potencia máximo calculada con base a las tres variables ya mencionadas, por lo tanto, a partir de estas curvas se cuantifica una ecuación empírica, donde C_p va seguir dependiendo de la celeridad (λ) y del número de Reynolds (Re) como se muestra a continuación:

$$C_p = \left[1 - \frac{1,386}{B} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]^2 \times \left[\frac{16}{27} \cdot (e^{-0,35 \times \lambda^{-1,29}} - \frac{Cd}{Cl} \cdot \lambda) \right]$$

Ec. (29)

Para esta expresión parece que el Re no aparece, sin embargo, sigue estando implícito en la división entre el término Cd y Cl que significa coeficiente de arrastre y coeficiente de sustentación respectivamente, también es llamado dependencia aerodinámica ya que cada segmento del alabe está constituido por dichos coeficientes o mejor dicho vectores de flujo generadas por el viento que golpea el perfil.

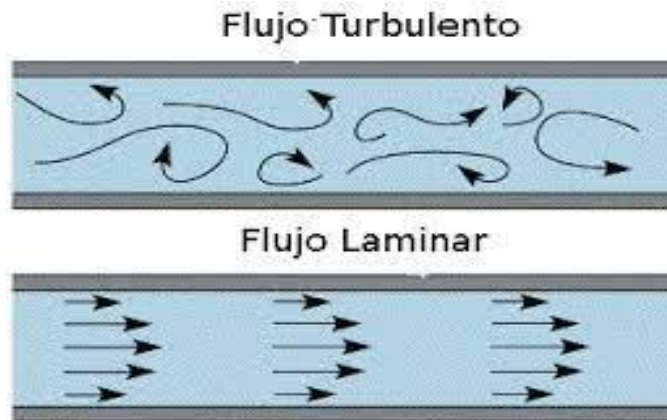
Figura 31. Diagrama de fuerzas para un perfil aerodinámico.



Fuente: J. d. R. S. J. A. M. d. A. Valentín Pardo Fernandez, «Generalizaciones al teorema pi de Buckingham con algunas aplicaciones,» Madrid, 2007.

Los perfiles aerodinámicos están caracterizados por el tipo de flujo que los atraviesa de ciertas maneras, cuando el fluido entra en contacto con el perfil, aparecen ciertas fuerzas o presiones que a simple vista no se pueden observar, es por esto que, existen programas computacionales muy avanzados para este tipo de experimentos aerodinámicos. Principalmente existen dos tipos de flujo, el laminar y el turbulento como se muestra en la siguiente figura:

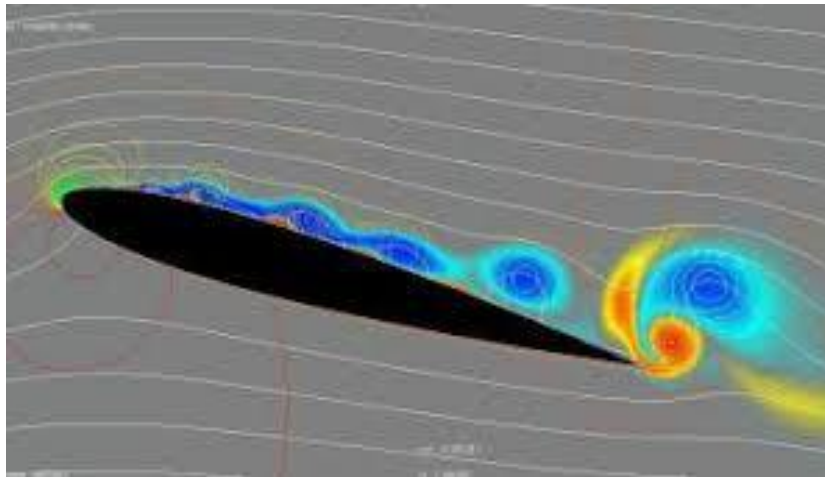
Figura 32. Flujo laminar y flujo turbulento.



Fuente: «Wordpress,» 24 Marzo 2014. [En línea]. Disponible en: <https://jasf1961.wordpress.com/category/calculo-aerogenerador/>.

En este proceso, el flujo que se presenta con mayor frecuencia después de que el viento choca con el perfil es el flujo turbulento (figura 33), es por esto que es importante identificar el valor de esta variable, ya que presenta un factor determinante al diseñar o seleccionar el perfil del alabe. La turbulencia de flujo que se presenta al tener contacto con el alabe representa la disminución de la velocidad del viento a un tercio según la teoría de Betz.

Figura 33. Comportamiento del viento al chocar con un perfil aerodinámico.



Fuente: «Una neurona para cada deporte,» 21 Noviembre 2015. [En línea]. Disponible en: <https://unaneuronaparacadadeporte.com/tag/aerodinamica-2/>.

Para poder conocer los valores de la turbulencia, debemos tener presente dos conceptos importantes:

- Coeficiente de Arrastre (C_d): Componente de la fuerza que actúa paralela a la dirección del viento.
- Coeficiente de Sustentación (C_l): El componente de la fuerza aerodinámica en la dirección perpendicular al flujo o al viento.

Según estas definiciones, los coeficientes mencionados nos describen unos vectores de fuerza que también se pueden interpretar como una presión de flujo a la que es sometido el perfil del alabe cuando está en contacto con el viento. Para nuestro caso, La selección de estos valores tiene en cuenta el comportamiento del aerogenerador y su respectiva simulación y modelo RANS (Reynolds Average Navier-Stokes). Es un modelo basado en el promedio de las ecuaciones del fluido, en donde todas sus magnitudes se sustituyen mediante la suma de su valor medio acompañado de un componente de fluctuación. Dentro de este modelo existen

varios métodos de solución, como, por ejemplo: métodos de cero ecuaciones, de una, de dos o más ecuaciones.

El método que más se utiliza es el modelo κ - ϵ que incorpora dos ecuaciones en derivadas parciales donde se interrelacionan la energía cinética del fluido turbulento (k) y su velocidad de disipación (ϵ) al sistema de ecuaciones del fluido. Es importante tener en cuenta que las mencionadas variables son fundamentales para determinar los valores de los coeficientes de arrastre y de sustentación, es por eso que la teoría nos dice que entre mayor sea la fuerza de sustentación, menor tendrá que ser la fuerza de arrastre para establecer condiciones ideales de un perfil aerodinámico.

7.1. CONTROL DE LA POTENCIA DE UN AEROGENERADOR

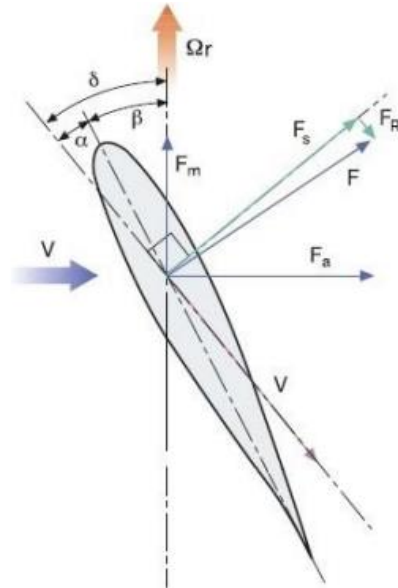
Cuando la velocidad del viento supera los límites estándar de la velocidad a la que puede girar el rotor, podría producir daños o averías potencialmente graves si no se cuenta con un sistema de control que evite este tipo de acontecimientos, para estos casos existen dos métodos de control que también ayudan a mantener la potencia producida lo más estable posible.

7.1.1. Control activo por cambio de paso del ángulo de las palas:

Es el método más caro que ofrece mayor control utilizando un dispositivo mecánico haciendo que las palas roten su perfil bajo su mismo eje, modificando su aerodinámica, de esta manera mantiene constante las rotaciones del rotor y la entrega de potencia.

Existe un ángulo de paso del perfil de la pala denominado β que representa el ángulo que se forma entre la cuerda del perfil aerodinámico y el plano de rotación del rotor. Es ahí donde el ángulo β juega un papel muy importante, debido a que si se varia, el ángulo con el que el flujo del viento golpea sobre el perfil variara y por lo tanto, lo harán las fuerzas de arrastre y de sustentación, variables fundamentales en la producción de potencia.

Figura 34. Diagrama de fuerzas para un perfil aerodinámico.



Fuente: «Fisindustrial,» [En línea]. Disponible en: <https://fisindustrial.wordpress.com/segundo-corte/temas-de-clase-ii/flujo-laminar-y-flujo-turbulento/>.

Existen dos mecanismos que realizan este tipo de rotación en las palas, como lo son los dispositivos hidráulicos y eléctricos. El mecanismo hidráulico se sitúa usualmente sobre el chasis principal, modificando simultáneamente el paso de ángulo de todas las palas, este sistema se constituye de una unidad hidráulica y un servomotor.

7.1.2. Control pasivo por desprendimiento o pérdida de flujo.

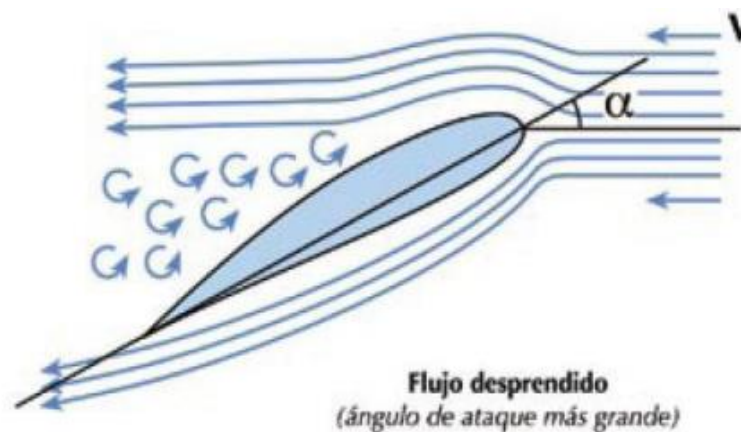
En este método no existe ningún mecanismo que haga rotar los perfiles aerodinámicos, todo lo contrario, permanecen fijas al rotor en todo instante. Los perfiles con este tipo de mecanismo se crean o se diseñan con el fin de producir turbulencias en la parte de baja presión de la pala cuando el viento alcanza velocidades muy elevadas, haciendo que se genere una disminución en la diferencia de presiones entre un lado y otro del perfil.

Cuando existe un mínimo de velocidad que rebasa la velocidad estándar o específica, el diseño del perfil reduce una parte de la energía transmitida al movimiento de las palas debido a las turbulencias que se generan, de esta manera disminuye la velocidad del rotor. En comparación con el otro mecanismo activo, este procedimiento de control pasivo es mucho más económico, pero menos

eficiente y exacto, por lo tanto, este mecanismo se utiliza especialmente para aerogeneradores que generen pequeñas potencias.

Explicando de una manera técnica, este tipo de sistemas a medida que aumenta la velocidad del viento también aumenta la velocidad relativa produciéndose un cambio en el ángulo de ataque y a su vez el coeficiente de sustentación alcanza su máximo valor. Es en este punto donde el mismo coeficiente de sustentación comienza a disminuir, mientras que el coeficiente de arrastre aumenta rápidamente, esto hace que la potencia del rotor disminuya de manera natural ya que, el flujo comienza a desprenderse generando vórtices y resistencia al giro del rotor.

Figura 35. Desprendimiento de flujo en un perfil aerodinámico.



Fuente: «El Gato Volante,» 9 Septiembre 2019. [En línea]. Disponible en: <https://gatovolante.wordpress.com/2019/07/29/la-capa-limite-influencia-del-no-reynolds-en-el-rendimiento-del-ala/>.

8. METODOLOGIA

En este proyecto se definirá y elaborará estrategias metodológicas para cumplir unas actividades determinadas desde la búsqueda de información hasta la entrega definitiva del diseño, utilizando el método de investigación cuantitativo, experimental y aplicado según los objetivos específicos establecidos, para el diseño se ejecutará el programa software de ANSYS WORKBENCH, sirviendo como simulador.

Consecuentemente se comenzará haciendo una investigación respecto a la zona con mejores condiciones climáticas en el departamento de Boyacá para poder obtener buenos resultados al simular el aerogenerador. Para escoger el lugar indicado es necesario garantizar información meteorológica de velocidad y dirección del viento.

Luego se escogerá el diseño de los alabes que mejor se adecue a las condiciones climáticas de la zona seleccionada en el departamento de Boyacá a partir de los distintos diseños que nos ofrecen la serie de perfiles NACA; también, se seleccionan las demás partes del aerogenerador a diseñar para determinar sus dimensiones y poder modelarlas el software.

Después de tener las partes y diseños definidos, se prosigue a modelar las piezas para luego acoplarlas y simularlas en las condiciones establecidas por la zona escogida. Al observar el funcionamiento del aerogenerador en el software se podrá analizar los resultados para luego concluir sus beneficios o falencias que se pudieron presentar al realizar el proyecto.

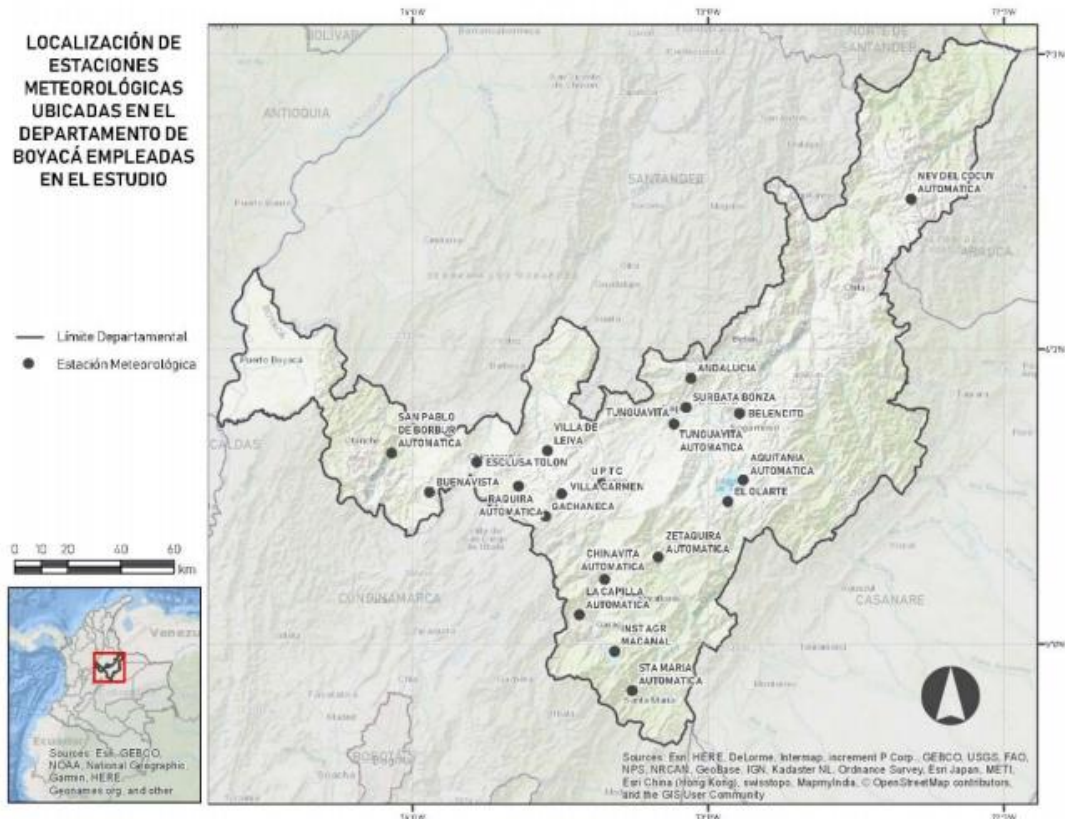
8.1. LOCALIZACIÓN DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS UBICADAS EN EL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ.

El IDEAM para el año 2017 reportó 4514 estaciones meteorológicas en todo el territorio colombiano con el fin de recolectar y proporcionar información hidrológica, ambiental y meteorológica a entidades públicas relacionadas con el desarrollo sostenible y prevención del cambio climático para definición de políticas y normas al desarrollar proyectos que perjudiquen de alguna manera el ecosistema del país. Lo que realmente nos interesa son las 304 estaciones que tiene el departamento de Boyacá, de las cuales solo 26 son medidoras de velocidad y dirección del viento, 18 de estas tienen registros como se observa en la figura 36.

Existen también 3 estaciones propiedad de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) y cuentan con registros que son asequibles. Las estaciones miden la velocidad y dirección del viento a una altura de 10 metros recomendados por la (WMO) para que no afecte su medición al rozar el viento con la superficie de la tierra. Se establecen dos tipos de estaciones, las convencionales que fueron las primeras en instalarse y corresponden a 10 de dichas estaciones, las

automáticas que gracias a los avances tecnológicos son las restantes 8 estaciones instaladas aproximadamente desde el año 2000 en adelante.³¹

Figura 36. Localización de estaciones meteorológicas ubicadas en el departamento de Boyacá.



Fuente: «Toda Colombia,» 21 Febrero 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.todacolombia.com/departamentos-de-colombia/boyaca/municipios-division-politica.html>.

8.2. REGISTROS E INFORMACIÓN RECOPIADA DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS.

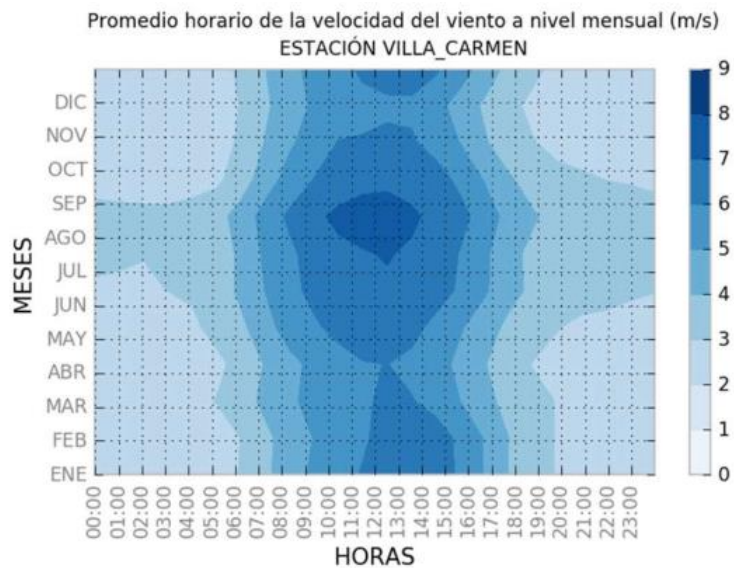
³¹ «Toda Colombia,» 21 Febrero 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.todacolombia.com/departamentos-de-colombia/boyaca/municipios-division-politica.html>.

El comportamiento del viento durante el día va estar siempre influenciado por las condiciones climáticas locales del territorio, la frecuencia que tiene el viento al cambiar su comportamiento se hace más específica, generalmente a medio día, aumenta su velocidad, mientras que en las horas de la noche tiende a disminuir. Para cada estación se encuentra una caracterización del ciclo diurno y anual según los registros horarios y anuales que se almacenaron en cada uno de ellos; se determina la variación de velocidades promedio del día, de los 12 meses del año para poder representarlos gráficamente.

Según los datos que se recopilaron a lo largo de los años, cada estación tiene un diagrama Hovmoller, que representan una variable tiempo vs espacio para cantidades escalares como la temperatura, densidad, presión o velocidad; en este caso se muestran diagramas para las estaciones que llegan a superar los 5 m/s en algunos meses del año, como se observa a continuación en el siguiente municipio:

- Estación Villa Carmen: Esta ubicada en el municipio de Samacá departamento de Boyacá, a una altura de 2604 msnm, cuenta con área de 150 Km². El diagrama nos indica que, se presentan velocidades que superan los 6 m/s durante 10 meses del año, entre las 11 am y las 15 pm, sin embargo, entre el mes de julio y septiembre el periodo de tiempo aumenta para las velocidades altas, desde las 7 am y las 16 pm. Según el grafico, se presenta una velocidad que llega a los 8 m/s entre el mes de agosto y septiembre desde las 10 am y las 14 pm.

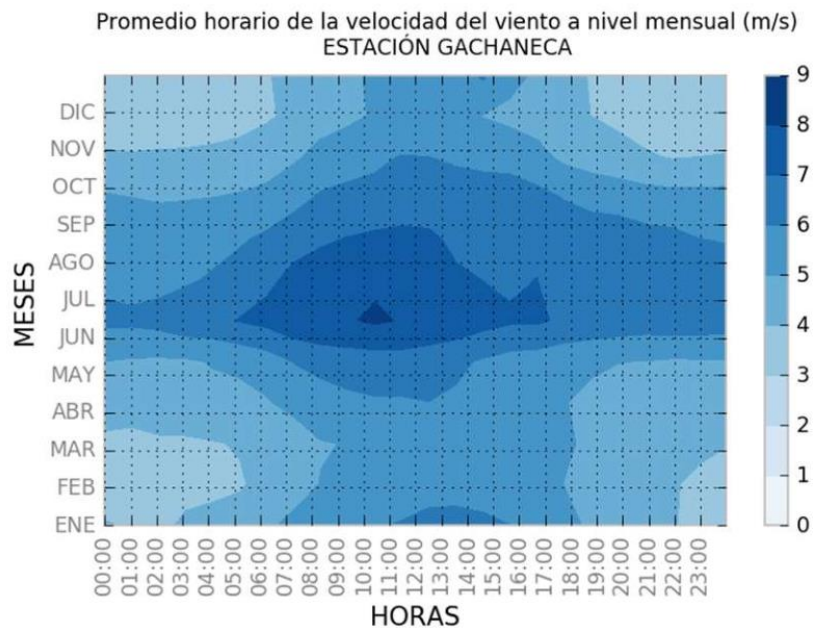
Figura 38. Diagrama Hovmoller de la estación Villa Carmen.



Fuente: «Toda Colombia,» 21 Febrero 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.todacolombia.com/departamentos-de-colombia/boyaca/municipios-division-politica.html>.

- Estación Gachaneca: Ubicada también en el municipio de Samacá, la diferencia de esta estación con la de Villa Carmen es que estuvo activada desde el año 1980 al año 1990, en cuanto cumplió los 10 años de estar en actividad fue suspendida y recopiló unas velocidades superiores a los 5 m/s en cuatro meses del año durante las 10 am y las 16 pm. Adicionalmente durante las 9 am y 11 am se presentan velocidades superiores a los 8 m/s en el mes de Julio.

Figura 39. Diagrama Hovmoller de la estación Guachaneca.



Fuente: Ibíd.

A partir de los estudios realizados por el IDEAM, se puede determinar que el municipio de Samacá tiene un gran potencial eólico para aprovecharlo en pro del medio ambiente en la producción de energía eléctrica con un aerogenerador que no requiere de la quema de combustibles fósiles para obtenerla. También se presentan velocidades superiores a los 6 m/s en diez meses del año, manteniéndose constante durante las 11:00 am y las 15:00 pm.

9. MODELO Y UBICACIÓN DE LA TURBINA EÓLICA.

En la Universidad Nacional de Colombia se realizó una tesis que identifica las zonas con potencial energético eólico en el departamento de Boyacá para proyectos basados en parques eólicos, según la investigación se identifican cuatro estaciones meteorológicas que establecen buenas condiciones de vientos; entre las cuales están, la estación de Guachaneca y Villa Carmen que, además, son las que principalmente se han venido puntualizando.

De acuerdo a la norma IEC 61400-1 la cual corresponde al estándar internacional de requerimientos mínimos de seguridad para sistemas de generación de energía con turbinas eólicas, se debe establecer el tipo de aerogenerador que se va a emplear en función de una velocidad promedio a una altura de 100m como se observa en la siguiente tabla.

Tabla 1. Clases de aerogeneradores para las zonas con potencial eólico en el departamento de Boyacá

Estación	Velocidad promedio (m/s) a 100 metros de altura	Clase de aerogenerador requerido según IEC
Andalucía	5,15	III
Aquitania	5,97	III
Gachaneca	9,24	I
Villa Carmen	7,15	III

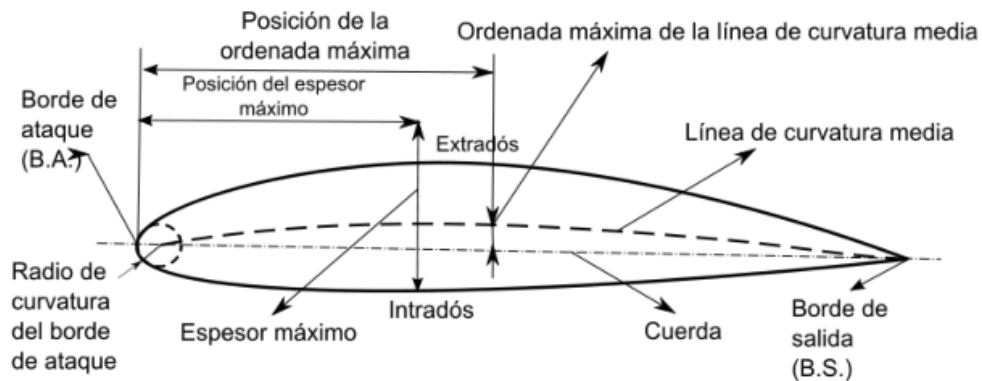
Fuente: S. Renata, «Unal.edu.co,» 2018. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/63745/1018424888.2018.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. [Último acceso: 07 2021].

