

DESARROLLO DE UN BANCO DIDÁCTICO PARA MODELO DE TURBINA
EÓLICA DE EJE VERTICAL

JUAN CAMILO RODRÍGUEZ DÍAZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS
TUNJA
2021

DESARROLLO DE UN BANCO DIDÁCTICO PARA MODELO DE TURBINA
EÓLICA DE EJE VERTICAL

JUAN CAMILO RODRÍGUEZ DÍAZ

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico

Directores

Phd. Yina Faizully Quintero Gamboa

MSc. Leonardo Cely Guezguan

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIVISIÓN DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS

TUNJA

2021

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Tunja, 28/07/2021

DEDICATORIA – AGRADECIMIENTOS

CONTENIDO

Pág.

RESUMEN	14
INTRODUCCIÓN	15
1. MARCO REFERENCIAL.....	18
1.1. ANTECEDENTES.....	18
1.2. MARCO TEÓRICO	20
1.2.1. Energía eólica	20
1.2.2. Aerogenerador	20
1.2.2.1. Aerogenerador de eje horizontal.....	21
1.2.2.2. Aerogenerador de eje vertical	21
1.2.3. Ley de inducción de faraday	23
1.2.4. Banco de pruebas.....	24
1.2.5. Medición del viento	24
1.2.5.1. Anemómetro	25
1.2.5.2. Anemómetro de hélice	25
1.2.5.3. Anemómetro de hilo caliente.....	25
1.2.6. Arrastre y sustentación	26
1.2.6.1. Arrastre	26
1.2.6.2. Sustentación	26
1.2.7. Perfil alar.....	26
1.2.8. Ángulo de pitch	28
1.2.9. Ángulo de ataque.....	28
1.2.10. Análisis dimensional.....	29
1.2.11. Teorema de π Buckingham.....	29
1.2.12. Números adimensionales.....	31
1.2.12.1. Número de Reynolds	31
1.2.12.2. Número de Mach	32
1.2.12.3. Número de Froude.....	32
1.2.12.4. Número de Euler.....	32
1.2.12.5. Coeficiente de Arrastre	32

1.2.12.6. Coeficiente de Sustentación	33
1.2.13. Semejanza geométrica	33
1.2.14. Semejanza dinámica.....	33
2. DISEÑO DEL BANCO DIDÁCTICO.....	34
2.1. METODOLOGÍA PLANTEADA	35
2.2. APLICACIÓN DEL TEOREMA PI BUCKINGHAM	36
2.3. OBTENCIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL MODELO	38
2.3.1. Número de Reynolds y velocidad de viento	40
2.4. DISEÑO DEL ROTOR	40
2.4.1. Sistema de acople a la base del banco – Varilla roscada.....	40
2.4.2. Modificación del ángulo de ataque (β) – Perfil aerodinámico.....	41
2.4.3. Láminas sujetadoras	41
2.4.4. Discos de sujeción	42
2.4.5. Perfil aerodinámico (NACA 0025)	42
2.4.6. Modelo CAD del Rotor ensamblado.....	43
2.4.7. Modelo CAD de la estructura soporte del rotor	43
2.5. SELECCIÓN DEL VENTILADOR	44
2.6. SELECCIÓN DE CONTROL DE VELOCIDAD	46
2.7. ELEMENTOS DE MEDICIÓN SELECCIONADOS	46
2.8. DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS	47
2.8.1. Túnel de viento	47
2.8.2. Estructura metálica o esqueleto del banco	47
2.8.3. Anillos de sujeción del túnel y del ventilador (opcional)	48
2.8.4. Modelo CAD del banco didáctico de turbina de eje vertical	49
2.9. CONSTRUCCIÓN DEL BANCO	50
2.9.1. Túnel de viento	50
2.9.2. Estructura metálica	52
2.10. CONSTRUCCIÓN DEL AEROGENERADOR.....	53
2.10.1. Discos de sujeción	53
2.10.2. Láminas sujetadoras.....	54
2.10.3. Estructura soporte piramidal	55
2.10.4. Eje roscado	55
2.10.5. Álabes NACA 0025	56
2.10.6. Ensamble del aerogenerador	64