De esta manera, ahora se debe escoger la estación meteorológica que servirá como punto de referencia para el correspondiente estudio de la potencia que puede generar un aerogenerador en el municipio de Samacá dependiendo de los vientos presentados, es por esta razón que se escoge la estación de Villa Carmen debido a los favorables vientos que presenta en el diagrama Hovmoller de la imagen 38.

9.1. SELECCIÓN DE EL PERFIL AERODINAMICO RESPECTO A LAS VELOCIDADES DEL SITIO.

La zona aerodinámica de la pala es muy importante ya que es una zona crítica y se pueden presentar problemas de disminución de potencia debido a un mal diseño de perfil, por esto depende mucho su selección con las condiciones en que se presente el viento. Para la selección es importante saber la terminología que contiene un perfil aerodinámico acorde a los componentes o secciones de diseño, las cuales son las siguientes:

Figura 40. Características que conforman el diseño de un perfil aerodinámico.



Fuente: «Aerodinámica F1,» 22 Junio 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.aerodinamicaf1.com/2020/06/perfiles-aerodinamicos-como-se-diseñan/>.

- Borde de ataque: Radio de curvatura que se encuentra en el borde delantero del perfil.
- Borde de salida: Borde o punto que se encuentra en la parte trasera del perfil.
- Cuerda: es la línea recta que pasa entre el borde de ataque y el borde de salida.
- Línea de curvatura media: línea equidistante entre el extradós y el intradós.
- Ordenada máxima de la línea de curvatura media: máxima distancia entre la línea de curvatura media y la cuerda, su valor suele darse en porcentaje.

- f. Ordenada máxima de la línea de curvatura media: es la máxima distancia que hay entre la línea de curvatura media y la cuerda, su valor suele darse en porcentaje.
- g. Posición del espesor máximo: es la distancia que hay entre el borde de ataque y el espesor máximo.
- h. Espesor máximo: Existente entre el extradós y el intradós del perfil, su valor varía entre el 3% para perfiles delgados y 18% para perfiles gruesos.
- i. Posición de la ordenada máxima: es la distancia que hay entre el borde de ataque y la ordenada máxima de la línea de curvatura media.
- j. Radio de curvatura del borde de ataque: es un círculo tangente al extradós y el intradós que define la forma del borde de ataque.

De acuerdo a las definiciones anteriores, podemos comprender de una mejor manera como se compone un perfil aerodinámico, sus características principales y más importantes; ya estando familiarizados con el concepto, se prosigue a escoger un tipo de perfil con base al catálogo NACA (National Advisory Committee for Aeronautics), es decir Comité Asesor Nacional de Aeronáutica, en donde se observa una gran variedad de perfiles aerodinámicos, cada uno con un número de serie diferente y con distintos valores de diseño.

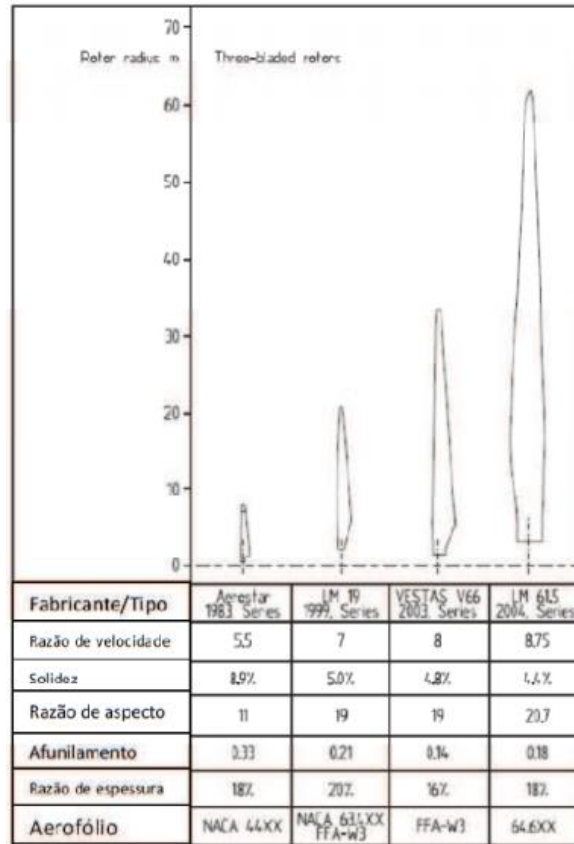
Los primeros perfiles Naca son reconocidos por tener series de 4 dígitos, el primer dígito indica la combadura máxima en porcentaje de la cuerda es decir de la longitud del perfil, el segundo dígito menciona la posición de la combadura máxima respecto a la cuerda también en porcentaje, y los dos últimos dígitos representan el espesor máximo del perfil en porcentaje de la cuerda.³²

La celeridad de los alabes (λ) es la relación que tienen la punta de los alabes respecto a la velocidad del viento, cuyo valor está estipulado en tablas parametrizadas según el radio de la turbina y la velocidad del viento, como se muestra a continuación:³³

³² «Energiza,» 2018. [En línea]. Disponible en: http://www.energiza.org/index.php?option=com_k2&view=item&id=1246:principales-componentes-de-un-aerogenerador.

³³ «Aulafacil,» [En línea]. Disponible en: Estudio y aprobación de documentos del programa con la Facultad de Ingeniería Industrial para el proyecto de doble programa.

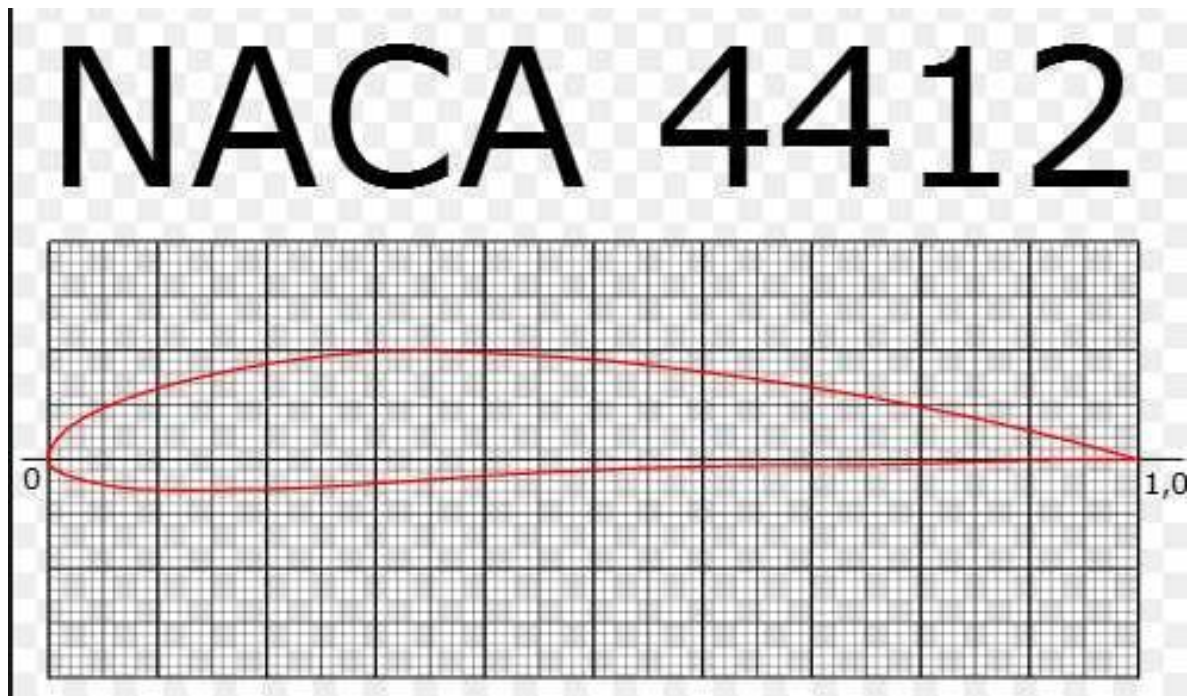
Figura 41. Parámetros de perfiles aerodinámicos.



Fuente: D. R. F. Galindo, DISEÑO DE PERFILES AERODINAMICOS, México D.F., 2006.

Existen dos tipos de perfil aerodinámico según su forma, como lo son los simétricos que son recomendados para usarlos en aerogeneradores de tipo vertical y los asimétricos que van más de la mano con aerogeneradores de tipo horizontal; A partir de los parámetros mostrados anteriormente se puede decir que, el radio del rotor para este proyecto es de 4,5m, de acuerdo a esto, el tipo de perfil aerodinámico a escoger es de tipo Naca 44XX, por lo tanto, para este proyecto se seleccionara el perfil Naca 4412 (figura 43) con una combadura máxima del 4% localizada en un 40% de la cuerda y un espesor máximo del 12%. Es un perfil adecuado para un aerogenerador de tipo horizontal por su aspecto asimétrico y su no tan complejo diseño.

Figura 42. Boceto de un perfil aerodinámico Naca 4412.



Fuente: M. d. N. Müller, Diseño de una turbina eólica Axis, Rio de Janeiro, Brasil, 2015

Las principales dimensiones del aerogenerador, como lo es el diámetro del rotor y la altura de la torre se determinaron teniendo en cuenta lo costoso que puede llegar a ser la fabricación y el mantenimiento de las palas y todo lo que compone la torre, también se tomó en cuenta la cantidad de habitantes en el municipio de Samacá, donde su población no excede las 20.000 personas.³⁴ Por esta razón se escoge un aerogenerador de tamaño pequeño para un municipio pequeño.

Para calcular las diferentes variables que un aerogenerador puede medir debemos tener en cuenta los siguientes datos de entrada:

- Velocidad ideal de la zona = 7m/s
- Diámetro = 9m
- Altura de la torre = 10m

La potencia que se puede calcular de la energía cinética del viento es realmente impresionante debido a que aún no se considera el coeficiente de potencia, como se dijo anteriormente, la energía que produce un aerogenerador es solo una fracción de la energía que contiene el viento. Por tal motivo se calcula la potencia

³⁴ «Municipios de Colombia,» 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.municipio.com.co/municipio-samaca.html>.

del aerogenerador nominal (ecuación 9) teniendo en cuenta la eficiencia del generador eléctrico y otros componentes mecánicos de la turbina.

Tenemos:

$$D = 9m$$

$$\rho = 0,7kg/m^3$$

$$v = \frac{7m}{s}$$

$$Cp = 5,93 \text{ (Ec. 22)}$$

$$\eta = 0,653 \text{ (aproximación de la eficiencia de los componentes mecánicos)}$$

Reemplazando:

$$A = \frac{\pi \times (D^2)}{4}$$

$$A = \frac{\pi \times (9^2)}{4} = 63,6172m^2$$

$$Potencia Nominal = 5,93 \times \frac{1}{2} \times 0,7 \times 63,6172 \times 7^3 \times 0,653$$

$$Potencia Nominal = 29573,6269W$$

Entonces se prosigue a calcular la velocidad angular (ω) mediante la ecuación 28, utilizando el valor de 5,5 como la celeridad según el radio del rotor (Figura 42) que se entiende como la relación entre la velocidad tangencial al extremo de la pala y la velocidad del viento.³⁵

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V}$$

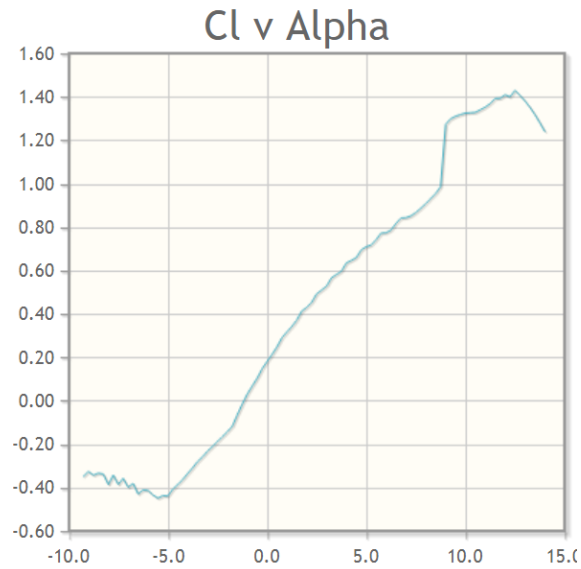
$$5,5 = \frac{\omega \cdot 4,5}{7}$$

$$\omega = 8,555 \frac{rad}{s}$$

Después, se analizan y calculan los ángulos de incidencia, de ataque (α), de estancamiento (Φ), el de inclinación (β). El ángulo de ataque ya viene preseleccionado al seleccionar el perfil Naca 4412, cuyo valor es de 9.75° , a partir de este valor se puede calcular el coeficiente de arrastre (Cd) y el de sustentación (Cl) mediante la siguiente gráfica:

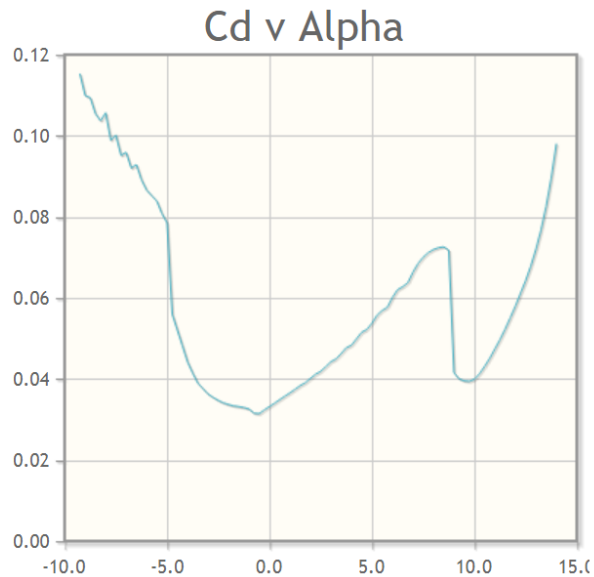
³⁵ T. S. Campos, «Algunos elementos sobre la energía eólica,» Santa Cruz, Bolivia, 1997.

Figura 43. Gráfica C_l vs Alpha.



Fuente: C. F. d. F. Machado, Projeto de uma turbina eólica de eixo horizontal, Rio de Janeiro: Escpla Politecnica, 2014.

Figura 44. Grafica C_d vs Alpha.



Fuente: C. F. d. F. Machado, Projeto de uma turbina eólica de eixo horizontal, Rio de Janeiro: Escpla Politecnica, 2014.

Según las gráficas, el valor del coeficiente de arrastre es de 0,03942 y el valor del coeficiente de sustentación es de 1,3184, debido a que la página web de donde se extraen los puntos del perfil posee detalles significativos de cada serie Naca, ahorrándonos la tarea de calcularlos mediante ecuaciones.

El ángulo de estancamiento Φ se calcula con la siguiente ecuación:³⁶

Tenemos:

$$v = 7m/s \text{ velocidad del viento}$$

$$\omega r = \text{Velocidad lineal del perfil}$$

$$Cl = 1,3184$$

$$Cd = 0,03942$$

$$\alpha = 9,75^\circ$$

$$\Phi = \tan^{-1} \frac{v}{\omega r}$$

(Ec. 30)

$$\Phi = \tan^{-1} \frac{7}{8,55 \times 4,5}$$

$$\Phi = 10,3^\circ$$

Este ángulo de estancamiento es la suma del ángulo de inclinación y el de ataque, entonces:

$$\Phi = \beta + \alpha$$

$$\beta = \Phi - \alpha$$

$$\beta = 0,55^\circ$$

La velocidad resultante del perfil Naca se halla de la siguiente manera:

$$W = \sqrt{v^2 + \omega r^2}$$

(Ec. 31)

$$W = 39,13 \frac{m}{s}$$

Considerando que el radio de la nariz del aerogenerador es la quinta parte del radio total del aerogenerador, se puede calcular el tamaño de la cuerda del perfil transversal del alabe, mediante la siguiente ecuación:

³⁶ «Iberdrola,» [En línea]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/palas-aerogeneradores>.

$$c = \sigma \times \pi \times \frac{R^2}{(z.l)}$$

(Ec. 32)

Donde:

- c = tamaño de la línea recta que une el borde de ataque y el borde de salida en el perfil Naca (m).
- σ = porcentaje de la solidez del rotor (Figura 42).
- R = Radio del rotor (m).
- z = número de palas del aerogenerador
- l = Longitud de la hoja o pala (m) = Radio del rotor – Radio de la nariz del rotor = 4,5m – 0,5m = 4m

Entonces:

$$c = 0,471m$$

De esta manera, podemos comenzar a diseñar la turbina con base a los datos iniciales y variables calculadas, que se pueden plasmar en una ficha técnica o tabla para identificar los puntos más significativos en el tipo de modelo de turbina que se realice.

Lo que nos lleva a recopilar información para proyectos medianos y económicos en el departamento de Boyacá, específicamente en el municipio de Samacá en donde se puede aprovechar un aerogenerador con una potencia nominal de 29,573KWh, es una potencia considerable para un municipio de 19907 habitantes. Se considera que una persona en promedio consume 38KWh mes, entonces:

Potencia generada por la turbina al mes (P_m).

$$P_m = P_{nominal} \times 24h \times 30días$$

$$P_m = 21292,56KWh \text{ mes}$$

Número de habitantes que puede alimentar de energía eléctrica la turbina en el mes (N_h).

$$N_h = P_m \div 38KWh \text{ mes}$$

$$N_h = 560 \text{ habitantes}$$

La siguiente tabla muestra las dimensiones y variables más importantes que constituyen el aerogenerador a diseñar:

Tabla 2. Especificaciones técnicas del aerogenerador a diseñar.

DATOS GENERALES	
Potencia Nominal	29,573 KW
Diámetro del rotor	9 m
Área del barrido	63,6172m ²
Densidad de potencia	464,858 W/m ²
Generador	Doblemente alimentado
PALAS	
Longitud	4 m
Perfil	NACA 4412
TORRE	
Altura	10 m
EJE	
Tipo	Horizontal

Fuente: Propia.

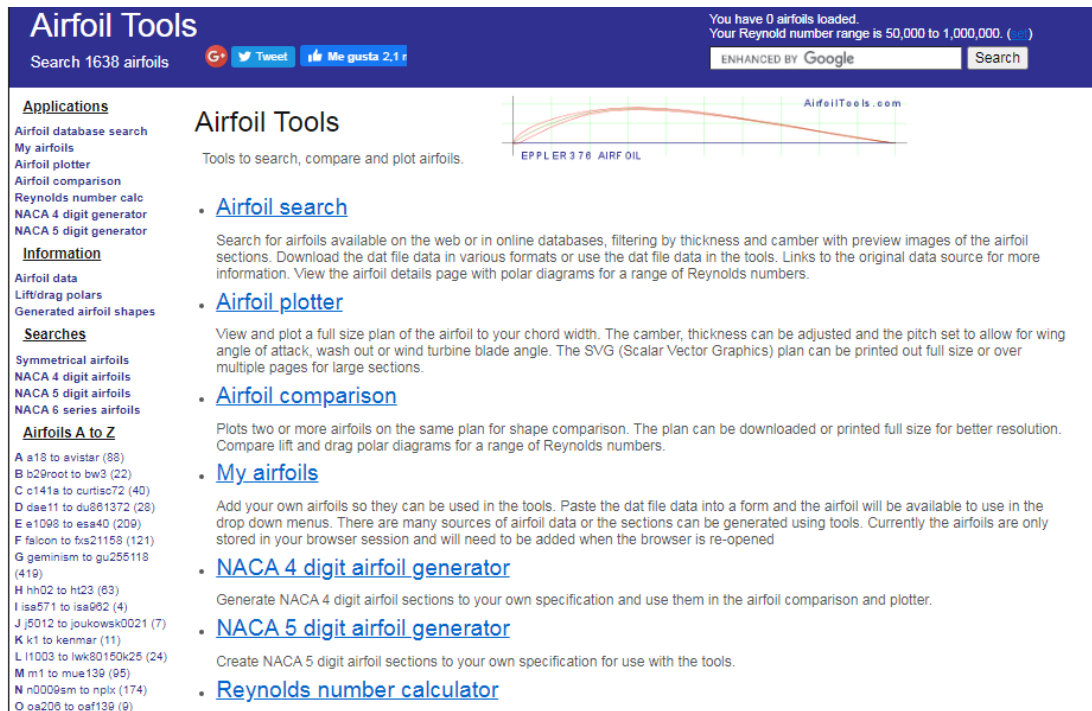
10. DISEÑO DEL AEROGENERADOR EN 3D INVENTOR.

La construcción de la geometría de dicho aerogenerador se va a realizar o desarrollar en el software *Autodesk Inventor Professional 2019*, debido a su sofisticado diseño mecánico avanzado para modelar, parametrizar y ensamblar piezas de cualquier clase. En la mayoría de proyectos que tiene que ver con el modelado de piezas industriales, automotriz, aeroespacial y demás se utiliza el programa *SolidWorks* debido a su popularidad y antigüedad; por esta razón que se quiere explorar en otro programa de modelación, para ampliar el conocimiento y la experiencia en cuanto otros campos de diseño.

10.1. DISEÑO DEL PERFIL AERODINAMICO NACA 4412

El primer paso es buscar en el navegador “Airfoil Tools” y dar clic en el primer link, se abre una pestaña como esta:

Figura 45. Sitio web Airfoil Tools.



The screenshot shows the Airfoil Tools website. The header includes the site name, a search bar with 1638 airfoils, and social media links. The main content area is titled 'Airfoil Tools' and contains a list of tools: 'Airfoil search', 'Airfoil plotter', 'Airfoil comparison', 'My airfoils', 'NACA 4 digit airfoil generator', and 'Reynolds number calculator'. A graph of an airfoil profile is visible in the top right corner.

Fuente: C. F. d. F. Machado, PROJETO DE UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL, Rio de Janeiro: Escla Politecnica, 2014.

Después se introduce el nombre y serie del perfil aerodinámico que quiere escoger en el buscador que se encuentra en la parte superior derecha y seleccionamos el primer perfil que aparece.

Figura 46. Resultados de la búsqueda del perfil Naca 4412.

The screenshot shows the 'Airfoil Tools' website interface. At the top, there is a search bar with 'naca 4412' entered and a 'Search' button. The page title is 'AirfoilTools.com search results'. Below the search bar, there are several sections: 'Applications' (Airfoil database search, My airfoils, Airfoil plotter, Airfoil comparison, Reynolds number calc, NACA 4 digit generator, NACA 5 digit generator), 'Information' (Airfoil data, Lift/drag polars, Generated airfoil shapes), 'Searches' (Symmetrical airfoils, NACA 4 digit airfoils, NACA 5 digit airfoils, NACA 6 series airfoils), and 'Airfoils A to Z' (listing various airfoil series like A e18 to avistar, B b2root to bw3, etc.). The main content area displays search results for 'NACA 4412 (naca4412-il)', including a link to 'airfoiltools.com > airfoil > details > airfoil=naca4412-il', a description of the airfoil's characteristics (Max thickness 12% at 30% chord, Max camber 4% at 40% chord), and links to other tools like 'NACA 4 digit airfoil generator' and 'Airfoil plotter'.

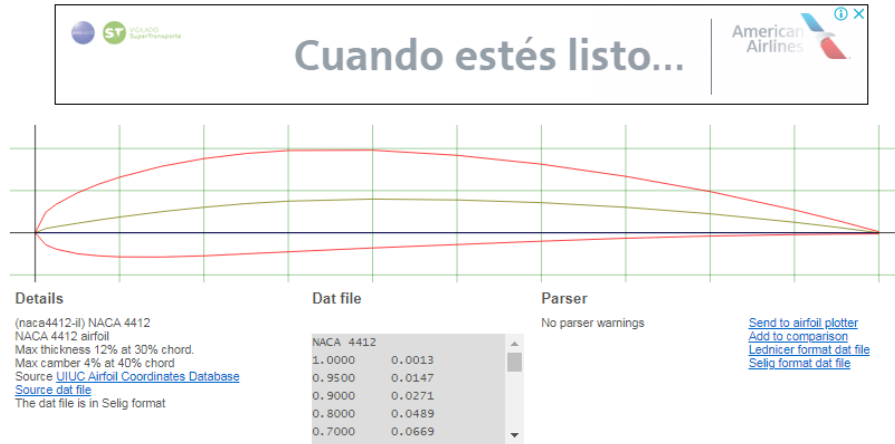
Fuente: C. F. d. F. Machado, Projeto de uma turbina eólica de eixo horizontal, Rio de Janeiro: Esclpa Politecnica, 2014.

A continuación, se muestra el esquema del perfil aerodinámico con sus respectivas coordenadas y puntos. A estos puntos es necesario que sean copiados en un bloc de notas y luego se pasan a un libro de Excel que después son importados al programa Inventor mediante el comando “Curva”, de esta manera los puntos son unidos para formar el perfil alabe Naca 4412.

Figura 47. Perfil aerodinámico Naca 4412.

NACA 4412 (naca4412-il)

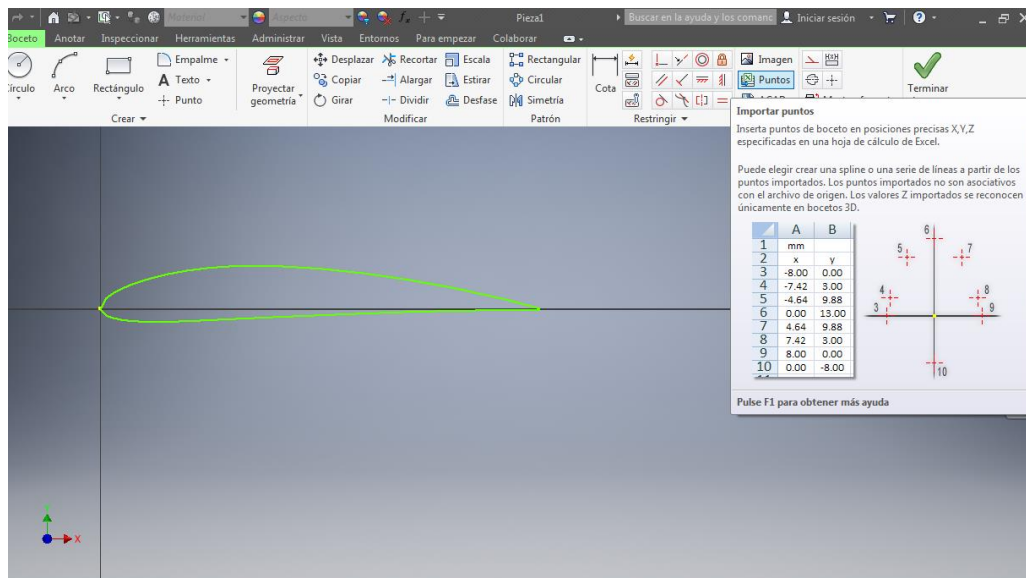
NACA 4412 - NACA 4412 airfoil



Fuente: C. F. d. F. Machado, Proyecto de turbina eólica de eje horizontal, Rio de Janeiro, 2014.

Teniendo las coordenadas del perfil el paso a seguir es importar los puntos en el software creando un nuevo boceto y seleccionando el comando de puntos con el logo de Excel.

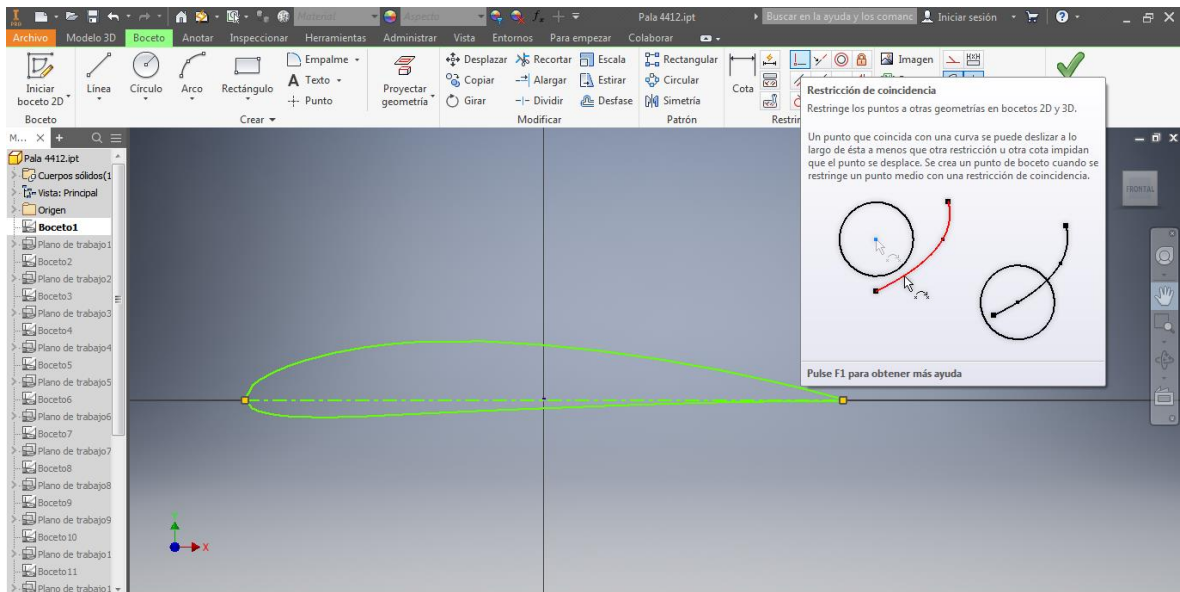
Figura 48. Puntos importados del perfil Naca a Inventor.



Fuente: Propia.

Como se había mencionado anteriormente, las medidas de la turbina serán de una escala mediana, lo que nos lleva a modificar las coordenadas del perfil en el libro de Excel, convirtiendo sus coordenadas en medidas milimétricas y configurando los parámetros del documento en la norma ASME (mm). También es importante trazar una línea de construcción como eje horizontal del perfil atravesando de un lado a otro para ubicar su centro en el punto (0,0).

Figura 49. Plano de inclinación del perfil.



Fuente: Propia.

Una vez se tiene hecho el perfil, ubicado en todo el centro del plano se prosigue a crear 16 planos paralelos a una distancia de 250mm entre cada uno para cubrir la longitud de la pala que recordemos es de 4m. En cada uno de estos planos se importan los puntos del perfil para tener la geometría y comenzar a darles un valor de cuerda y un grado de inclinación a cada perfil, dándole forma a la hélice.

El valor hallado de la cuerda del perfil Naca 4412 lo vamos a tomar como el mayor tamaño $c=0,471m$, y como nuestra hélice la dividimos en 16 planos, vamos a ubicar este valor en el plano n°1 para tenerlo de referencia. De esta manera se prosigue a la construcción de la pala, teniendo en cuenta que los valores obtenidos son el resultado de leer numerosos documentos y observar tutoriales que no contienen un proceso muy explícito, sin embargo, es una forma efectiva que ayuda a cumplir con el objetivo del proyecto.

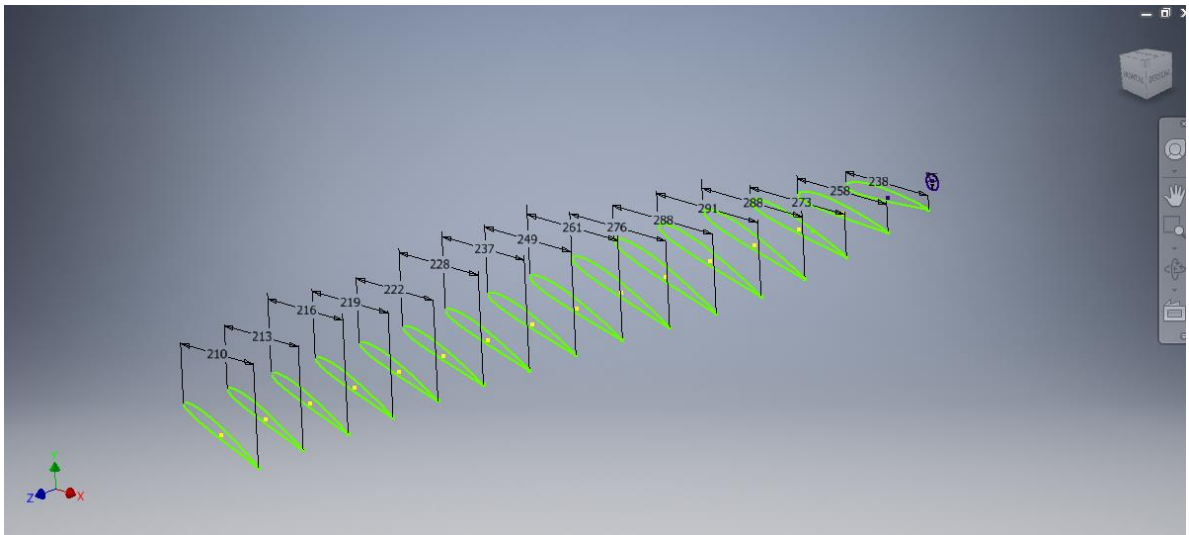
Los valores de las medidas de cada perfil y los grados de inclinación que se aplicaron en cada plano se ven reflejados en la siguiente tabla.

Tabla 3. Datos de los perfiles en los planos.

N° Plano	Medida de la cuerda (mm)	Grado de inclinación respecto a la horizontal
1	471	0
2	590	4
3	690	11
4	780	15
5	790	16
6	780	17
7	740	17
8	690	16
9	650	16
10	610	17
11	580	17
12	560	18
13	550	19
14	540	20
15	530	21
16	520	22

Fuente: Propia.

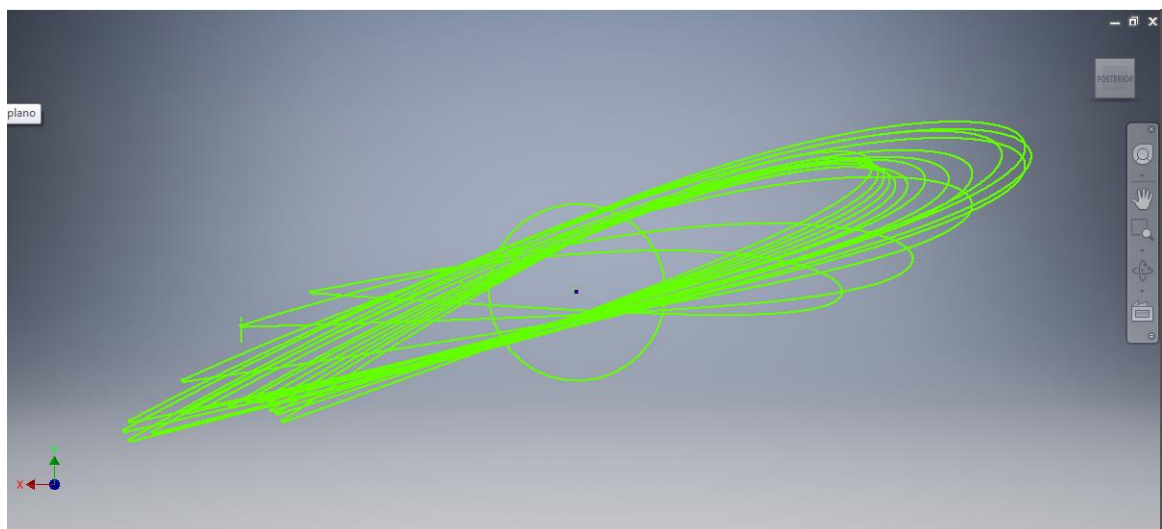
Figura 50. Pala del aerogenerador formada por los perfiles en distintos planos paralelos.



Fuente: Propia.

Después se crea una circunferencia de diámetro 100mm en el plano de origen para darle forma a la raíz de la hélice, siendo el eje que va acoplado al buje del aerogenerador.

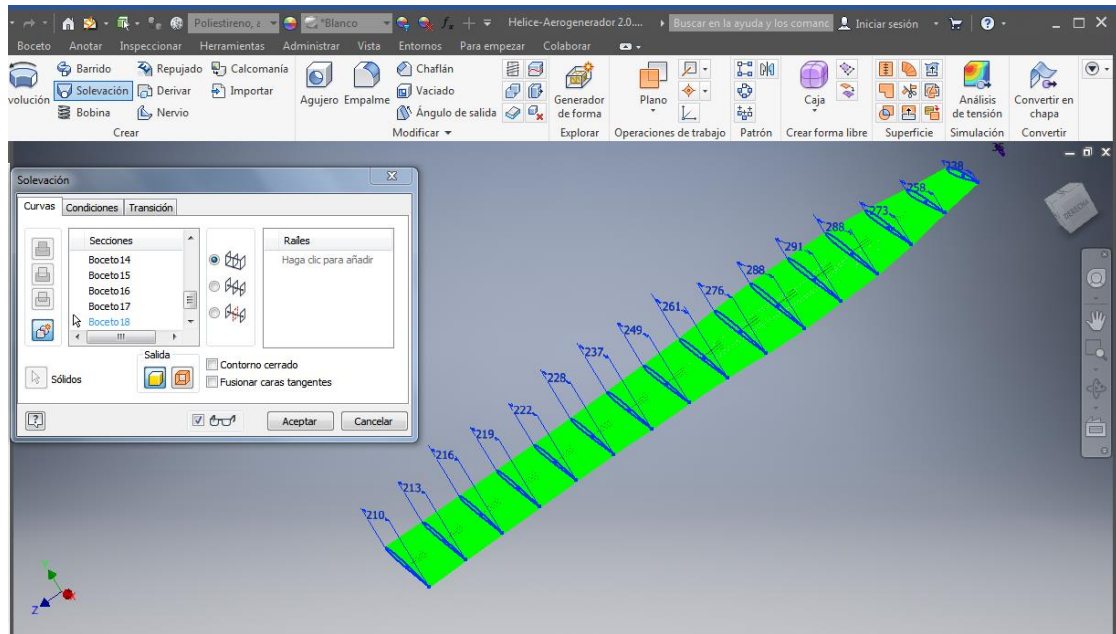
Figura 51. Eje de la pala del aerogenerador.



Fuente: Propia.

Teniendo ubicados todos los planos con sus respectivos bocetos de los perfiles Naca 4412 a las distancias y condiciones de diseño establecidos, se recurre al comando Solevación del programa Inventor que logra crear una forma de transición entre dos o más bocetos, es de esta manera como se logra dar la forma característica que tienen las hélices de las turbinas.

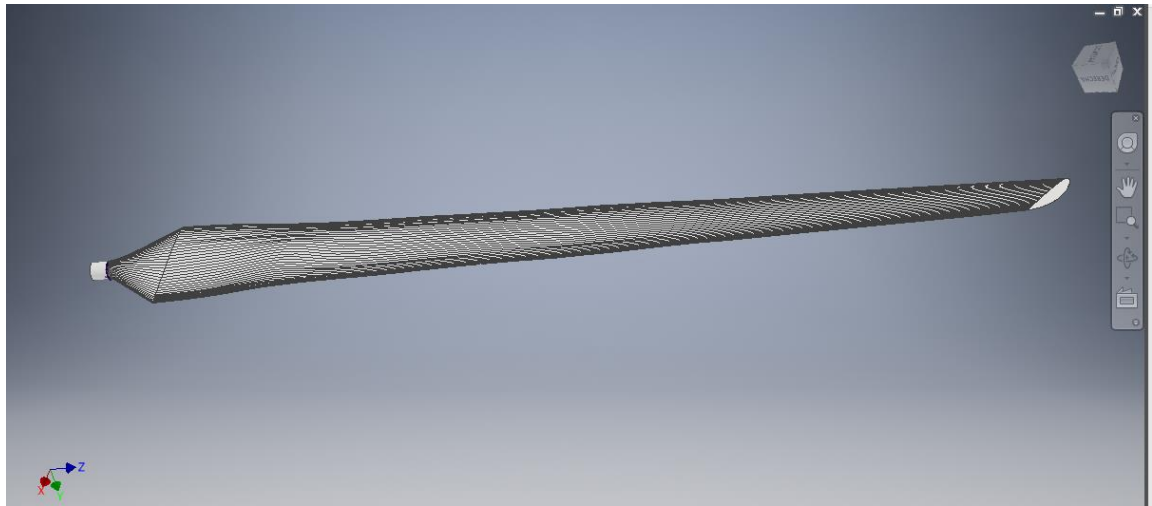
Figura 52. Solevación de los bocetos.



Fuente: Propia.

Cabe aclarar que las medidas del alabe están a una escala real para un análisis real al momento de su simulación en el programa ANSYS, la figura mostrada se encuentra en un ángulo de visión favorable para poder observar mejor el alabe, ya que si se ubica de una forma horizontal no se alcanzaría a notar la forma ni los detalles de la pala debido a que su longitud es extensa.

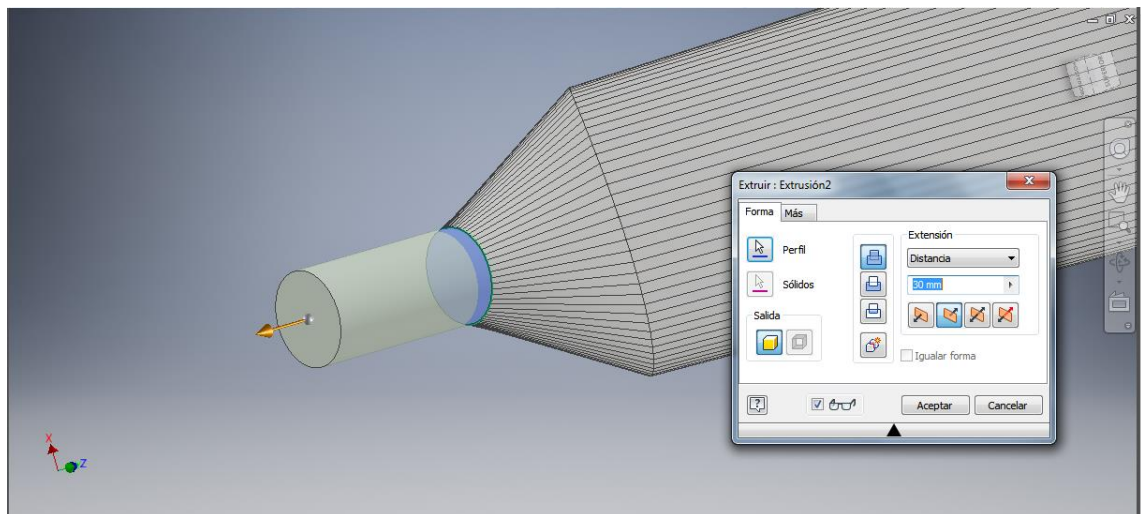
Figura 53. Pala del aerogenerador creada a partir del comando S elevación Inventor.



Fuente: Propia.

La parte que faltaría construir sería la raíz del alabe, con la ayuda de la circunferencia hecha anteriormente como boceto se extruye unos 100mm para darle forma al eje que conecta al buje, cuya función es transmitir el movimiento al eje del aerogenerador.

Figura 54. Extrusión de la raíz de la pala.

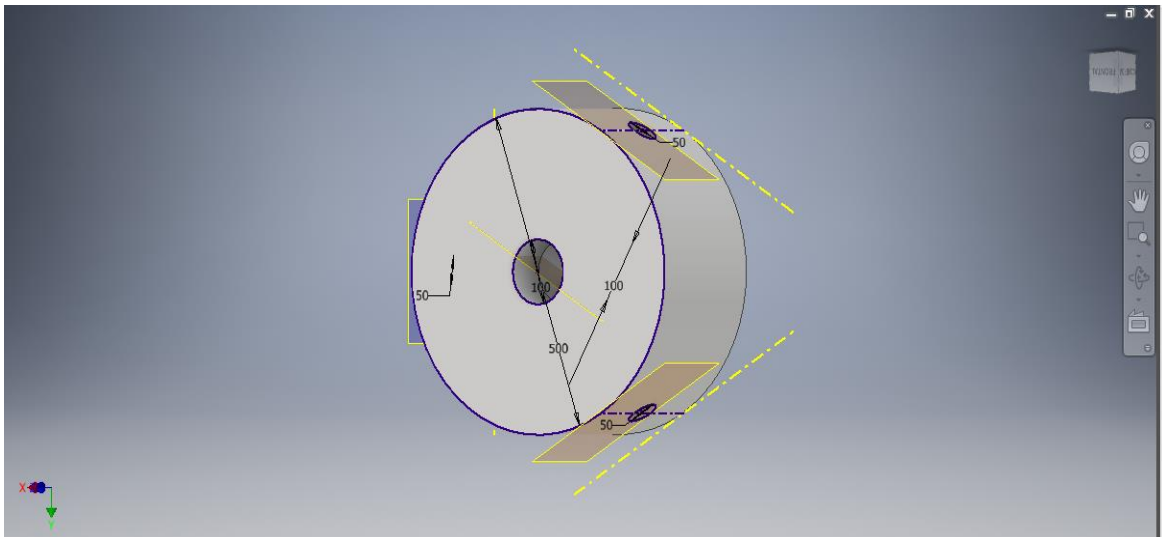


Fuente: Propia.

10.2. DISEÑO DEL BUJE.

El siguiente paso es crear una nueva pieza para el Buje del aerogenerador, cuya función es unir las palas como eje principal que también transfiere la energía del viento al interior de la góndola. Se realiza una circunferencia en un nuevo plano con un diámetro de 500mm, se extruye a 250mm para volverlo un sólido, después, se crean dos circunferencias de 100mm en las dos partes planas del Buje para hacer dos agujeros de 80mm de profundidad, donde van acoplados la góndola y la nariz del aerogenerador. Para crear los agujeros que van acopladas las hélices, se deben crear tres planos paralelos al eje principal inclinados a 120° , 240° y 360° , de esta manera se divide el buje en tres partes iguales y así poder crear los agujeros para las hélices.

Figura 55. Buje del aerogenerador.

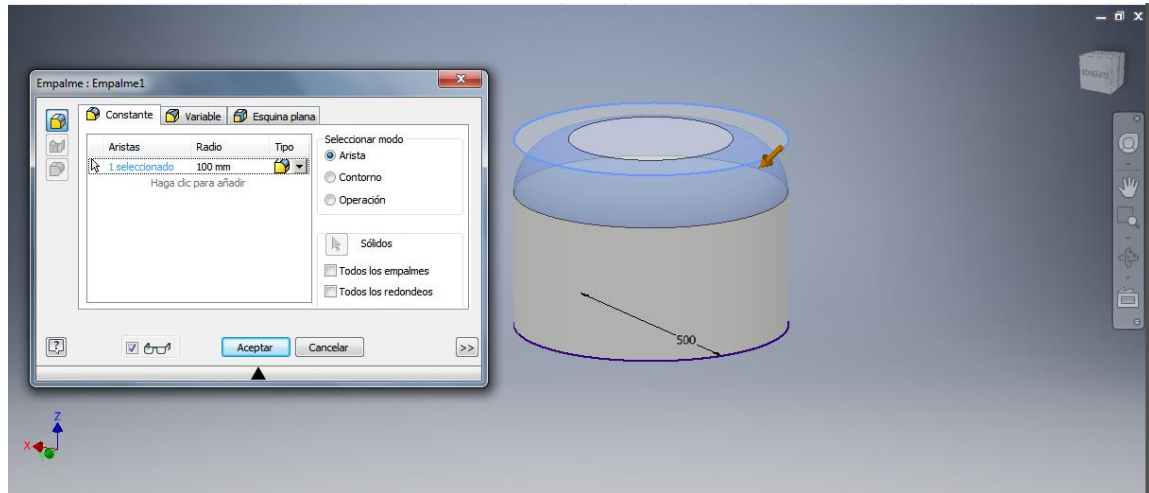


Fuente: Propia.

La torre y la góndola de la turbina se creó en una misma pieza para simplificar el ensamble, se comenzó con una circunferencia como base de la torre de 500mm y extruirlo a una altura de 350mm, luego se aplica el comando de empalme para darle estética a la pieza.

10.3. DISEÑO DE LA TORRE Y DE LA GONDOLA.

Figura 56. Base de la torre.



Fuente: Propia.

Para la torre se aplicó el comando de elevación, haciendo una circunferencia de 300mm en la parte superior de la base (plano 1) y una circunferencia de 200mm en un plano ubicado a 8200mm del plano 1; Teniendo la torre, se prosigue a realizar la góndola extruyendo un rectángulo de longitud 900mm, de alto y ancho 500mm, aplicando empalme en cada uno de sus bordes, también es necesario agregarle un eje de acople a la góndola para unirlo con el buje.

Figura 57. Torre – Góndola.

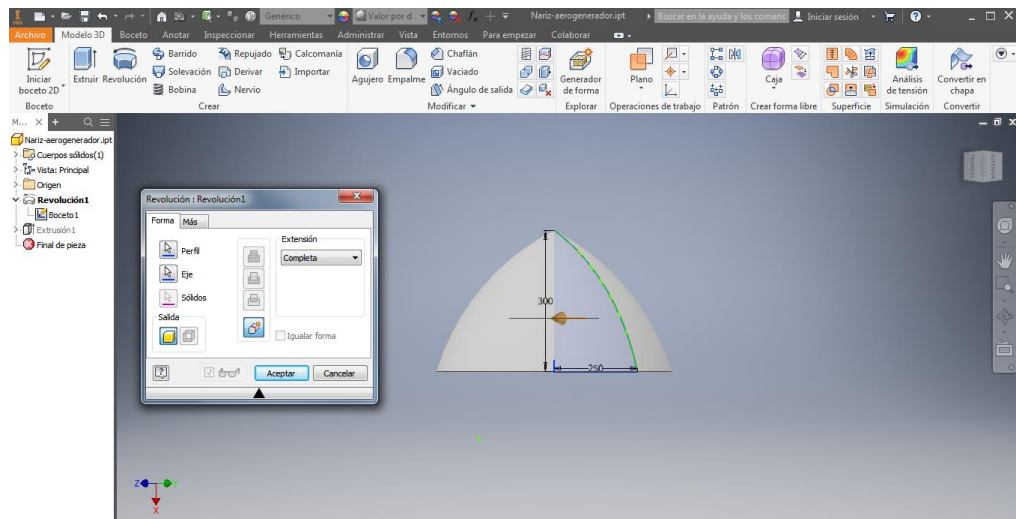


Fuente: Propia.

10.4. DISEÑO DE LA NARIZ.

Para el diseño de la nariz se dibuja una línea horizontal de 300mm, una línea a 90° de la horizontal formando una L, después seleccionamos el comando “arco” para unir las dos puntas y formar la curvatura de la nariz, de esta manera proseguimos a aplicar el comando “Revolución” y seleccionamos el boceto para crear el sólido.

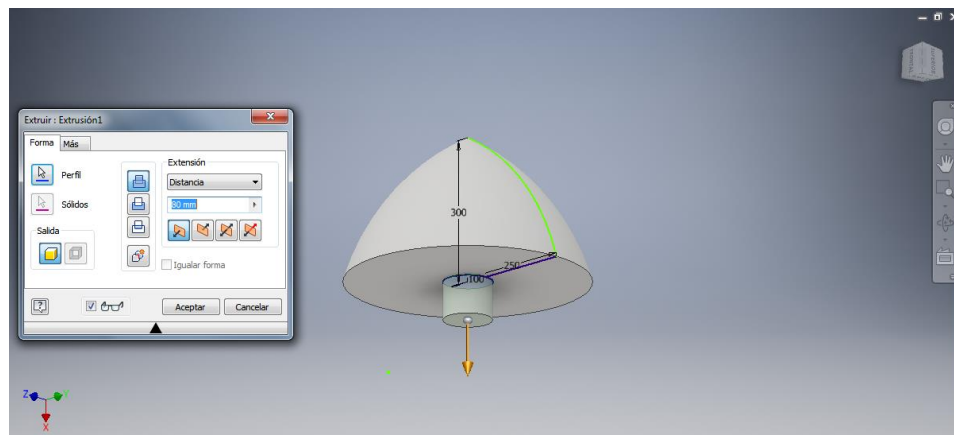
Figura 58. Comando Revolución - Nariz del aerogenerador.



Fuente: Propia.

En la parte plana de la nariz se extruye 80mm de una circunferencia de diámetro 100mm para acoplarlo al buje.

Figura 59. Nariz del aerogenerador.



Fuente: Propia.

10.5. ENSAMBLE DEL AEROGENERADOR.

Teniendo las partes del aerogenerador más relevantes ya diseñadas en el software Inventor como lo son las tres hélices, el buje, la nariz, la góndola, y la torre, el siguiente paso es unir las partes en el formato “Ensamble” para importar el aerogenerador a programa ANSYS y realizar su respectiva simulación.

Figura 60. Ensamble de las piezas.



Fuente: Propia.

11. SIMULACIÓN ANSYS CFD.

11.1. INTRODUCCIÓN A LA SIMULACIÓN FLUODINÁMICA.

La dinámica de fluidos computacional es la ciencia que se encarga del estudio del comportamiento de flujos, transferencia de masa y calor, reacciones químicas y fenómenos relacionados, a través de métodos numéricos. Lo que nos da a entender que, ANSYS es una poderosa herramienta creada para proporcionar información importante acerca de algún proyecto de ingeniería relacionado con fluidos, sin tener la necesidad de realizar pruebas empíricas, en vez de eso, la dinámica de fluidos computacional simula proyectos bajo condiciones específicas.

El programa CFD hace uso de la aproximación de variables continuas empleando un número finito de puntos, es decir que, resuelve complejas ecuaciones integrales, a este proceso se le llama discretización, lo que permite imponer un alto número de iteraciones y un valor pequeño de error, indicando que los resultados que se obtienen son precisos y confiables.

11.1.1. Pasos para realizar una simulación CFD.

La CFD cuenta con una serie de pasos o etapas que se deben cumplir para realizar una buena simulación.

- Preparación del objeto o pieza a simular.

Se debe crear una malla que cubra toda la pieza, el tipo de mallado que tendrá según la pieza, las condiciones de contorno y la identificación de variables que se quieren obtener. Se debe tener en cuenta que es el paso más importante ya que los resultados dependerán de la buena definición del procedimiento en este paso, también es importante tener un ordenador con alta capacidad.

- Solución de ecuaciones.

Aquí se lleva a cabo la simulación CFD y las iteraciones de las ecuaciones para determinar las soluciones, en donde nosotros no intervenimos tanto, simplemente seleccionamos el comando de resolver y el programa hace el resto.

- Análisis de resultados

Es en este apartado donde las variables del problema que decidimos identificar para ser resueltas mediante la solución de ecuaciones comienzan a tomar valores para los distintos puntos que se han impuesto en el mallado de la pieza, variables como la densidad, la velocidad de flujo, viscosidad, presión, etc. Es muy importante tener una buena interpretación de datos que el programa suministra, como lo son datos entregados en gráficos de colores o escalas.

11.1.2. Aplicaciones de CFD en la industria.

Es una aplicación muy útil e innovadora, que no solo permite conocer las consecuencias de algún proyecto en específico a largo plazo, sino que también, es capaz de ahorrar tiempo y dinero en cantidades sorprendentes debido a que evita la construcción de lo que se quiere probar en el campo real. La dinámica computacional de fluidos se puede aplicar en los siguientes campos:

- Combustión
- Motores
- Transferencia de calor – sistemas de enfriamiento o calentamiento
- Aerodinámica – Aviones, automóviles, aerogeneradores
- Ingeniería de procesos – mezclas y reacciones químicas
- Riesgos de fuego y explosiones
- Cargas de viento – fuerzas y respuestas dinámicas de estructuras
- Hidrodinámica de embarcaciones
- Turbomáquinas – bombas y turbinas
- Ingeniería medioambiental – transporte de efluentes líquidos y gaseosos
- Hidráulica – redes de tubería, depósitos, canales, presas, etc.
- Meteorología- predicción numérica del tiempo
- Electrónica – refrigeración de circuitos
- Ingeniería costera – cargas en estructuras costeras
- Oceanografía – corrientes oceánicas y maremotos
- Ingeniería biomédica – flujo de sangre en el corazón, arterias y venas

11.2. DISCRETIZACIÓN ESPACIAL.

Los procedimientos de discretización espacial más relevantes se agrupan en 3 categorías: recursos finitos, volúmenes finitos y diferencias finitas.

Para los procedimientos mencionados se necesita recordar que se debería hacer una discretización espacial previa, para después pasar a la discretización de las ecuaciones que componen el fluido.

11.2.1. Mallados estructurados.

Para este tipo de mallados, los puntos que conforman la malla están identificados en coordenadas cartesianas i, j y k , es decir, la forma característica de la malla son cuadriláteros en 2D y hexaedros en 3D.

La principal ventaja que tiene este tipo de mallado, es la organización de los elementos en la memoria, por el hecho de estar tan ordenado, es muy sencillo y rápido acceder a los datos

11.2.2. Mallados no estructurados.

La manera característica que tiene el mallado no estructurado son cuadriláteros y triángulos en 2D, tetraedros y hexaedros en 3D.

La primordial virtud que tiene esta clase de mallado es que son capaces de adaptarse mucho mejor a las geometrías complicadas, además la era que es necesario para generar un mallado no estructurado en un diseño, es mucho menor que generar un mallado estructurado.

11.3. DISCRETIZACIÓN DE LAS ECUACIONES

11.3.1. Método de las diferencias finitas

Fue el método de diferencias finitas el primero en obtener soluciones numéricas de ecuaciones diferenciales, la principal ventaja es la simplicidad teórica y la capacidad de aumentar la precisión del método, con solo aumentar el orden de aproximación de las derivadas. El campo en que se puede aplicar este método es reducido a ciertos problemas debido a que se requiere una malla estructurada, aplicándose a estructuras sencillas.

Otro inconveniente que presenta, es que no funciona con coordenadas curvilíneas y habría que llevar las ecuaciones de Navier Stokes a coordenadas cartesianas para así resolver el problema, por esto es recomendable utilizar este método de diferencias finitas para simulación de turbulencia.

11.3.2. Método de volúmenes finitos.

La primordial virtud de este procedimiento es que la discretización espacial se hace de manera directa en la parte específica del problema, por esta razón, no hay ningún problema con cambiar sistemas de coordenadas, como pasa en el procedimiento de diferencias finitas, o sea, que el procedimiento de volúmenes finitos es muchísimo más flexible, pues podría ser usado en mallas estructuradas y no estructuradas, siendo el procedimiento más usado para solucionar flujos con geometrías complicadas.

Es fundamental resaltar que el procedimiento de volúmenes finitos equivale al procedimiento de las diferencias finitas bajo determinadas condiciones, dejando claro que este procedimiento es el que más se usa y el más reconocido.

11.3.3. Método de elementos finitos.

Se basa en usar la fragmentación del dominio en secciones triangulares para 2 magnitudes y tetraédricos para 3 magnitudes, proporcionando la utilización de una malla no organizada; como ya se dijo antes en los demás procedimientos, la exactitud de los resultados dependerá de la interacción que tenga el componente u objeto con la finura del mallado.

El método de elementos finitos tiene un sustento matemático muy estable, especialmente en problemas elípticos y parabólicos, también, es muy utilizado para los mallados estructurados. Cabe resaltar que el método de elementos finitos es muy similar al de volúmenes finitos y suelen haber ocasiones en que estos dos se combinan para mallas estructuradas en condiciones de contorno y discretización de flujos viscosos.

11.4. DISCRETIZACIÓN TEMPORAL.

Los métodos de resolución propuestos por las ecuaciones de Euler y Navier Stokes se basan en representaciones independientes para espacio y tiempo, los cuales son también llamados *métodos de las líneas*. Con base a estos métodos se puede adquirir la gran facilidad de poder seleccionar diferentes niveles de aproximación para flujos viscosos y convectivos, como lo es la integración temporal.

Cuando se aplica el método de las líneas al método de volúmenes finitos con las ecuaciones que rigen el problema, para el volumen de control del elemento, se debe escribir un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias ajustadas en el tiempo, interpretadas por la siguiente expresión:

$$\frac{d(\Omega \vec{M} \vec{W})}{dt} = -\vec{R}(\vec{W}) \quad (\text{Ec. 33})$$

En donde el volumen de control es representado por el símbolo Ω y la discretización espacial por \vec{R} que incluye el término de fuentes, mejor conocido como residuo. Si es necesario hacer la discretización espacial con las cambiantes ubicadas en los vértices, \vec{W} representaría un costo medio en el volumen de control, en los valores de los puntos de vista asociados a los nodos interiores. Sin embargo, si las cambiantes permanecen centradas en el componente, la matriz de masas podría

ser reemplazada por una matriz identidad sin necesidad de influir la exactitud temporal del esquema. Se supone un mallado estático, se toma un volumen de control y la matriz de masas se extrae de la derivada. Por lo tanto, se puede aproximar la derivada temporal por la siguiente ecuación no lineal:

$$\frac{\Omega \vec{M}}{\Delta t} \Delta \vec{W}^n = \frac{\beta}{1 + \omega} \vec{R}^{n+1} - \frac{1 - \beta}{1 + \omega} \vec{R}^n + \frac{\Omega \vec{M} \vec{W}}{(1 + \omega) \Delta t} \Delta \vec{W}^{n-1}$$

(Ec.34)

Donde el incremento de las variables es:

$$\Delta \vec{W}^n = \vec{W}^{n+1} - \vec{W}^n$$

(Ec.35)

Los superíndices n y n+1 representan el paso del tiempo, además, Δt expresa el aumento de tiempo. Si la condición siguiente se cumple, la ecuación de integración debe ser de segundo orden en el tiempo:

$$\beta = \omega + \frac{1}{2}$$

(Ec.36)

En caso que esta condición no se cumpla, a primer orden es reducida la precisión temporal. Se pueden obtener ecuaciones explícitas ($\beta=0$) o implícitos en el tiempo dependiendo de los valores que tomen ω y β .

En funcionalidad con los esquemas explícitos, además hay los esquemas de diversos pasos (métodos de Runge – Kutta) donde la solución se da en funcionalidad de diversos pasos de tiempo, por tal fundamento, hablamos de una aproximación de segundo o más grande orden, dependiendo del número de coeficientes que sea primordial usar y de esta forma obtener la predominación de todos los pasos de tiempo en la solución final.

Este procedimiento de los diversos pasos es bastante exitoso, debido a que se puede utilizar en cualquier esquema de discretización, ocupan poco espacio en la memoria y no poseen un coste desmesurado.

Sin embargo, la virtud primordial que tienen los procedimientos implícitos es que tienen la posibilidad de usar pasos de tiempo muchísimo más prolongados, sin que perjudique el equilibrio del proceso de incorporación.

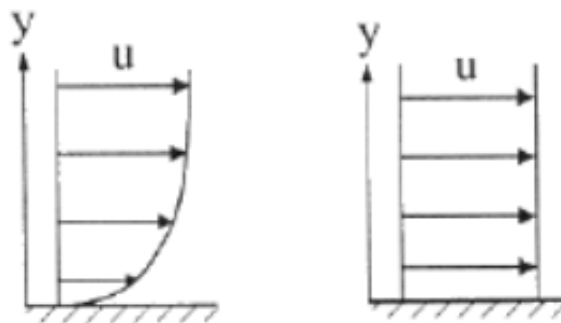
11.5. CONDICIONES DE CONTORNO.

Siempre se debe contar con unas condiciones de contorno para resolver las ecuaciones de gobierno, estas condiciones establecen las variables fluidas cuando el tiempo es igual a cero ($t=0$), cabe resaltar que entre más cerca este la condición de contorno a la solución final del problema, menor será el tiempo empleado para resolver las ecuaciones.

En el campo de la aerodinámica se consideran como condiciones de contorno las variables velocidad de flujo, presión, temperatura y densidad. Por lo tanto, las condiciones de contorno o iniciales se clasifican en:

- Condiciones de contorno de flujo libre: son condiciones en el infinito, como su nombre lo indica, son libres y no requiere de la intervención de superficies que limiten su flujo, pueden ser de entrada, de salida o de entrada y salida.
- Condiciones de contorno de pared: son lo contrario a las de flujo libre, se modelan en las proximidades de superficies. Hay dos maneras de imponer esta condición, la del no *deslizamiento* (velocidad nula en el punto de contacto), y la de *tangencia* (velocidad normal a la superficie igual a cero).

Figura 61. Condición de contorno de no deslizamiento (izquierda) y de tangencia (derecha)



Fuente: J. F. R. Buenestado, Análisis y diseño de un aerogenerador mediante simulación 3d de dinamica de fluidos computacional, Madrid : Universidad Carlos III de Madrid, 2017.

11.6. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL CFD.

Es importante entender las ventajas y desventajas de este programa para saber cómo y qué tipo de problemas podemos aplicar a la simulación CFD y los resultados que se pueden esperar. Las ventajas son las siguientes:

- La dinámica de fluidos computacional presenta con gran precisión los datos de un fluido que gobierne un problema en específico.
- Gracias a la precisión que maneja la simulación CFD, permite ahorrar en factores como tiempo, dinero, prototipos y simulaciones reales.
- Otra gran ventaja es la visualización de la animación del proceso que presenta el programa según las variables del fluido.

Como todo en la vida nada es perfecto, el programa tampoco lo es. Algunas de las desventajas son:

- La persona que disponga de esta maravillosa herramienta debe presentar ciertos conocimientos y un curso o formación precisa relacionado con el manejo de este tipo de software.
- Se debe realizar una gran inversión en cuanto el tipo de computador a utilizar, debido a que es una herramienta potente que consume recursos de software y hardware.
- En algunas simulaciones es posible que el coste de cálculo computacional sea elevado.

11.7. ANSYS.

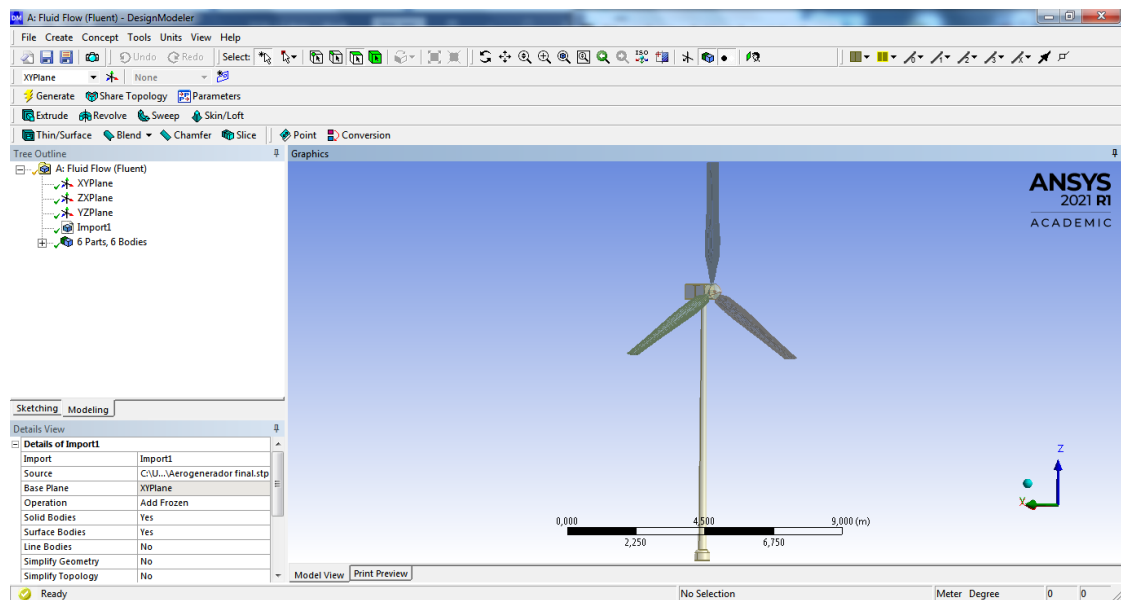
La herramienta *Ansys* es utilizada para realizar la simulación CFD contiene características de modelado físico para modelar flujos, transferencias de calor, turbulencias y reacciones relacionadas con aplicaciones industriales como el flujo de aire sobre una aeronave y sus alas, columnas de burbujas en la combustión de un horno, flujos de sangre, fabricación de semiconductores. Para mejorar su alcance o su campo de aplicación, se han utilizado modelos únicos que le dan al programa la capacidad de modelar sistemas de combustión interna dentro de cilindros, turbo maquina, modelos acústicos y modelos multifase.

Ansys presenta una interfaz principal llamada *Workbench* en donde se presentan todos los módulos, los cuales son las herramientas que el software utiliza para la resolución de problemas. Existen tres secciones que representan dichos módulos, el módulo de preprocesador o creación de la geometría y mallado, el procesador y postprocesador. Para el problema presente usaremos la opción de *Fluent*, herramienta utilizada para la simulación de fluidos.

11.8. DESIGN MODELER.

Dentro de la herramienta *Fluent* está el módulo preprocesador, es decir el *design modeler* en donde se trata la geometría importada anteriormente del software *Inventor*, en este módulo se realiza una preparación de la geometría antes de comenzar la simulación. Existen partes del aerogenerador que no son necesarias simular debido a que no son funcionales en la geometría a simular, por esto es importante dicha preparación, lo primero que se debe hacer es la importación del ensamble en formato *.stp* para que el software *Ansys* sea capaz de reconocerlo y leerlo.

Figura 62. Importación de la geometría desde el software *Inventor* al software CAE.



Fuente: Propia.

Después de haber importado la geometría, se debe verificar que no exista ningún tipo de problema, como por ejemplo que la geometría presente alguna pieza sin ser un sólido cerrado, ya estando seguros de la correcta importación se procede a la respectiva preparación de la geometría.

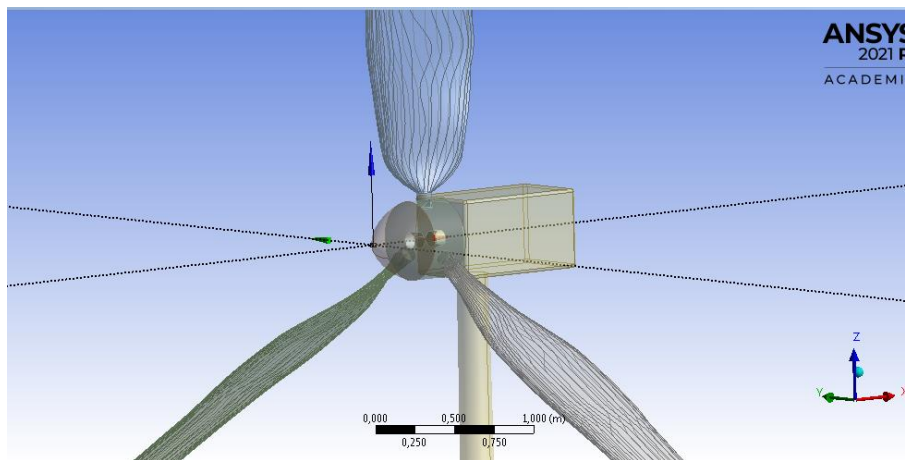
Como primera operación se debe realizar una translación del eje de coordenadas a la nariz del aerogenerador debido a que el movimiento del aire se va a simular alrededor de ese punto. Por lo tanto, se ubica el comando *Create*, se selecciona *Body transformation*, de ahí se desglosan varias operaciones como *move*, *translate*, *rotate*, *mirror* y *scale*, se escoge la operación *translate* y se le indican los siguientes valores para su respectiva ubicación.

Figura 63. Coordenadas del comando translación.

Details View	
Details of Translate1	
Translate	Translate1
Preserve Bodies?	No
Bodies	6
Direction Definition	Coordinates
<input type="checkbox"/> FD3, X Offset	-1,34 m
<input type="checkbox"/> FD4, Y Offset	-1,299 m
<input type="checkbox"/> FD5, Z Offset	-3,408 m

Fuente: Propia.

Figura 64. Resultado de la operación translación.



Fuente: Propia.

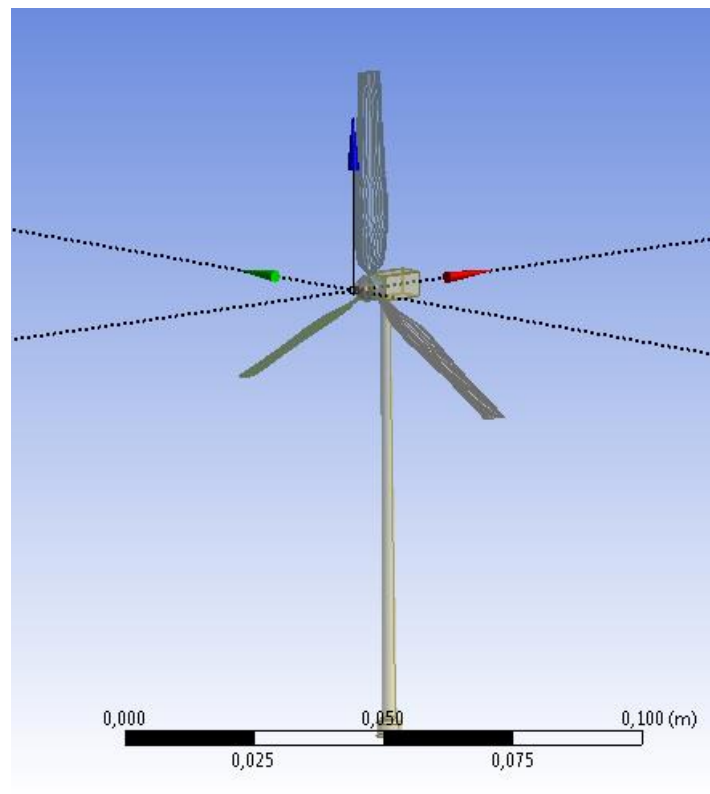
El siguiente paso es realizar un escalado de la geometría debido al gran tamaño que posee para que la simulación no tarde mucho en resolver y el ordenador tenga la capacidad necesaria para llevarla a cabo. Por consiguiente, se selecciona la opción *Scale* y se le da un valor de 0,1 es decir, 1:10.

Figura 65. Operación escalada.

Details View	
Details of Scale1	
Scale	Scale1
Preserve Bodies?	No
Scaling Origin	World Origin
Bodies	6
Scaling Type	Uniform
<input type="checkbox"/> FDI, Global Scaling Factor (>0)	0,1

Fuente: Propia.

Figura 66. Resultado de la operación escalado.



Fuente: Propia.

A continuación, nos dirigimos al comando *rotate* que sirve para rotar los ejes y así poder ubicar la nariz del aerogenerador en la dirección del eje z, esta operación no influye en nada la simulación, se realiza por el criterio de ejes y se modifican los siguientes datos:

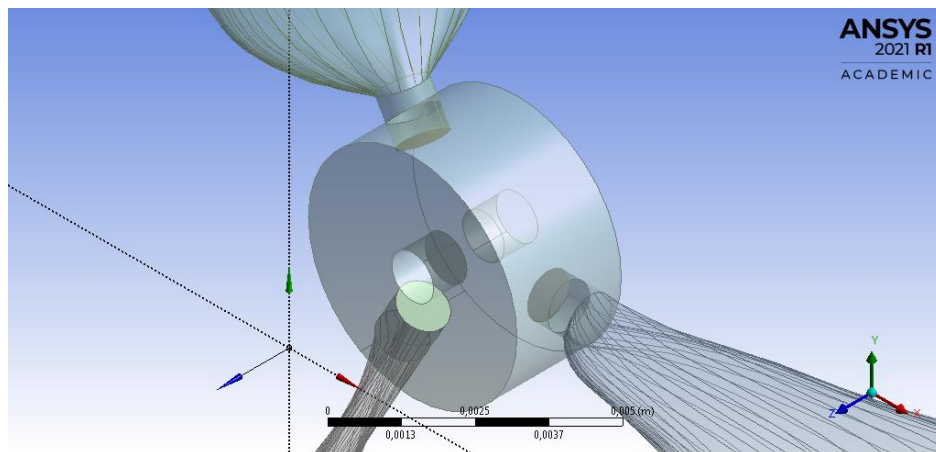
Figura 67. Detalles de la función rotación.

Details of Rotate1	
Rotate	Rotate1
Preserve Bodies?	No
Bodies	6
Axis Definition	Components
<input type="checkbox"/> FD6, X Component	0
<input type="checkbox"/> FD7, Y Component	1
<input type="checkbox"/> FD8, Z Component	0
<input type="checkbox"/> FD10, X Coordinate	0 m
<input type="checkbox"/> FD11, Y Coordinate	0 m
<input type="checkbox"/> FD12, Z Coordinate	0 m
<input type="checkbox"/> FD9, Angle	-270 °

Fuente: Propia.

Para las superficies internas de las palas que se encuentran en contacto con el buje, se aplica la operación *Surfaces from edges* que sirve para crear superficies a partir de aristas y así luego seleccionar áreas de contacto en un paso que debe realizarse antes de comenzar la simulación.

Figura 68. Superficies creadas en la raíz de cada pala.



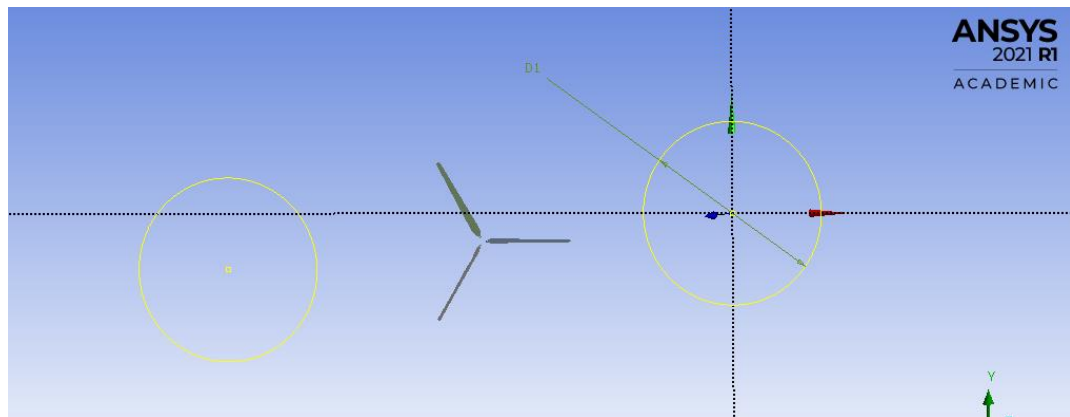
Fuente: Propia.

El siguiente paso es crear un volumen de control que le indique al software por donde va a transitar el aire o donde nos interesa que transite, es posible crear este volumen de control directamente en *desing modeler* de una manera sencilla, debido

a que el flujo ira direccionado a barlovento o sotavento, aplicándose directamente en las palas del aerogenerador.

Lo que se debe hacer para crear el volumen de control, es crear dos planos paralelos al plano en que giran las palas del aerogenerador. Para que no existan turbulencias y el flujo del aire pueda desarrollarse dichos planos deben estar separados a una distancia razonable, es decir, a 0,5m de las palas.

Figura 69. Circunferencias creadas en planos equidistantes.



Fuente: Propia.

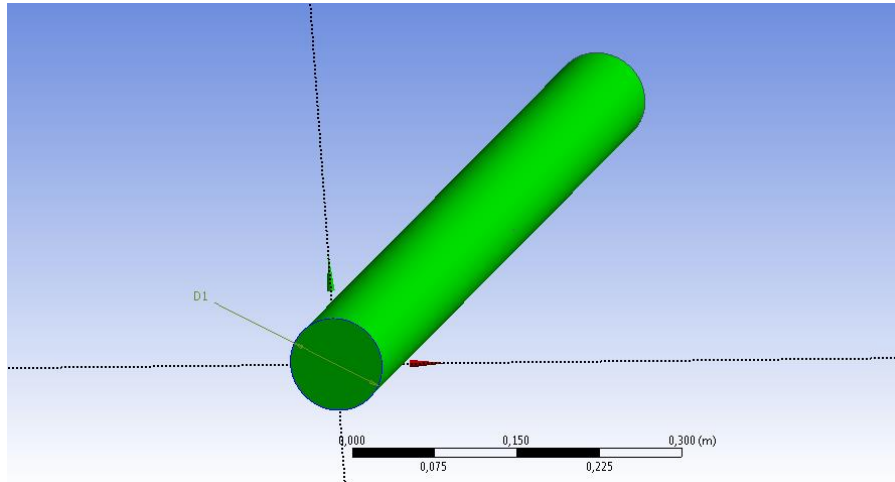
En los planos creados se prosigue a utilizar la función *sketch* para dibujar una circunferencia en cada plano con un diámetro de 0,086m como se observa en la figura 66, recordemos que la geometría se encuentra escalada y por eso se escala la medida de las circunferencias. Luego se activa el comando *Skin*, el cual crea figuras mediante perfiles o bocetos, entonces se escogen los dos planos paralelos y de esta manera se construye el volumen de control para la simulación.

Figura 70. Detalles de la operación Skin.

[-] Details of Skin1	
Skin/Loft	Skin1
Profile Selection Method	Select All Profiles
Profiles	2 Sketches
Operation	Add Material
As Thin/Surface?	No
Merge Topology?	No
[-] Profiles	
Profile 1	Sketch1
Profile 2	Sketch2

Fuente: Propia.

Figura 71. Volumen de control.

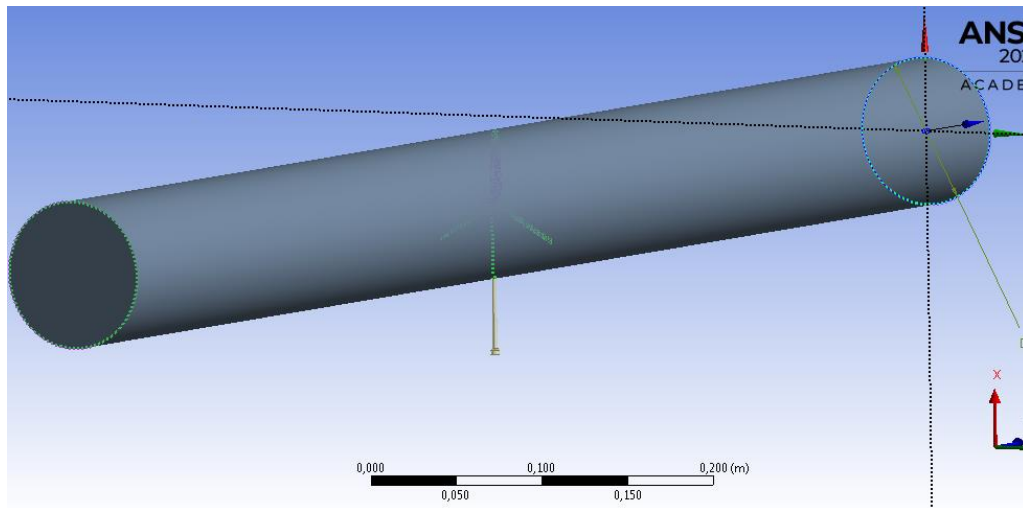


Fuente: Propia.

Para el último paso que se debe hacer en *desing modeler* es seleccionar el comando *Boolean* en donde se encuentran otras opciones, nos interesa la opción de *Subtract*. Esta función nos permite restar de un sólido el volumen de uno o más objetos, dando como resultado un objeto basado en la geometría restada, es una operación indispensable a la hora de generar la malla ya que el cilindro está atravesando las palas y se quiere que cuando se pongan a girar las palas, estas mismas no dañen el mallado.

Ya estando en la operación explicada, se selecciona el volumen de control como "target body" o elemento objetivo y se seleccionan los demás elementos del aerogenerador como "tool bodies" o elementos herramienta para que el resultado sea el siguiente:

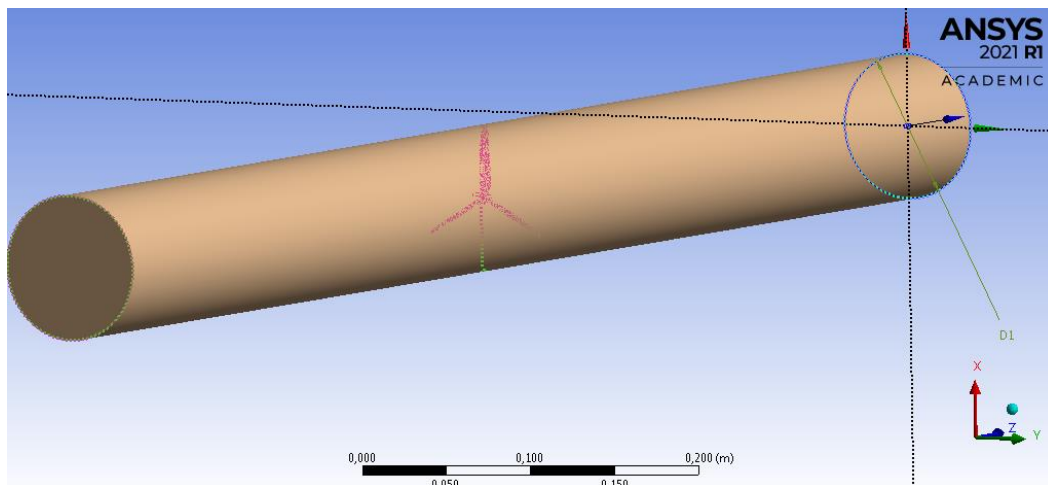
Figura 72. Resultado del primer Boolean.



Fuente: Propia.

Es necesario hacer otro booleano con la misma opción de *Subtract*, para eliminar las palas de la estructura, como el cuerpo objetivo será el cilindro y como cuerpo herramienta son las palas, pero esta vez sin conservar los cuerpos herramienta.

Figura 73. Resultado del segundo Boolean.



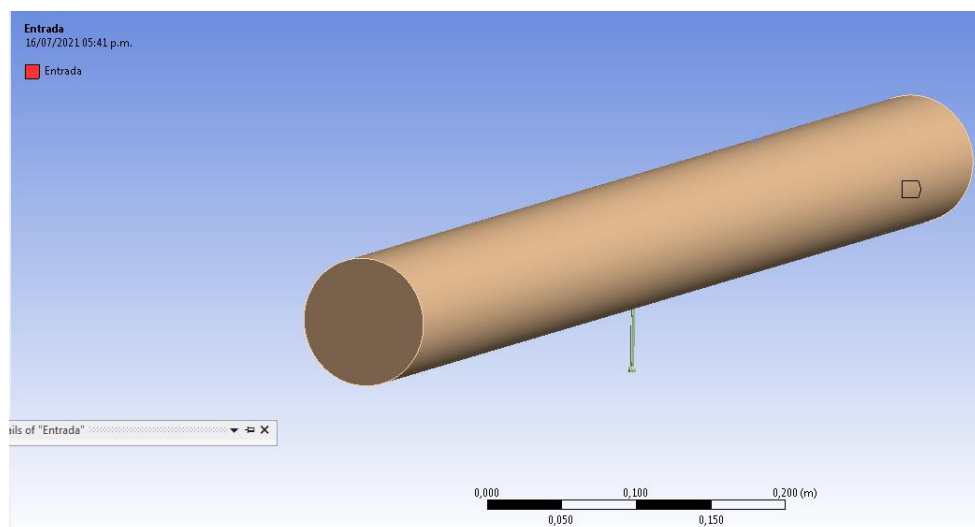
Fuente: Propia.

11.9. MALLADO DE LA GEOMETRIA.

Para este módulo, el resultado de la simulación dependerá mucho de la creación de la malla, es la parte más elemental e importante de todo el programa, es por esto que se debe conseguir un mallado de calidad para que los resultados sean los deseados.

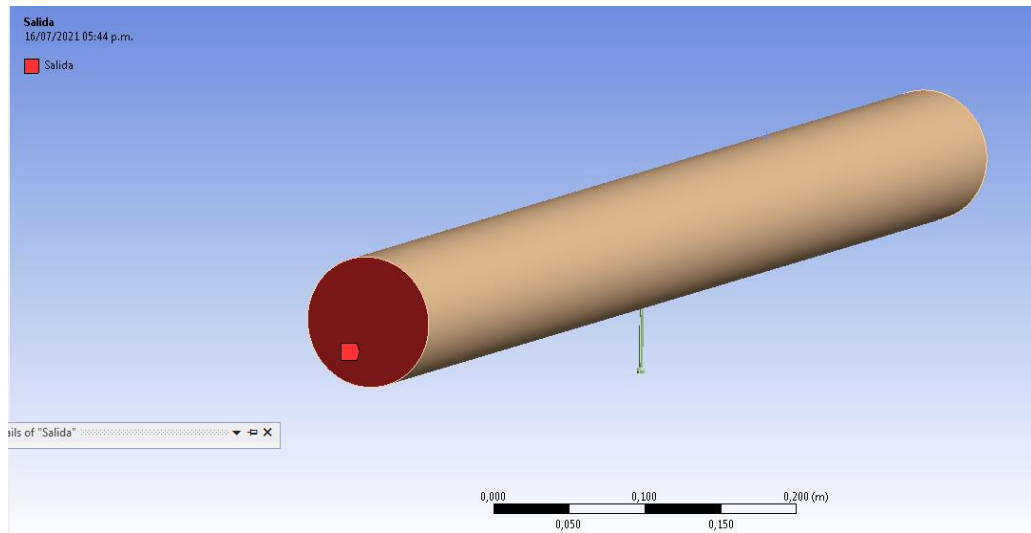
La primera parte del proceso del mallado es entrar al módulo *mesh en* donde se abrirá una nueva ventana y aparecerá la geometría modificada en el módulo anterior, es ahí donde se comienza a identificar las zonas por donde entra o sale el fluido en el volumen de control. La función se realizará con la ayuda del comando *Named selection* para nombrar las superficies seleccionadas de la siguiente manera: Para la entrada del fluido (Entrada), la salida del fluido (salida), la pared del volumen de control (Pared) y para las palas (Alabes).

Figura 74. Identificación de la superficie por donde entra el fluido.



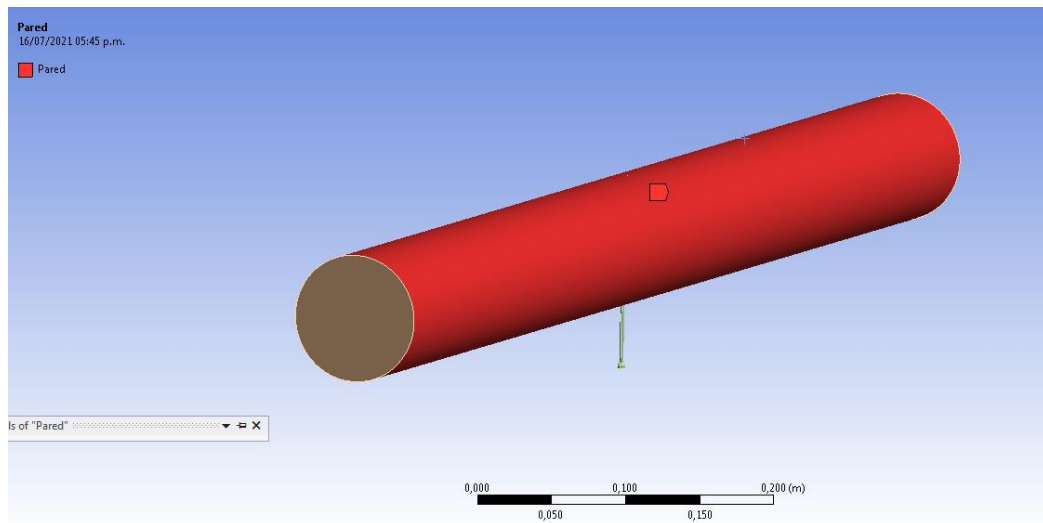
Fuente: Propia.

Figura 75. Identificación de la superficie por donde sale el fluido.



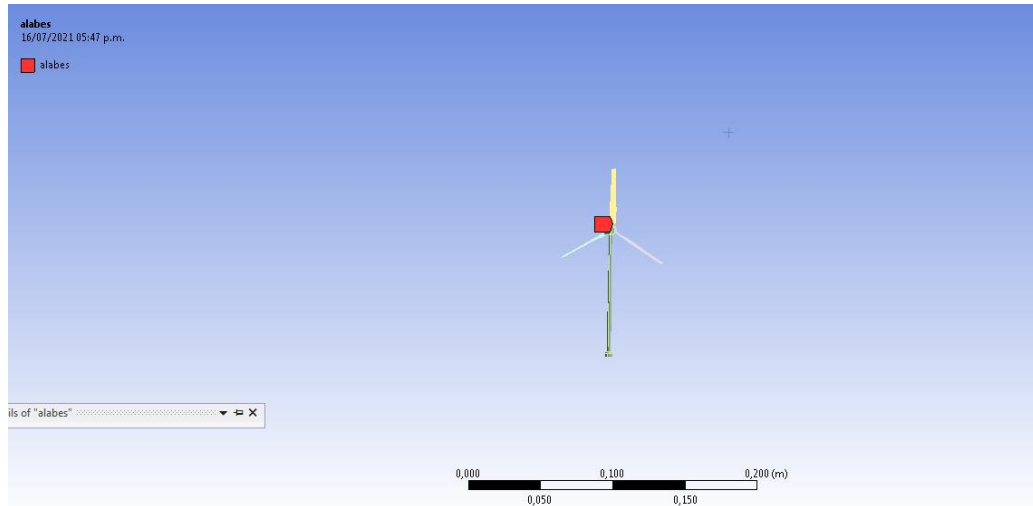
Fuente: Propia

Figura 76. Identificación de la superficie por donde fluye el fluido.



Fuente: Propia.

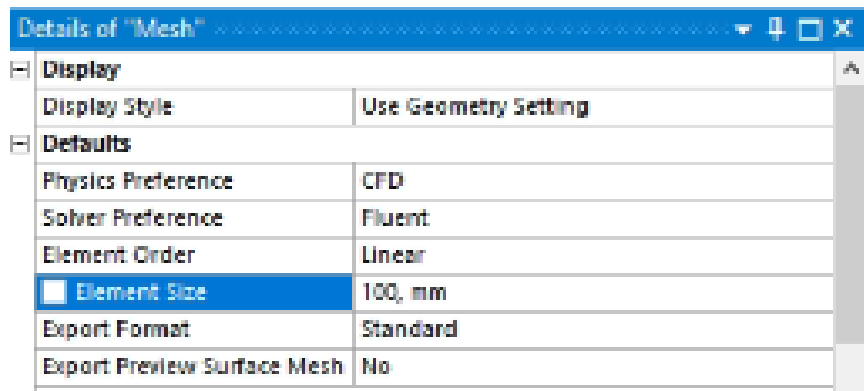
Figura 77. Identificación de las palas del aerogenerador.



Fuente: Propia.

Para esta simulación se va a crear un mallado no estructurado para que se pueda ajustar perfectamente a la forma de la geometría, así que, se debe indicarle al software las características que debe tener el mallado, como lo es el tipo de análisis CFD y la aplicación *Fluent* para resolver la simulación. Es importante tener en cuenta que el apartado de *Element Size* tiene un valor predeterminado por el software, sin embargo, en este caso se debe modificar y agregarle un valor de 100 mm debido a que el valor predeterminado era muy grande y generaba un error en el mallado.

Figura 78. Características determinantes para generar el mallado.

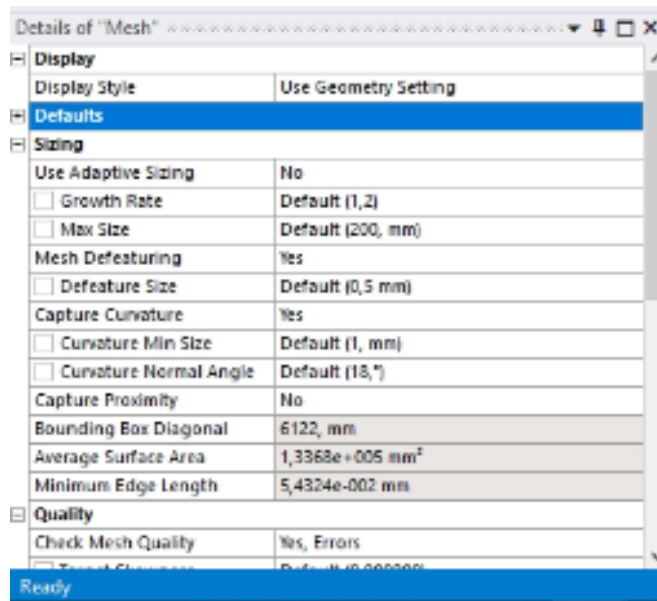


Fuente: Propia

Existen varios apartados que también se deben modificar para generar un buen mallado, el primer apartado es *Sizing*, Cuando la Preferencia de física es Mecánica no lineal o CFD, la Curvatura de captura se establece en Sí por defecto para que el programa adapte la malla al tipo de estructura que posee el aerogenerador y el volumen de control.³⁷ También, se le indica al comando *Initial Size Seed* que se aplique a todo el ensamble cuya *Transition* sea lenta y su *Span angle center* sea fina.

Estas funciones son para conseguir una malla que se adapte perfectamente a los requerimientos que el problema exige, a pesar que la malla es no estructurada y de esta manera facilitar la simulación lo más que se pueda.

Figura 79. Modificaciones en el comando Sizing para beneficio del mallado.



Fuente: Propia

Se puede crear el mallado bajo las especificaciones creadas en el apartado Sizing, sin embargo, la cantidad de elementos creados pueden no ser los suficientes y por esta razón sigue habiendo otras variables que se pueden modificar como lo son los ángulos de curvatura, el tamaño mínimo y máximo de las celdas y de las caras, la relación de crecimiento, la longitud mínima de bordes y el número de celdas para generar una malla ideal a la geometría. A partir de dichas variables, la única que se modifico fue el tamaño mínimo de elementos y evitar que el software cree un número de elementos a conveniencia.

³⁷ «Airfoil Tools,» 2021. [En línea]. Disponible en: <http://airfoiltools.com/polar/details?polar=xf-naca4412-il-50000>.

El siguiente apartado a modificar en *Details of Mesh* es el apartado *Inflation*, cuya función es modificar la capa límite del mallado definiendo una transición suavizada, con una relación de 0,272 y la relación de crecimiento es de 1,2.³⁸

11.9.1. Funciones de pared.

Los flujos turbulentos son un fenómeno omnipresente que son afectados por las regiones de paredes, donde dichas regiones afectadas por la viscosidad presentan grandes gradientes en las variables de la solución. Para tratar la región cercana a la pared en este caso, se utilizan las funciones de pared, que son ecuaciones derivadas empíricamente para unir la región interna entre la pared y la región de la turbulencia.

La ley universal de la pared establece que la distribución de velocidades muy cerca de una pared es parecida para la mayoría de flujos turbulentos. Existe un parámetro muy importante a la hora de aplicar las funciones de pared, el cual es llamado distancia de la pared adimensional (y^+).³⁹ Este parámetro es considerado indispensable para la creación de mallas en paredes donde transitan flujos turbulentos y viscosos en el software ANSYS Fluent.

Se establecen tres capas y regiones de muros que especifican el rango en que debe estar el y^+ , estas son:

- La subcapa viscosa ($y^+ < 5$), donde el fluido está dominado por la viscosidad, por consiguiente, existe un esfuerzo cortante de Reynolds insignificante.
- El área logarítmica ($y^+ > 30$), es donde la tensión turbulenta predomina sobre el flujo y la velocidad varía lentamente a medida que avanza.
- La capa de búfer o capa amortiguadora ($5 < y^+ < 30$), es la transición dominada por la viscosidad y la turbulencia en magnitudes iguales.

Para este caso, se seleccionó la región o área logarítmica ya que el flujo a simular es el viento y posee gran turbulencia, así que, se tomó un valor de 30 para el distanciamiento adimensional de pared. De esta manera, la tecnología es aprovechada para calcular el tamaño del elemento en el mallado de las palas, ingresando a una página web de que realiza cálculos para hallar este tipo de variables para una simulación CFD.

³⁸ «Airfoil Tools,» 2021. [En línea]. Disponible en: <http://airfoiltools.com/polar/details?polar=xf-naca4412-il-50000>.

³⁹ C. F. d. F. Machado, PROYECTO DE TURBINA EÓLICA DE EJE HORIZONTAL, Rio de Janeiro, 2014.

Figura 80. Estimación del tamaño del elemento para las palas del aerogenerador.

Home > Tools > Y+ Estimation

Y+ Wall Distance Estimation

Input

Freestream velocity:	<input type="text" value="7"/>	[m/s]
Density:	<input type="text" value="1.205"/>	[kg/m ³]
Dynamic viscosity:	<input type="text" value="1.82e-5"/>	[kg/ms]
Boundary layer length:	<input type="text" value="1.0"/>	[m]
Desired Y+ value:	<input type="text" value="30"/>	[]

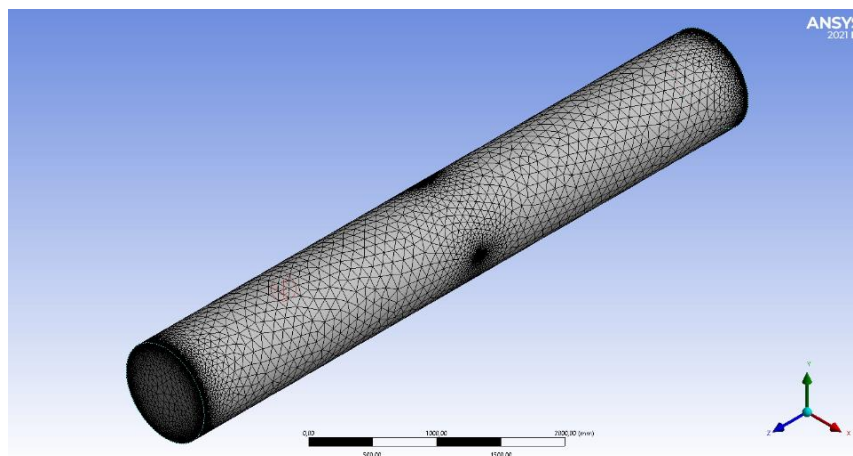
Output

Reynolds number:	<input type="text" value="4.6e+5"/>	[]
Estimated wall distance:	<input type="text" value="1.4e-3"/>	[m]

Fuente: Propia.

Respecto a lo anterior es importante crear un método de mallado para las palas del aerogenerador y así conseguir que los elementos elaborados en la zona de cada pala sean mucho más pequeños y precisos a la hora de la respectiva simulación. El método es *Face Sizing*, en este apartado se eligen las palas del aerogenerador y se selecciona un tamaño mínimo de elementos de 1,4mm (figura 83). Después de muchos intentos y modificaciones se consigue el siguiente mallado:

Figura 81. Mallado final de la estructura.



Fuente: Propia.

La calidad de la malla se puede comprobar en el módulo *Setup*, en donde el programa analiza e identifica si hay algún problema con la malla generada, sin embargo, existen tres criterios que valoran la calidad de la malla, y son los siguientes:

- Mínima calidad ortogonal, son valores que están entre 0 y 1, donde los valores que sean cercanos a 1 indican a una baja calidad.
- Máxima inclinación ortogonal, son valores que están entre 0 y 1, donde los valores que sean cercanos a 0 indican una baja calidad.
- Máxima relación de aspecto, es un criterio que no influye mucho en la calidad de la malla, sin embargo, se sugiere que el valor sea lo más cercano a cero.⁴⁰

El número de elementos creados en el mallado resultante de la geometría y la calidad son aptos para generar una buena simulación, respetando los criterios de calidad de mallado. Se presentaron varias formas de mallado debido a que este módulo es el más importante y difícil en cuanto a la discretización de elementos, es por esto que se realizaron varios intentos antes de escoger la malla ideal. Se hizo un mallado con un volumen de control de menor longitud, también se hicieron dos mallados con las mismas dimensiones y estructuras, pero diferentes variables que se pueden modificar en el apartado de *Details Mesh*.

Tabla 4. Criterio de la calidad de mallas creadas.

Mallas	N° Elementos	Criterios de calidad del mallado	
		Máxima Inclinación Ortogonal	Mínima Calidad Ortogonal
1 (desechada)	2893576	0,98932	5,3844e-003
2 (elegida)	3701963	0,99522	4,9914e-003
3 (desechada)	3149432	0,93443	5,0234e-003

Fuente: Propia

Como se puede apreciar en la tabla 4, la malla que se escogió fue la número 3, ya que su máxima calidad ortogonal se encuentra más cercano a 1, y su mínima inclinación ortogonal también cumple con los parámetros de calidad, donde su valor se aproxima más a cero.

⁴⁰ «Airfoil Tools,» 2021. [En línea]. Disponible en: <http://airfoiltools.com/polar/details?polar=xf-naca4412-il-50000>.

11.10. MODULO SETUP FLUENT.

El programa Ansys está constituido de numerosas herramientas, las cuales se usan y se eligen dependiendo del tipo de aplicación que se vaya a simular. Para analizar la geometría del aerogenerador, el software *Ansys Fluent* es una de las herramientas preferidas ya que utiliza el CFD (dinámica computacional de fluidos) reconocido, eficiente y confiable.

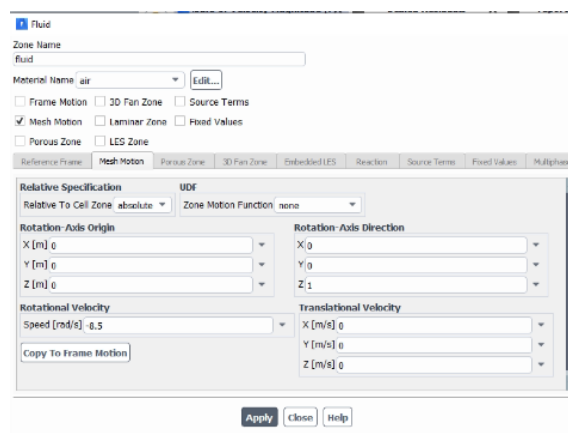
Después de finalizar el módulo del mallado y verificar que no haya ningún tipo de problema, se prosigue a abrir el módulo *Setup*, en donde se abre una ventana con diferentes opciones para modificar, en este caso se elige la opción de doble precisión para que la simulación sea más lenta y los resultados más precisos, ya habiendo modificado dicha ventana, se selecciona la opción de iniciar.

Al ingresar al módulo se puede observar que es ahí en donde son elegidas las condiciones de la simulación, siendo una de las primeras condiciones el apartado *General* se elige la opción de basado en la precisión debido a que el aire no cambia sus propiedades de una forma basta al atravesar el rotor, además que las velocidades no son tan grandes, también se la opción de *transient*.

En la parte izquierda de la pantalla, en la barra de herramientas o apartados, se encuentra la opción *Models*, en donde se encuentran varias propiedades como la viscosidad, la cual se activa y se escoge con las opciones de *k-épsilon* y *realizable*. Enseguida de *Models* está el apartado de *Materials*, es allí donde se asignan los materiales para la simulación, los cuales serán el aire para el fluido y el aluminio para el sólido.

Para el siguiente apartado de *Cell Zone Condition* se debe imponer el giro que va a tener la geometría y por esta razón se selecciona la función de *Mesh Motion* para darle un valor de giro de 8,5 rad/s según el cálculo de la velocidad angular hallada anteriormente.

Figura 82. Cell Zone Conditions.

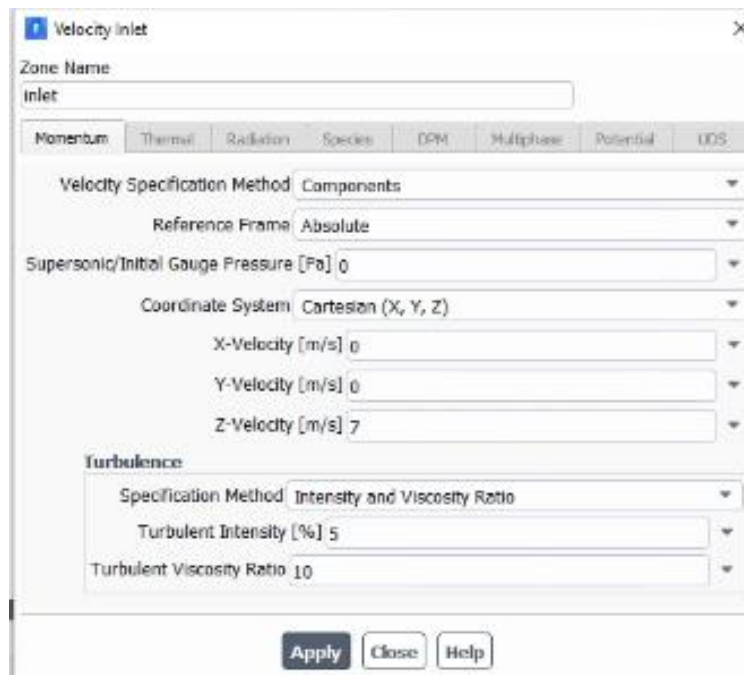


Fuente: Propia

El siguiente paso es seleccionar las condiciones de contorno que se crearon en el módulo Mesh, imponiendo la condición de velocidad a la entrada en la opción entrada (Inlet), para darle el valor de 7 m/s a la velocidad de entrada en la dirección z se debe escoger la opción de componentes en el apartado *Velocity Specification Method*. En este apartado es importante también elegir la opción de turbulencia, así que, seleccionamos la opción de *Intensity and Viscosity Ratio*.

Ahora se escoge la zona pared (wall) y se elige la función de *velocity inlet* para darle los mismos valores que la zona de entrada (inlet), también, se escoge la opción *pressure outlet* para la salida (outlet), en este apartado no hace falta modificar la diferencia de presiones debido a que la presión generada por el aire al atravesar el rotor es mínima.

Figura 83. Boundary Conditions (Inlet).



Fuente: Propia.

Figura 84. Boundary Conditions (outlet).

Pressure Outlet

Zone Name
outlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

Backflow Reference Frame: Absolute

Gauge Pressure [Pa]: 0

Pressure Profile Multiplier: 1

Backflow Direction Specification Method: Normal to Boundary

Backflow Pressure Specification: Total Pressure

Prevent Reverse Flow

Radial Equilibrium Pressure Distribution

Average Pressure Specification

Target Mass Flow Rate

Turbulence

Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio

Backflow Turbulent Intensity [%]: 5

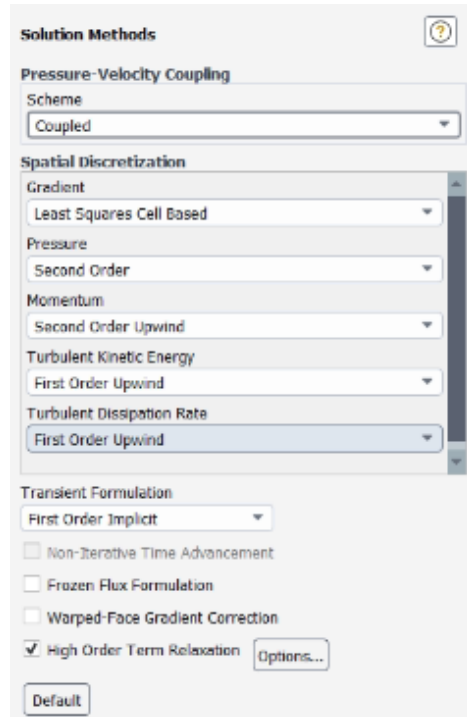
Backflow Turbulent Viscosity Ratio: 10

Apply Close Help

Fuente: Propia.

Lo siguiente que se debe hacer es seleccionar la opción de Acoplado de la lista desplegable Esquema en el cuadro de grupo Acoplamiento de presión- velocidad, también, se activa la función *High Order Term Relaxation* como se muestra a continuación.

Figura 85. Solutions Methods.



Fuente: Propia.

Luego se debe habilitar el trazado de residuos durante el cálculo, es decir, en el apartado *Monitors Residuals* se ajustan los valores de la continuidad, las velocidades en x, y, z y k-epsilon. Para este cálculo, la tolerancia de convergencia en la ecuación de continuidad se mantiene en 0,001. Dependiendo del comportamiento de la solución, puede reducir este valor si es necesario, así que, ajustamos su valor a $1e^{-6}$ para garantizar una buena convergencia.

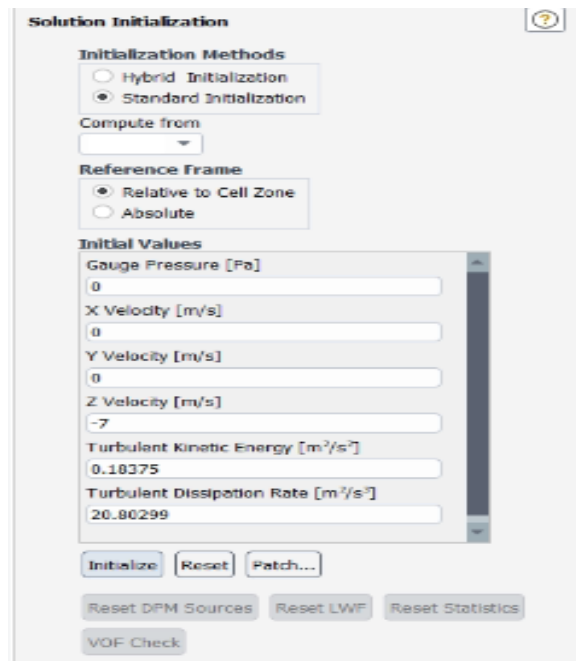
Figura 86. Residuals Monitors.



Fuente: Propia.

El siguiente apartado que se debe configurar es *Solution Initialization*, en donde se activa la opción de *Standard Initialization* para establecer las condiciones iniciales que se le han dado a la simulación y se le da *Initialize* como se puede observar en la siguiente figura.

Figura 87. Solution Initialization.



Fuente: Propia.

Por último se prosigue a calcular la simulación en el apartado *Run Calculation* para indicarle el número de iteraciones que debe realizar. En este caso, en el apartado *General* se impuso una simulación transitoria, es por esto que el paso de tiempo es de 0,5 segundos, un tiempo pequeño para poder apreciar mejor los resultados. También, se define un numero de iteraciones de 500 (figura 88), ya que, entre mayor sea el número de iteraciones, mayor será la precisión de los resultados.

Figura 88. Run Calculation.

The image shows a 'Run Calculation' dialog box with the following sections and controls:

- Buttons:** 'Check Case...' and 'Preview Mesh Motion...'.
- Time Advancement:**
 - Type: Fixed (dropdown)
 - Method: User-Specified (dropdown)
- Parameters:**
 - Number of Time Steps: 100 (spin box)
 - Time Step Size [s]: 0.5 (spin box)
 - Max Iterations/Time Step: 500 (spin box)
 - Reporting Interval: 1 (spin box)
 - Profile Update Interval: 1 (spin box)
- Options:**
 - Extrapolate Variables
 - Report Simulation Status
 - Loosely Coupled Conjugate Heat Transfer
- Solution Processing:**
 - Statistics:
 - Data Sampling for Time Statistics
 - Data File Quantities... (button)
- Solution Advancement:**
 - Calculate (button)

Fuente: Propia.

12. ANALISIS DE LOS RESULTADOS.

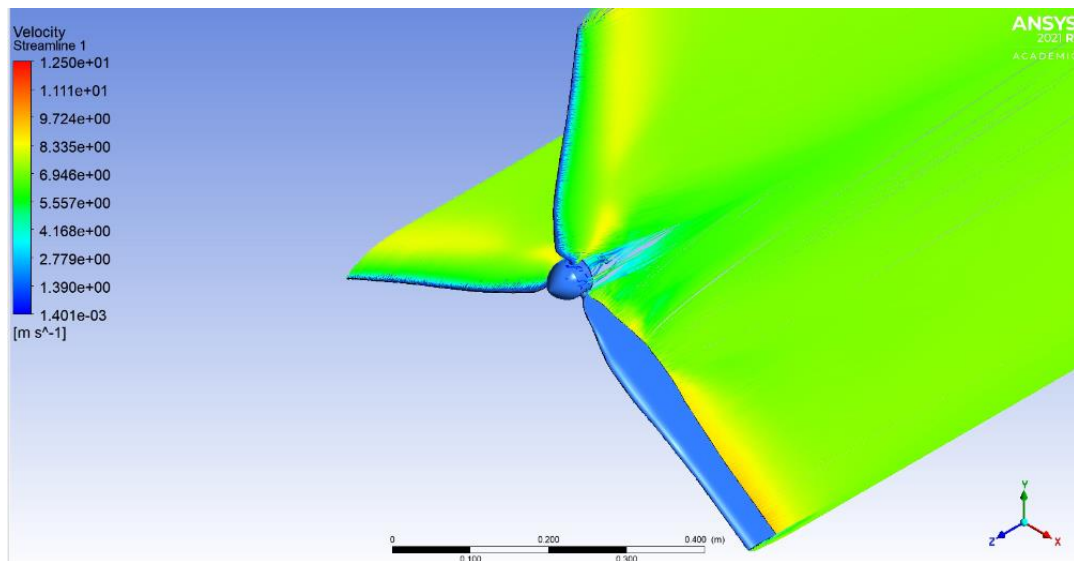
Para esta sección los resultados que fueron obtenidos en la simulación se muestran en la aplicación *CFD-Post*, donde se permite tener una buena visualización de estos. Las variables que se mostraran son la velocidad de las palas, la velocidad del flujo antes y después de atravesar el rotor, la presión que ejercen las palas al girar, la viscosidad, la turbulencia, las fuerzas y momentos que actúan sobre el rotor, los resultados de dichas variables tienen que ser próximas a los valores calculados teóricamente.

Se debe tener en cuenta que las variables como presión, temperatura y densidad del aire no varían de una manera significativa en toda la simulación; en cuanto a la velocidad, es la variable que más tiene el protagonismo y de la que sus valores sí varían significativamente.

12.1. VELOCIDAD

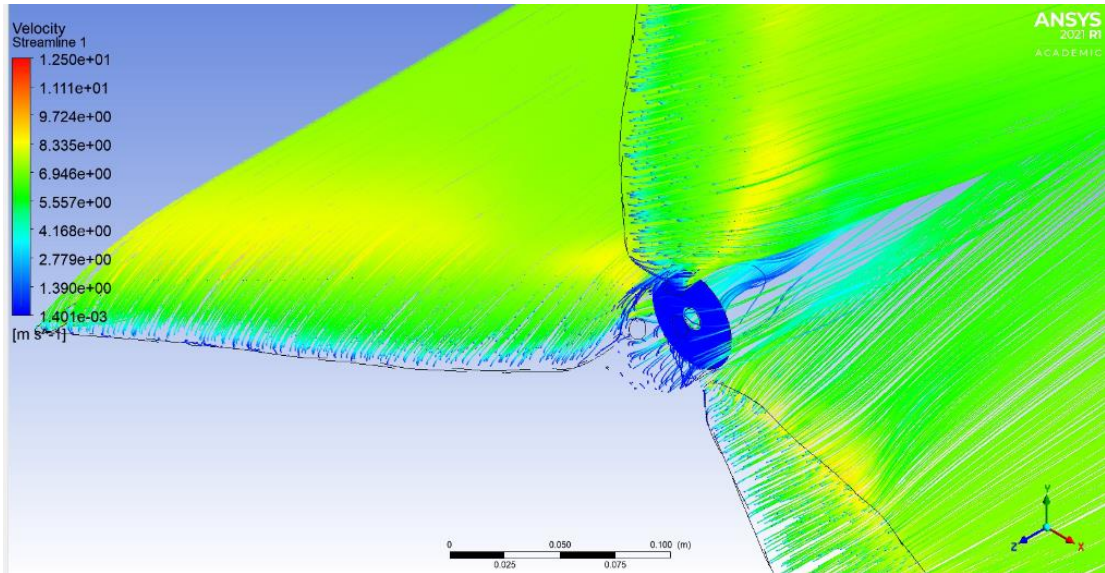
Los resultados de la velocidad del aire al atravesar el rotor son los esperados al reducirla un tercio según la teoría de Betz, se puede decir que la simulación es la prueba para comprobar dicha teoría como se muestra en la siguiente figura:

Figura 89. Velocidad del viento al atravesar el rotor.



Fuente: Propia.

Figura 90. Líneas de velocidad de flujo al impactar sobre el rotor.

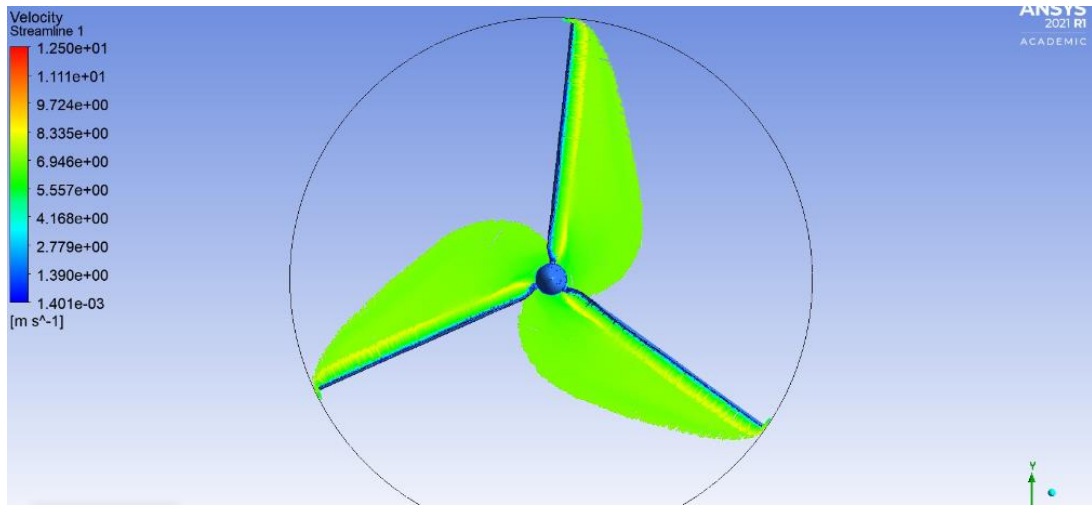


Fuente: Propia.

Como se observa en las figuras 89 y 90, la velocidad del aire incide sobre las palas con un valor aproximado de 2,7m/s, ya después de que el flujo golpea las palas se puede notar como el flujo comienza a incrementar su velocidad hasta los 8,33m/s haciendo referencia al color amarillo, y luego estabiliza su velocidad de 7m/s. La razón por la que existe esta reducción de velocidad al borde de las palas es porque las líneas de flujo al impactar con las palas transforman la energía cinética en energía cinética rotacional para que las palas se muevan y así gire el rotor.

No todas las líneas de flujo se ven afectadas por el impacto con las palas, hay otras que continúan con la velocidad de entrada, pero cambian su dirección, generando un flujo de aire rotativo, como se puede observar en la siguiente figura:

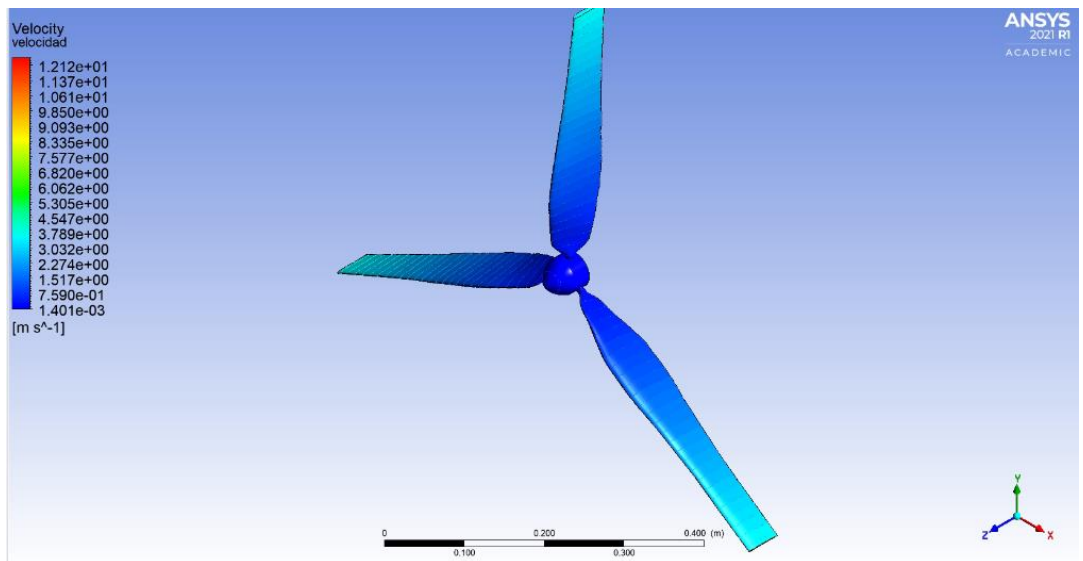
Figura 91. Giro del fluido observado desde el plano Z.



Fuente: Propia.

Otra variable que se puede calcular en la simulación, es la velocidad lineal de las palas del aerogenerador, que consta de la resultante de la velocidad que tiene el viento cuando incide sobre las palas. Por lo tanto, el valor máximo que se presenta es en la punta de las palas aproximadamente de 3,8m/s y a medida que se acerca al centro del rotor su valor va disminuyendo hasta llegar a cero, como se puede observar en la siguiente figura.

Figura 92. Velocidad lineal de palas del aerogenerador.

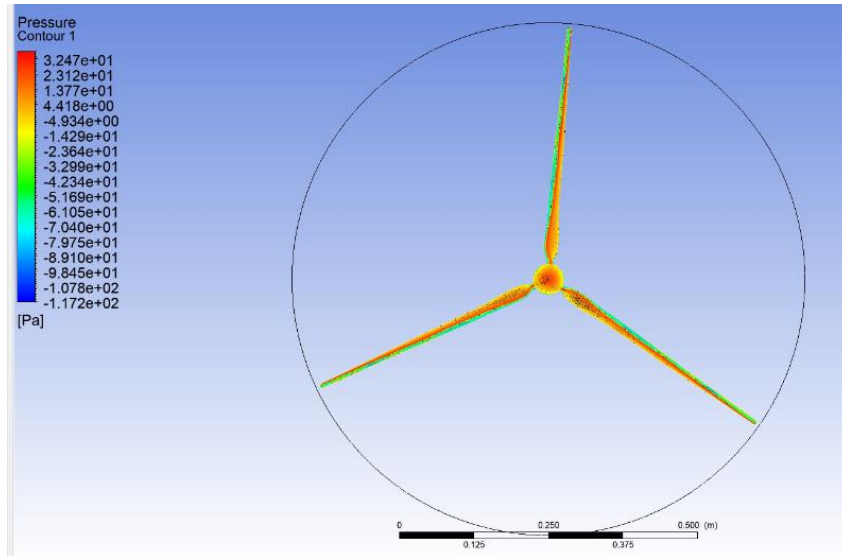


Fuente: Propia.

12.2. PRESIÓN

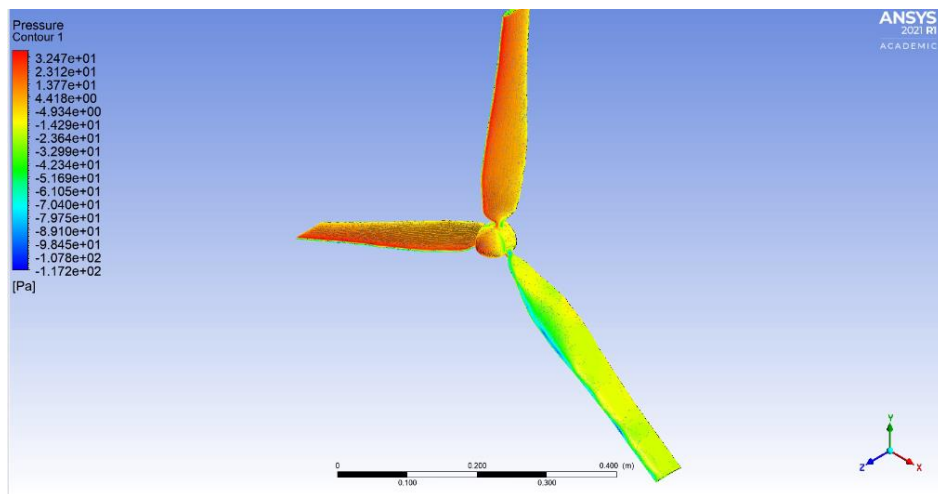
Se debe tener presente que, los resultados de la presión en la simulación no se tuvieron en cuenta la presión atmosférica, es decir, los valores obtenidos son de presión manométrica.

Figura 93. Presión sobre las palas del aerogenerador.



Fuente: Propia.

Figura 94. Presión sobre las palas del aerogenerador desde una vista isométrica.



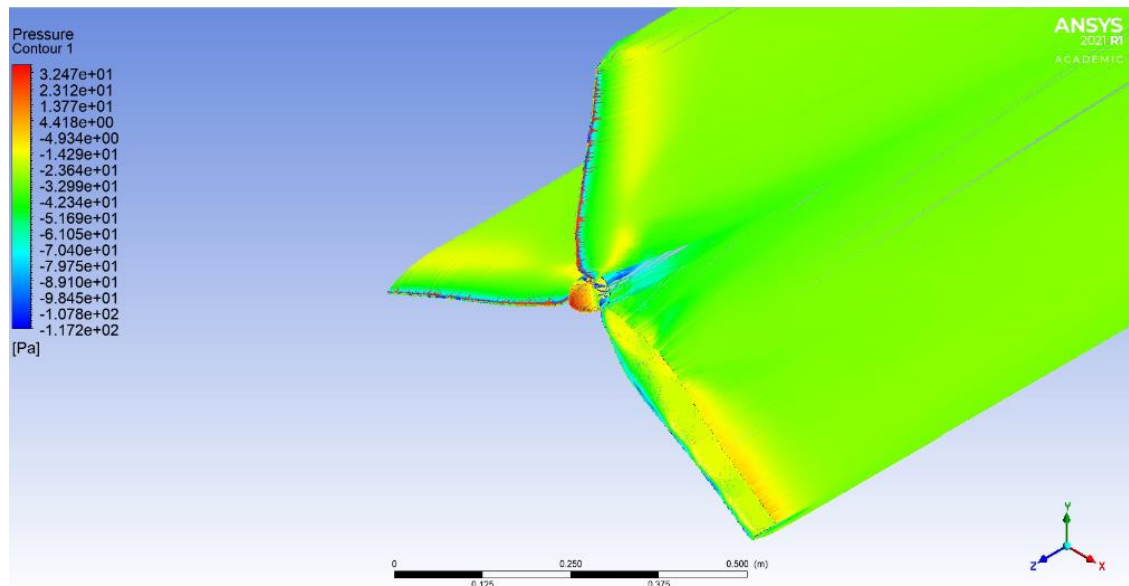
Fuente: Propia.

Como se pudo observar en las Figuras 93 y 94, la máxima presión ejerce en el borde de las palas donde el aire incurre directamente para provocar el giro del rotor, y el valor mínimo se encuentra en la cara opuesta de la pala, donde le aire no incide directamente debido a la geometría asimétrica de las palas.

Para conocer el valor real de las presiones, se debe sumar el valor de la presión atmosférica a la presión manométrica máxima y mínima que se muestran en la simulación, por lo tanto, si el valor de la presión atmosférica es de 101293 Pa, entonces el valor máximo es de 101324,36 Pa y el valor mínimo es de 101173,3 Pa

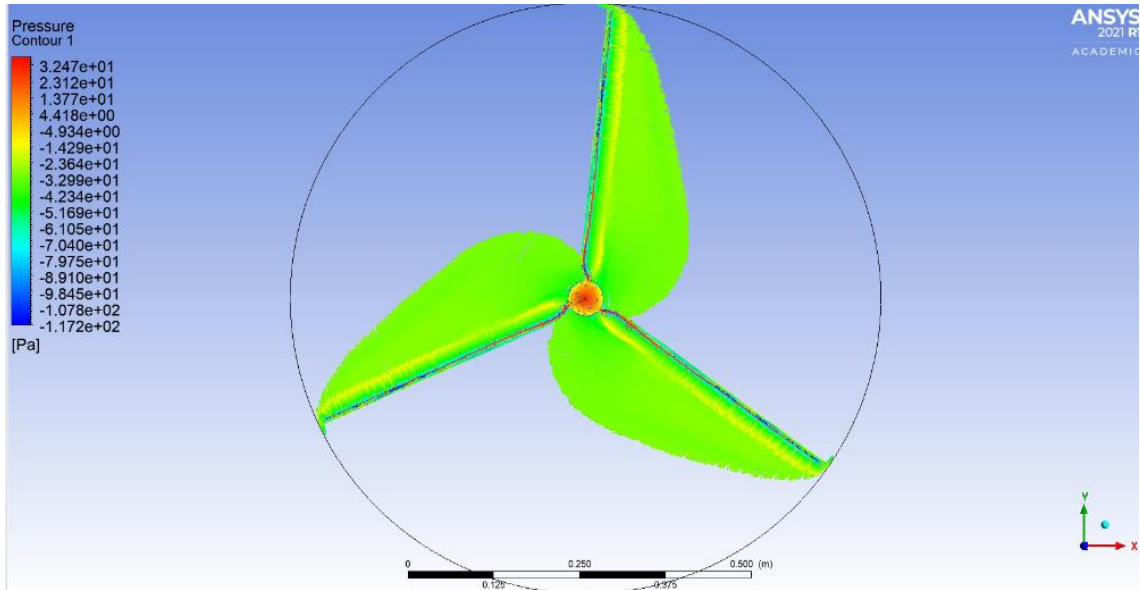
Para las siguientes imágenes, la presión se combina con el flujo del aire para constatar que el aumento de presión está en la superficie de la pala donde el aire incide directamente haciendo que el aire y el rotor giren.

Figura 95. Visualización de la presión junto a las líneas de velocidad.



Fuente: Propia.

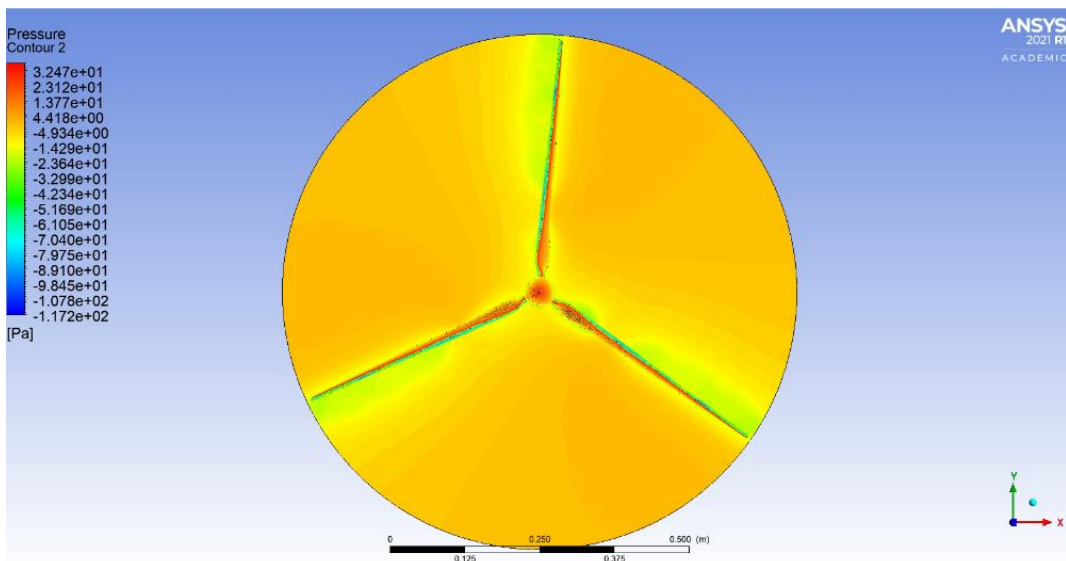
Figura 96. Presión junto al giro del flujo en el plano Z.



Fuente: Propia.

También se puede apreciar en la figura 97, como la presión disminuye con respecto a la presión atmosférica después de que el flujo atraviesa el rotor.

Figura 97. Presión de flujo al atravesar el rotor.

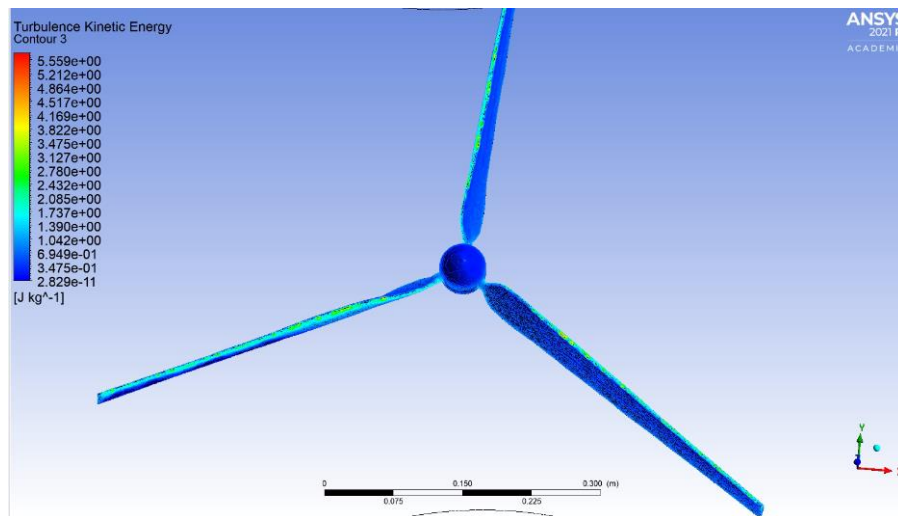


Fuente: Propia.

12.3. TURBULENCIA Y VISCOSIDAD DE TURBULENCIA

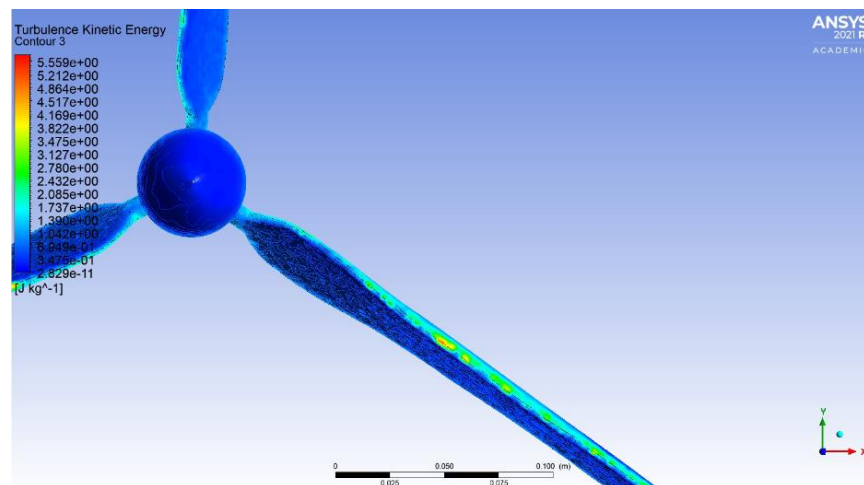
El flujo de turbulencia al igual que la velocidad se desestabiliza al entrar en contacto con las palas del aerogenerador, debido a que la energía que lleva el flujo antes de incidir con las palas es constante, pero al incidir, su energía aumenta para hacer que estas giren. A continuación, se pueden observar las zonas de las palas en que la energía cinética de la turbulencia aumenta.

Figura 98. Zonas en que el fluido genera turbulencia.



Fuente: Propia.

Figura 99. Zonas de turbulencia desde una perspectiva más cerca.

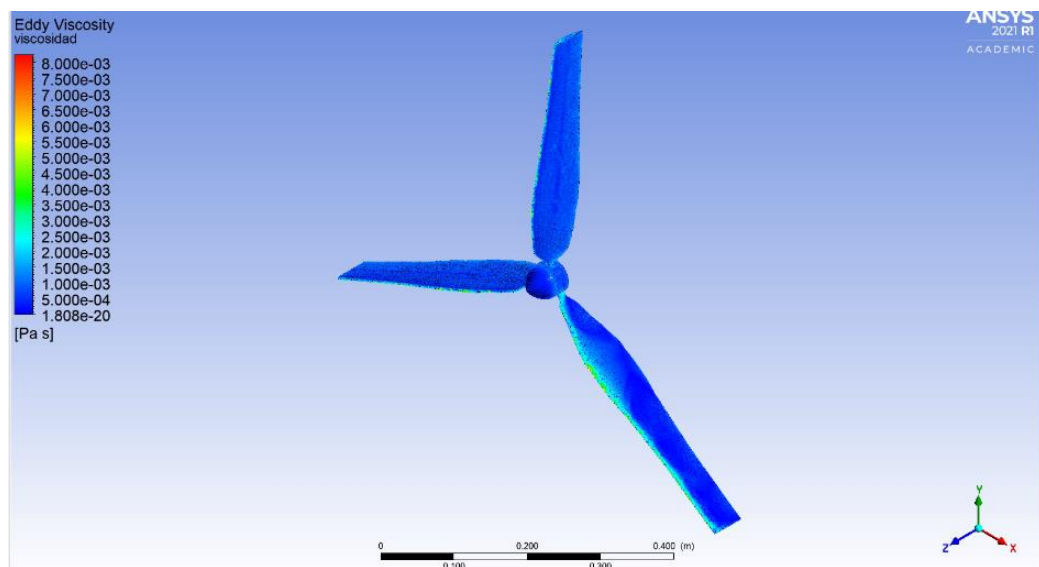


Fuente: Propia

Se puede mencionar que, las zonas en que el valor de turbulencia es bajo son las zonas donde pasa y se preserva un flujo laminar, mientras que las zonas con alto valor de turbulencia se presenta un flujo turbulento, estos torbellinos se presentan debido al ángulo de giro que tiene la geometría de la pala, generando perdida una aerodinámica.

La viscosidad de turbulencia va ligada con las mismas zonas de turbulencia que se mostraron en la figura 98 y 99, por lo tanto, los valores más elevados de viscosidad se visualizan en el borde de ataque del perfil.

Figura 100. Valores de Viscosidad de la turbulencia.



Fuente: Propia.

12.4. FUERZAS Y MOMENTOS

De la simulación también se pueden analizar los esfuerzos a los que las palas del aerogenerador están sometidas debido a la presión que ejerce el viento sobre ellas, como lo son las fuerzas y momentos en las tres direcciones del eje coordenado. Se debe tener en cuenta que la geometría del aerogenerador fue escalada al ser importada en el *Design Modeler* y es por esto que se debe hallar el valor por el que se debe multiplicar dichos esfuerzos para conocer su valor en la vida real.

Para conocer los valores de las variables fuerza y momento en la vida real, se hace uso del teorema pi de Buckingham, en especial el principio de homogeneidad, el cual establece que:

Partiendo de una relación física expresable mediante una ecuación donde se involucran **n** variables, dichas variables expresadas en términos de **k** cantidades, se puede plantear una ecuación equivalente a la ecuación original con una serie de **n-k** número adimensionales construidos con las variables originales.⁴¹

De acuerdo a lo anterior, se utiliza la fórmula de Presión y se establece que la presión en la simulación y la presión real son iguales, entonces:

$$P_1 = P_2; \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}; F_2 = F_1 * \frac{A_2}{A_1}$$

Con base a la relación de áreas de la geometría escalada y la no escalada, el valor real de los esfuerzos se multiplica por dicha relación.

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\frac{\pi \times (9^2)}{4}}{\frac{\pi \times (0,9^2)}{4}} = 100$$

Ahora se toman los valores de las fuerzas obtenidos en el software ANSYS en cada dirección del eje de coordenadas que actúan sobre las palas del aerogenerador y se hallan los valores reales, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5. Valores de fuerza sobre el aerogenerador

	Dirección	Valor total ANSYS	Valor total real
Fuerzas	x	0,005616604 N	0,5616604 N
	y	0,016162509 N	1,6162509 N
	z	0,23404643 N	23,404643 N

Fuente: Propia

Como era de esperar, la dirección en donde ejerce la mayor fuerza es la dirección en el eje z, debido a que es la dirección en que el flujo va corriendo.

En cuanto a los momentos que actúan sobre las palas, también, estarán reflejados en las tres direcciones del eje de coordenadas, entonces, para calcular el momento

⁴¹ J. F. R. Buenestado, ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN AEROGENERADOR MEDIANTE SIMULACIÓN 3D DE DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2017.

que se produce sobre el plano del rotor, se configura en el ANSYS que calcule el momento cuyo centro se dejara en la mitad de la pala, es decir, a 0,225 m del eje X, y tomando el eje Z como eje de momento. Para calcular el momento en la dirección que domina el viento, se toma el mismo valor del eje X, pero se cambia el eje del momento al eje Y. Para calcular la torsión en toda la pala, solo se cambia el eje de momento al eje X.

Tabla 6. Valores de momentos que actúan sobre el aerogenerador.

	Dirección	Valor total ANSYS	Valor total real
Momentos	x (Torsión)	0.00033653438 Nm	0,033653438 Nm
	y	0,051854162 Nm	5,1854162 Nm
	z	0,52973675 Nm	52,973675 Nm

Fuente: Propia.

En consecuencia, el momento en que se presenta mayor valor, es el momento que se produce sobre las palas en dirección del eje Z, debido a la fuerza de compresión ejercida por acción del viento en ese sentido sobre el aerogenerador.

CONCLUSIONES

De acuerdo a la amplia investigación teórica que se realizó a cerca de los aerogeneradores tripla, sobre su funcionamiento, sus dimensiones, sus perfiles aerodinámicos, sus variables, las condiciones de viento y el lugar en que un aerogenerador tripala debe estar para generar suficiente energía eléctrica, los resultados obtenidos tienen coherencia con lo que se esperaba, ya que se puede observar como la velocidad del viento se reduce a un tercio cuando atraviesa el rotor.

Sin embargo, en los resultados obtenidos por la simulación, en cuando a las líneas de corriente que lleva el flujo, al entrar en contacto con las palas, su velocidad comienza a disminuir, pero después aumenta sobrepasando la velocidad constante del viento aproximadamente por 1,33m/s. De acuerdo a lo anterior, se puede decir que el aumento de velocidad se debe al diseño de la pala en cuando al tipo de perfil Naca y los grados de inclinación que se establecieron al momento de diseñarlo.

Como era de esperarse, las variables como la presión, la turbulencia y viscosidad de turbulencia se incrementan significativamente cuando el flujo del aire entra en contacto con las palas, esto se debe a el ángulo de ataque que posee el perfil Naca, provocando que el flujo laminar no se conserve y se formen torbellinos. Los momentos y fuerzas de mayor magnitud que debe soportar el aerogenerador es producida por la fuerza que ejerce el viento sobre el rotor, es por eso que el material en que deben ser fabricadas las palas son materiales resistentes y al mismo tiempo ligeros.

En cuanto al municipio de Samacá del departamento de Boyacá, fue el lugar con mayor potencial eólico que se pudo presentar, alcanzando velocidades mayores a los 6m/s en diez meses del año, lo que resulta muy favorable para el funcionamiento de aerogeneradores de tamaño mediano o pequeño. Los datos obtenidos reflejan que el aerogenerador ubicado en el municipio de Samacá con las condiciones de viento ideales, es decir, una velocidad de 7m/s, alcanzaría a producir una potencia de 29,573KW, alimentando de energía eléctrica a 560 personas aproximadamente.

Otro aspecto importante que cabe resaltar, es la regular capacidad computacional para la solución de la simulación, ya que a la hora de generar los mallados con diferentes configuraciones, este tardaba demasiado tiempo en generarla, así mismo para obtener los resultados de la simulación, lo que permitió que el proceso de simulación en el software ANSYS se extendiera y así ser muy precavido a la hora de cometer algún error.

BIBLIOGRAFIA.

- [1] I. C. F. P. Luján, «Facebook,» 19 Marzo 2021. [En línea]. Available: <https://www.facebook.com/CiplaLibertad/videos/179790077286292/>.
- [2] A. Measurement, «Ammonit,» 8 Mayo 2018. [En línea]. Available: <https://www.ammonit.com/es/informacion-eolica/energia-eolica#top>.
- [3] Structuralia, «Structuralia,» 16 Julio 2018. [En línea]. Available: <https://blog.structuralia.com/aerogeneradores-de-eje-vertical-y-horizontal-tipos-ventajas-e-inconvenientes>.
- [4] J. F. R. Buenestado, ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN AEROGENERADOR MEDIANTE SIMULACIÓN 3D DE DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL, Madrid : Universidad Carlos III de Madrid, 2017.
- [5] L. N. Muñoz, «Experimenta,» 24 Febrero 2017. [En línea]. Available: <https://www.experimenta.es/noticias/tecnologia/wind-tree-el-aerogenerador-en-forma-de-arbol-de-newwind/>.
- [6] J. M. Lopez, «Hipertextual,» 13 Septiembre 2020. [En línea]. Available: <https://hipertextual.com/2020/09/aerogeneradores-reinventar-energia-eolica-vortex-bladeless>.
- [7] D. R. F. Galindo, DISEÑO DE PERFILES AERODINAMICOS, Mexico D.F., 2006.
- [8] R. C. S. Benavides, Identificación de proyectos con potencial de generación de energía eólica como complemento a otras fuentes de generación eléctrica en el departamento de Boyacá, Medellín, Colombia, 2018.
- [9] «Opex Energy,» [En línea]. Available: http://opex-energy.com/eolica/tipos_aerogeneradores.html.
- [10] «Iberdrola,» [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/palas-aerogeneradores>.
- [11] L. E. R. Torres, ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL PARA LA EJECUCIÓN DE PROYECTOS DE MICROGENERACIÓN EÓLICA EN ZONAS URBANAS EN EL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ, Bogotá, Colombia, 2019.
- [12] J. d. R. S. J. A. M. d. A. Valentín Pardo Fernandez, «Generalizaciones al teorema pi de Buckingham con algunas aplicaciones,» Madrid, 2007.
- [13] M. d. N. Müller, Diseño de una turbina eólica Axis, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

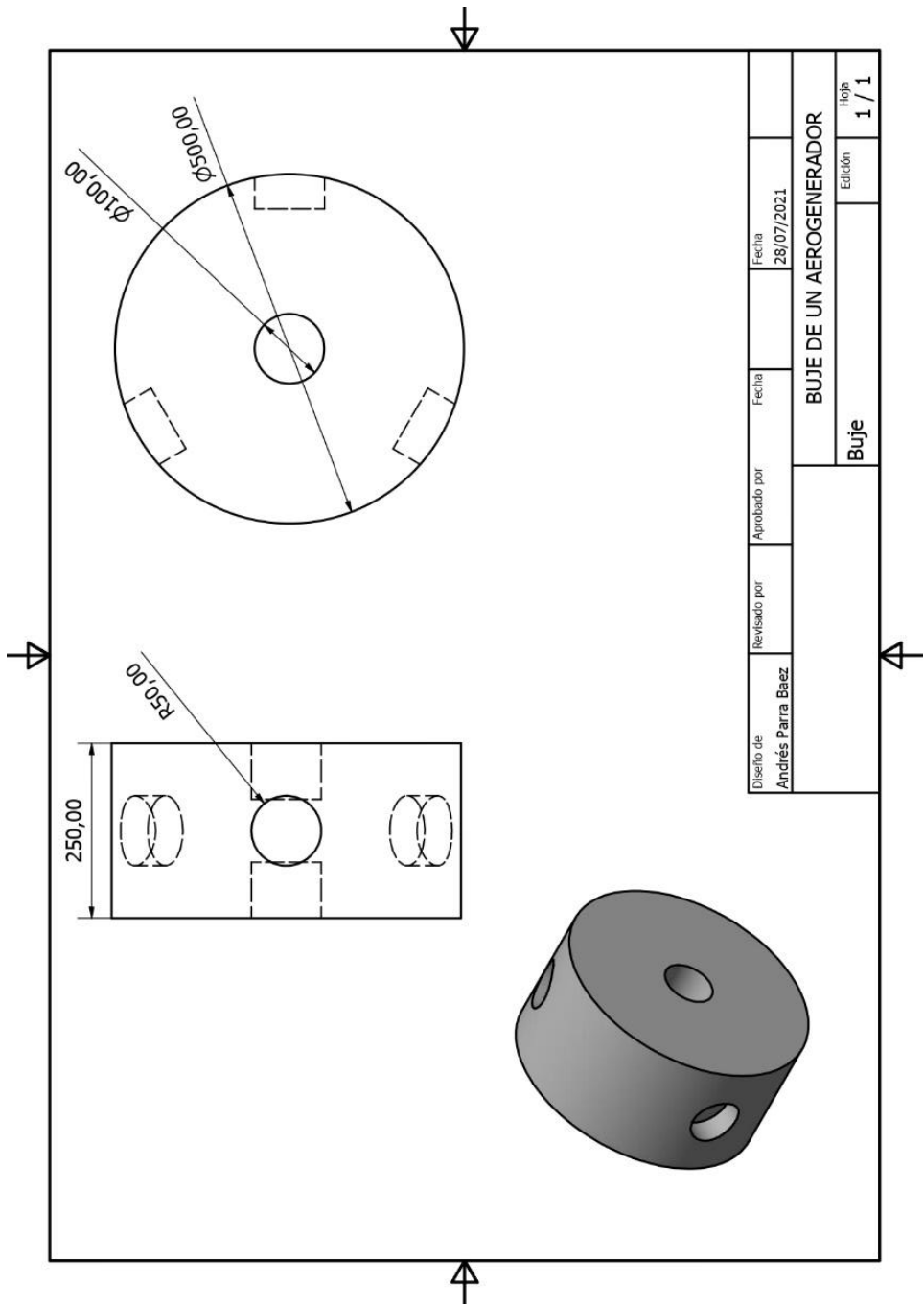
- [14] C. F. d. F. Machado, PROYECTO DE TURBINA EÓLICA DE EJE HORIZONTAL, Rio de Janeiro, 2014.
- [15] IDEAM, «Atlas de viento de Colombia,» [En línea]. Available: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>.
- [16] A. L. Suárez, «Portafolio,» 17 Julio 2019. [En línea]. Available: <https://www.portafolio.co/economia/boyaca-nuevo-foco-para-las-fuentes-de-energia-renovable-531662>.
- [17] J. J. C. García, «Scielo,» Abril 2016. [En línea]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012016000100008.
- [18] D. Osorio, «issuu,» 10 Noviembre 2017. [En línea]. Available: https://issuu.com/valentinamartinezapata/docs/energia_20eolica.
- [19] «Significados,» 28 Noviembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.significados.com/viento/>.
- [20] «Structuralia,» 16 Julio 2018. [En línea]. Available: <https://blog.structuralia.com/aerogeneradores-de-eje-vertical-y-horizontal-tipos-ventajas-e-inconvenientes>.
- [21] Felix, «LBA INDUSTRIAL,» 11 Mayo 2019. [En línea]. Available: <http://www.lbaindustrial.com.mx/aerogeneradores-verticales/>.
- [22] A. B. Boveri, Cuaderno de aplicaciones técnicas n°12 Plantas eólicas, Barcelona: ABB.
- [23] «IBERDROLA,» [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/palas-aerogeneradores>.
- [24] F.L.Smidth, «Danish Wind Industry Association,» 2 Julio 2003. [En línea]. Available: <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/pictures/fifties.htm>.
- [25] G. Portillo, «Renovables Verdes,» [En línea]. Available: <https://www.renovablesverdes.com/los-nuevos-aerogeneradores-sin-palas/>.
- [26] «TecnoBlogSanMartin,» 20 Marzo 2012. [En línea]. Available: <https://tecnoblogsanmartin.wordpress.com/2012/03/20/aerogenerador-partes/>.
- [27] «El Molino Verde,» 3 Febrero 2016. [En línea]. Available: <http://elmverde.blogspot.com/2016/02/partes-que-componen-un-aerogenerador.html>.

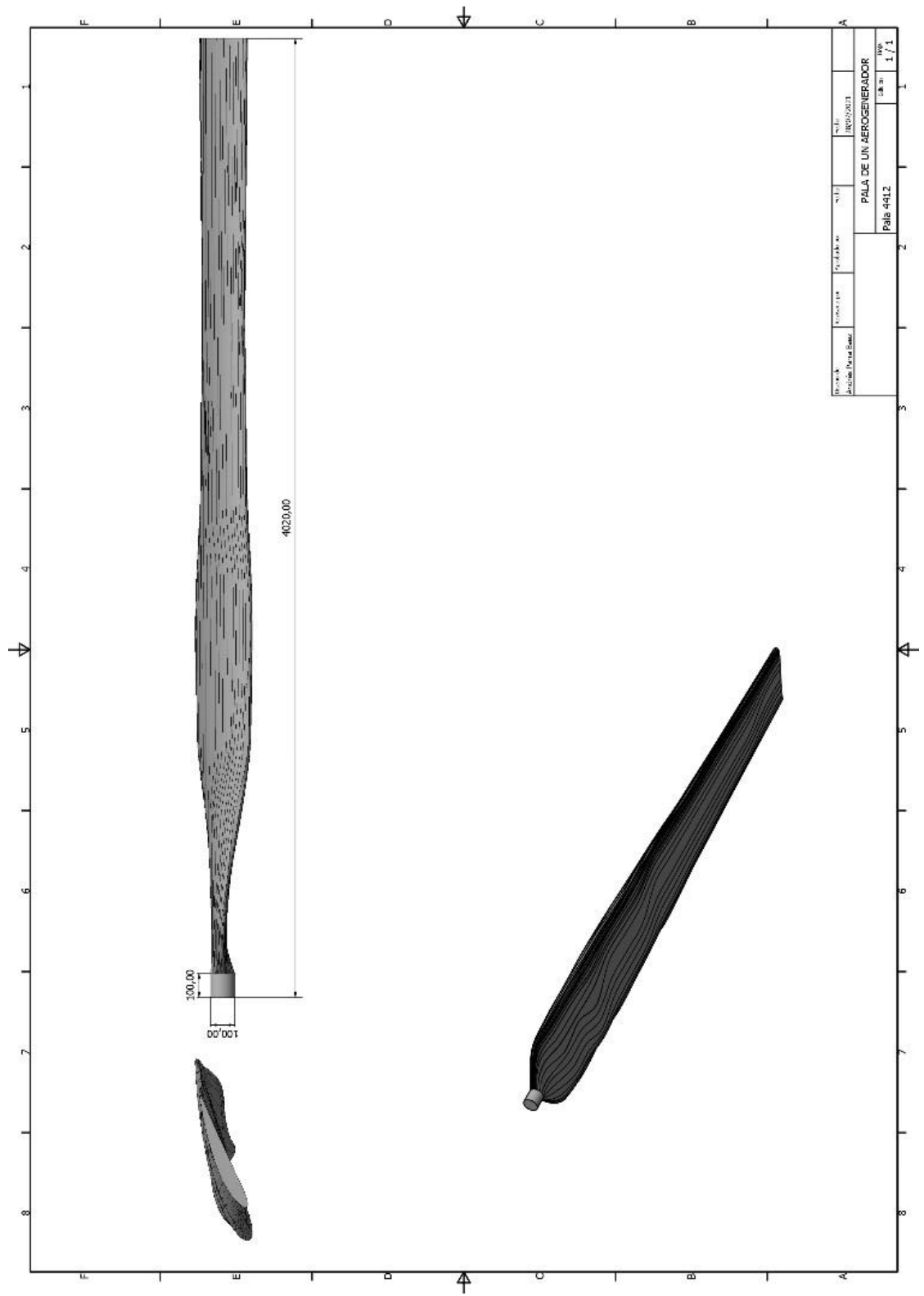
- [28] «Energiza,» 2018. [En línea]. Available: http://www.energiza.org/index.php?option=com_k2&view=item&id=1246:principales-componentes-de-un-aerogenerador.
- [29] «Aulafacil,» [En línea]. Available: Estudio y aprobación de documentos del programa con la Facultad de Ingeniería Industrial para el proyecto de doble programa.
- [30] «SENSORICX,» [En línea]. Available: <https://sensoricx.com/termodinamica-y-procesos-industriales/aerogenerador/>.
- [31] C. E. M. L. I. H. A. G. V. F. Ignacio Torres Contreras, «Desarrollo de una caja de engranes para un aerogenerador de 30 KW de capacidad,» Querétaro, México.
- [32] «Wordpress,» 2014. [En línea]. Available: <https://triplep97.wordpress.com/energia-eolica/aerogeneradores/partes-de-un-aerogenerador/rotor/buje-de-aerogenerador/>.
- [33] «Refocosta,» 18 Julio 2018. [En línea]. Available: <https://www.refocosta.com/noticias/68-tres-municipios-de-boyaca-con-potencial-para-generar-energia-eolica>.
- [34] «Toda Colombia,» 21 Febrero 2019. [En línea]. Available: <https://www.todacolombia.com/departamentos-de-colombia/boyaca/municipios-division-politica.html>.
- [35] «Atlas de Viento de Colombia,» [En línea]. Available: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>.
- [36] «Sicily Sailing Experience,» 12 Noviembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.sicilysailingexperience.com/la-rosa-de-los-vientos/>.
- [37] «Ciencia Divertida,» [En línea]. Available: <https://cienciadivertida.gal/como-se-forma-el-viento/>.
- [38] «Energética Futura,» [En línea]. Available: <https://energeticafutura.com/blog/cuanta-energia-se-puede-sacar-del-viento-limite-de-betz/>.
- [39] «Conocimiento eólico,» 17 Abril 2017. [En línea]. Available: <http://conocimientoeolico.blogspot.com/2017/04/teoria-de-la-cantidad-de-movimiento.html>.
- [40] «Wordpress,» 24 Marzo 2014. [En línea]. Available: <https://jasf1961.wordpress.com/category/calculo-aerogenerador/>.
- [41] «Una neurona para cada deporte,» 21 Noviembre 2015. [En línea]. Available: <https://unaneuronaparacadadeporte.com/tag/aerodinamica-2/>.

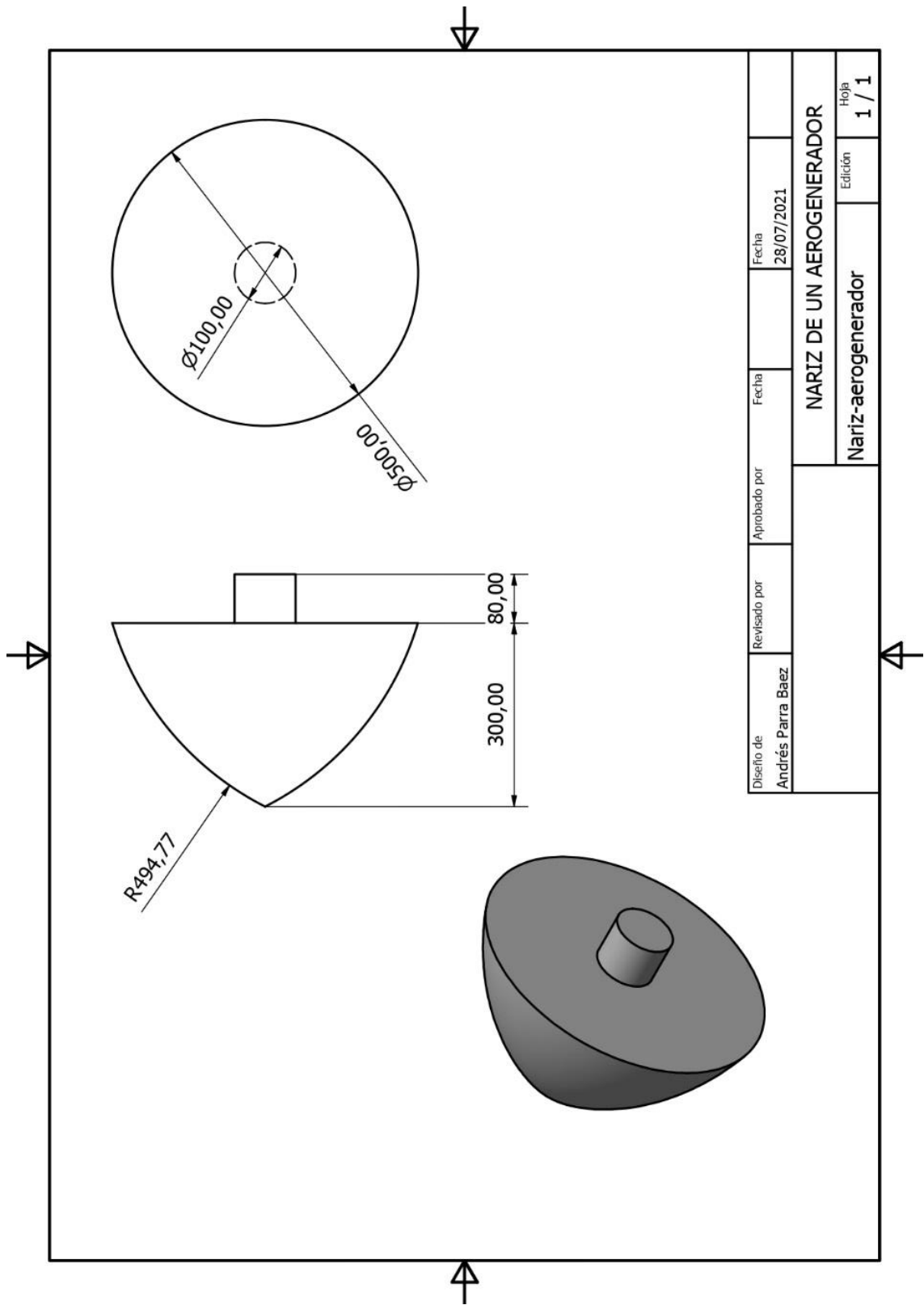
- [42] «Fisindustrial,» [En línea]. Available: <https://fisindustrial.wordpress.com/segundo-corte/temas-de-clase-ii/flujo-laminar-y-flujo-turbulento/>.
- [43] «El Gato Volante,» 9 Septiembre 2019. [En línea]. Available: <https://gatovolante.wordpress.com/2019/07/29/la-capa-limite-influencia-del-no-reynolds-en-el-rendimiento-del-ala/>.
- [44] «Aerodinámica F1,» 22 Junio 2020. [En línea]. Available: <https://www.aerodinamicaf1.com/2020/06/perfiles-aerodinamicos-como-se-disenan/>.
- [45] «Los Mundos de Brana,» 3 Novimebre 2013. [En línea]. Available: <https://losmundosdebrana.com/2013/11/03/una-idea-revolucionaria-para-post-de-nuestros-socios-de-adcmurcia/>.
- [46] «Wikiwand,» [En línea]. Available: https://www.wikiwand.com/es/Perfil_alar.
- [47] C. F. d. F. Machado, PROJETO DE UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL, Rio de Janeiro: Escpla Politecnica, 2014.
- [48] «Google imagenes,» [En línea]. Available: https://www.google.com/search?q=Boceto+de+un+perfil+aerodin%C3%A1mico+Naca+4412&tbm=isch&ved=2ahUKEwimyqDEz4TyAhXlm4QIHS8ODJcQ2-cCegQIABAA&oq=Boceto+de+un+perfil+aerodin%C3%A1mico+Naca+4412&gs_lcp=CgNpbWcQA1DKoU5YyqFOYPGmTmgAcAB4AIABhgGIAYYBkgEDMC4xmAEoA.
- [49] «Airfoil Tools,» 2021. [En línea]. Available: <http://airfoiltools.com/polar/details?polar=xf-naca4412-il-50000>.
- [50] «Scielo,» Abril 2016. [En línea]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012016000100008.
- [51] «Talent,» 2021. [En línea]. Available: <https://co.talent.com/salary?job=ingeniero+de+dise%C3%B1o>.
- [52] «enel Codensa,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/espa%C3%B1ol/personas/1-17-1/2020/Tarifario-enero-2020.pdf>.
- [53] ANSYS Meshing User's Guide, 2021.
- [54] «SIMSCALE,» Agosto 2018. [En línea]. Available: <https://www.simscale.com/forum/t/what-is-y-plus/82394>.
- [55] D. Ojeda, «El medio ambiente en Colombia,» [En línea]. Available: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/000001/cap7.pdf>.

- [56] D. W. I. Association, «Dromstorre,» [En línea]. Available: <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/enrspeed.htm>.
- [57] «Municipios de Colombia,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.municipio.com.co/municipio-samaca.html>.
- [58] T. S. Campos, «ALGUNOS ELEMENTOS SOBRE LA ENERGÍA EÓLICA,» Santa Cruz, Bolivia, 1997.
- [59] S. Renata, «Unal.edu.co,» 2018. [En línea]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/63745/1018424888.2018.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. [Último acceso: 07 2021].

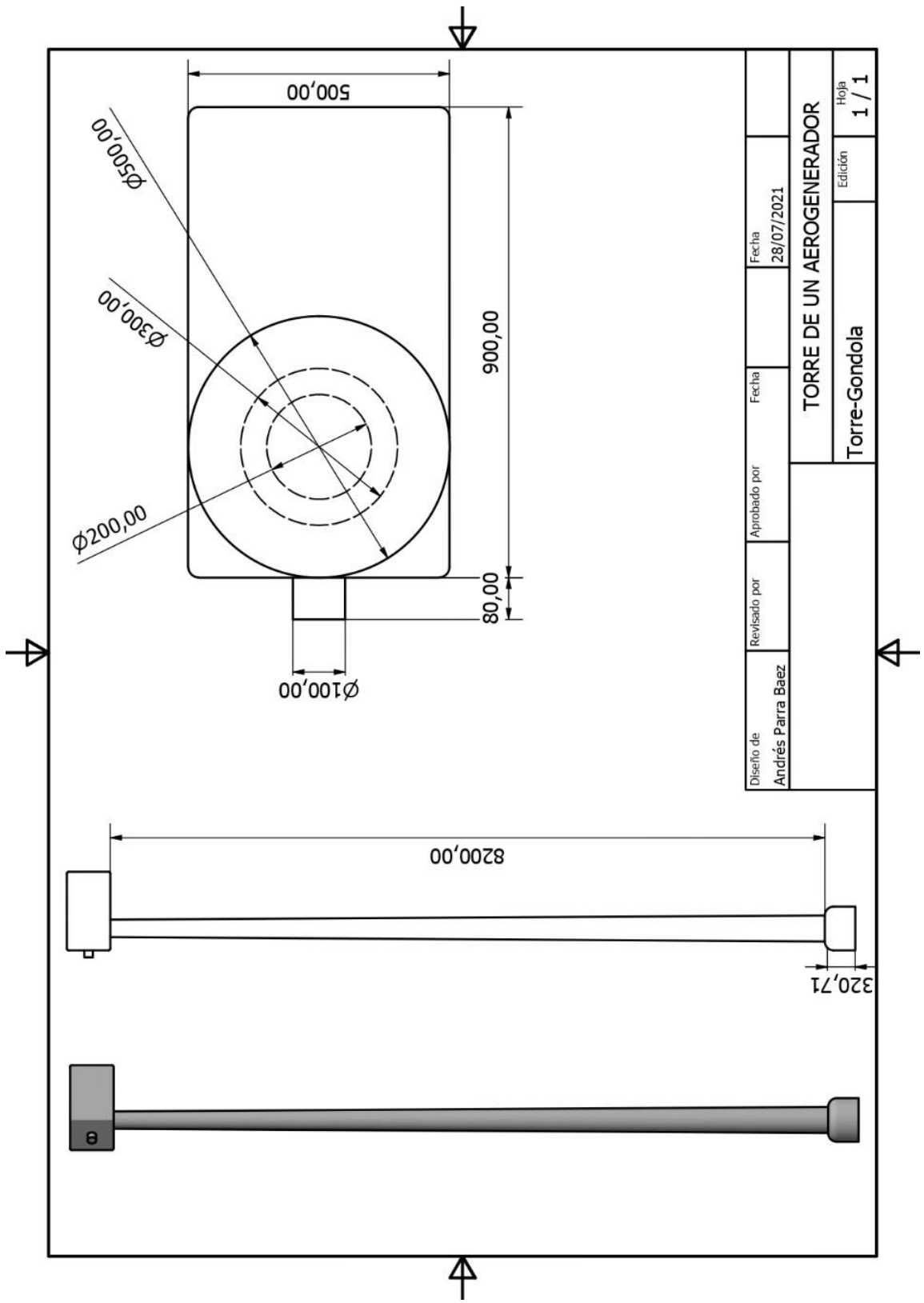
13. ANEXOS.







Diseño de Andrés Parra Baez	Revisado por	Aprobado por	Fecha 28/07/2021	Fecha
			NARIZ DE UN AEROGENERADOR	
			Nariz-aerogenerador	
			Edición	Hoja
			1 / 1	1 / 1



Diseño de Andrés Parra Baez	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha
			28/07/2021	
TORRE DE UN AEROGENERADOR			Edición	Hoja
Torre-Gondola			1 / 1	1 / 1