3. RESULTADOS.....	72
4. CONCLUSIONES	89
5. TRABAJOS FUTUROS.....	91
6. BIBLIOGRAFÍA.....	92
7. ANEXOS	94

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Aerogenerador de eje horizontal y de eje vertical.....	20
Figura 2. Partes de un aerogenerador de eje horizontal.....	21
Figura 3. Rotor Savonius.....	22
Figura 4. Tipos de rotores Darrieus.....	23
Figura 5. Visualización del experimento de Faraday.....	24
Figura 6. Anemómetro de hélice.....	25
Figura 7. Anemómetro de hilo caliente.....	26
Figura 8. Visualización de las fuerzas de arrastre y sustentación.....	26
Figura 9. Partes de un perfil alar.....	27
Figura 10. Ángulo de pitch.....	28
Figura 11. Ángulo del ángulo de ataque de un perfil aerodinámico.....	29
Figura 12. Expresión Genérica Teorema Buckingham.....	30
Figura 13. Visualización, semejanza geométrica y dinámica.....	33
Figura 14. Flujograma de la metodología.....	35
Figura 15. Agujeros en perfil para modificación del A. ataque.....	41
Figura 16. Lámina con radios (CAD).....	41
Figura 17. Lámina sencilla (CAD).....	41
Figura 18. Disco de sujeción modelo CAD.....	42
Figura 19. Modelo CAD Perfil NACA 0025.....	42
Figura 20. CAD del rotor ensamblado.....	43
Figura 21. Estructura aerogenerador.....	43
Figura 22. Modelo CAD del túnel de viento.....	47
Figura 23. Modelo CAD de la estructura del banco de pruebas.....	48
Figura 24. Anillo de sujeción.....	48
Figura 25. Modelo CAD del Banco didáctico eólico de eje vertical.....	49
Figura 26. Láminas con refuerzo.....	50
Figura 27. Túnel de viento.....	51
Figura 28. Malla enderezadora.....	51
Figura 29. Estructura metálica de soporte.....	52

Figura 30. Discos de sujeción.	53
Figura 31. Lámina sujetadora con arcos.	54
Figura 32. Lámina sujetadora sencilla.	54
Figura 33. Estructura piramidal.	55
Figura 34. Eje roscado.	55
Figura 35. Bloques de aluminio.	56
Figura 36. Post Procesado del perfil alar.	56
Figura 37. Aplanado de las caras del material (FUSION 360)	57
Figura 38. Mecanizado de desbaste "rampa" (FUSION 360).....	57
Figura 39. Acabado superficial (FUSION 360).....	58
Figura 40. Aplanado de las caras del material.	58
Figura 41. Proceso de mecanizado "rampa"	59
Figura 42. Mecanizado "rampa".....	59
Figura 43. Perfil alar escalonado.	60
Figura 44. Acabado superficial.....	61
Figura 45. Mecanizado final del primer volumen (primer álabe).	62
Figura 46. Álabe obtenido vista lateral.....	63
Figura 47. Álabe obtenido vista superior.....	64
Figura 48. Estructura con rodamientos y acople de alternador.....	64
Figura 49. Ensamble de prueba del aerogenerador.....	65
Figura 50. Detalle polea.	66
Figura 51. Polea.....	66
Figura 52. Planta (alternador) Ford 60'	67
Figura 53. Montaje para perforación de orificios.	68
Figura 54. Agujeros sobre la cara superior del álabe.....	69
Figura 55. Elaboración de roscas.	70
Figura 56. Aerogenerador ensamblado.	71
Figura 57. Banco Eólico de eje vertical vista frontal.....	72
Figura 58. Banco Eólico de eje vertical vista de perspectiva.	73
Figura 59. Defectos de mecanizado sobre la pieza final.....	74
Figura 60. Porosidades sobre la pieza final.	75
Figura 61. Álabe con relleno de masilla para carro.....	76
Figura 62. Conexión variador-motor	76
Figura 63. Toma Corriente 220V - 20A.....	77

Figura 64. Variador de frecuencia conectado a la red eléctrica.	77
Figura 65. Rotor con cazoletas plásticas.	78
Figura 66. Tacómetro digital.	79
Figura 67. Anemómetro digital.	80
Figura 68. Curva de potencia utilizable por el rotor.....	84
Figura 69. Curva característica del rotor.....	87
Figura 70. Comparación de curvas de potencia obtenidas.	88

LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. Ej. Grupo Adimensional 1.....	30
Ecuación 2. Ej. Grupo Adimensional 2.....	30
Ecuación 3. Ej. Exponentes de grupos adimensionales	30
Ecuación 4. Ej. Expresión grupo adimensional resuelta	30
Ecuación 5. Ej. Coeficiente de Arrastre CD	31
Ecuación 6. Ej. Ecuación Número De Reynolds.	31
Ecuación 7. Número de Reynolds.....	32
Ecuación 8. Número de Mach.....	32
Ecuación 9. Número de Froude.	32
Ecuación 10. Número de Euler.	32
Ecuación 11. Coeficiente de Arrastre.....	33
Ecuación 12. Coeficiente de Sustentación.....	33
Ecuación 13. Dimensiones primarias de parámetros M.....	36
Ecuación 14. Parámetros adimensionales K.	36
Ecuación 15. Grupo adimensional 1.	36
Ecuación 16. Grupo adimensional 2.	36
Ecuación 17. Grupo adimensional 2, unidades.....	37
Ecuación 18. Separación de variables, Longitud.	37
Ecuación 19. Expresión exponentes subíndice 2.....	37
Ecuación 20. Exponentes del grupo adimensional 2.	37
Ecuación 21. Reemplazo exponentes grupo adimensional 2.	37
Ecuación 22. Expresión obtenida, Número de Reynolds.	37
Ecuación 23. Expresión obtenida. Factor de escala.	38
Ecuación 24. Grupo adimensional 1 para modelo y prototipo.....	38
Ecuación 25. Grupo adimensional 2 para modelo y prototipo.....	38
Ecuación 26. Altura del modelo.	39
Ecuación 27. Diámetro del modelo.	39
Ecuación 28. Factor de escala.....	39
Ecuación 29. Velocidad de viento para modelo.	40
Ecuación 30. Valor de velocidad de viento para modelo.	40

Ecuación 31. Diámetro mínimo del túnel de viento.	49
Ecuación 32. Distancia de desenvolvimiento del flujo turbulento.	49
Ecuación 33. Potencia teórica de un aerogenerador.	81
Ecuación 34. Coeficiente de potencia.	82
Ecuación 35. Coeficiente a.	83
Ecuación 36. Potencia real de un aerogenerador.	83
Ecuación 37. Ecuación para calcular presión.	85
Ecuación 38. Ecuación para calcular fuerza.	85
Ecuación 39. Potencia generada por par.	86

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Partes del banco eólico de eje vertical	34
Tabla 2. Dimensiones del modelo obtenido.	40
Tabla 3. Velocidad de viento equipo 1.	44
Tabla 4. Velocidad de viento equipo 2.	45
Tabla 5. Ventilador Seleccionado.	45
Tabla 6. Variador de velocidad.	46
Tabla 7. Mediciones sobre el banco eólico.	81
Tabla 8. Potencia teórica aprovechable por el rotor.....	82
Tabla 9. Valores de C_p	83
Tabla 10. Potencia real del aerogenerador.	84
Tabla 11. Calculo de la fuerza de viento para diferentes velocidades.	85
Tabla 12. Torque producido por el rotor.....	86
Tabla 13. Potencia generada por el rotor.....	87

RESUMEN

El uso del teorema Π de Buckingham permite el reconocimiento de variables de interés en estudios con modelos en túneles de viento. Con esto se logra replicar y reducir prototipos en modelos de laboratorio para la medición de valores geométricos, dinámicos y cinemáticos.

En el siguiente documento se presenta el desarrollo matemático y mecánico de un rotor Darrieus H para un banco eólico didáctico de eje vertical. La creación de dicho modelo se basa en la reducción de un prototipo existente, las dimensiones del modelo se muestran en ecuaciones paramétricas determinadas por medio del teorema Π de Buckingham, de la misma manera se muestra un diseño CAD del rotor con las dimensiones calculadas, el diseño y del túnel de viento y de la estructura que soporta dichas cargas.

La construcción de rotor se centró principalmente en la elaboración de los perfiles aerodinámicos, que se realizaron en el centro de mecanizado de los laboratorios de la facultad de Ingeniería Mecánica de la universidad Santo Tomas Tunja. Se mecanizaron tres alabes sobre bloques macizos de fundición de aluminio. Una vez finalizado este proceso se siguió con el montaje y ensamble de las diferentes piezas que componen al rotor.

Finalmente, la puesta en marcha del equipo y la realización de mediciones sobre diferentes variables de flujo seleccionadas por medio de un variador de velocidad conectado a un ventilador extractor ubicado en la parte posterior del banco.

INTRODUCCIÓN

Durante mucho tiempo el viento fue un medio de generación de energía mecánica, ampliamente usado en la antigüedad en viejos molinos para diferentes fines, como triturar o transportar alimentos, así también se hacía provecho mecánico de la energía contenida en las corrientes de viento por las velas de los barcos que eran impulsados por las corrientes de aire. Con el pasar del tiempo y los avances tecnológicos se empezaron a crear dispositivos y mecanismos que demandaban el uso de energías más potentes, ya no bastaba con la fuerza bruta generada por aquellos rústicos mecanismos; gracias al descubrimiento de la inducción electromagnética hecho por el físico británico Michael Faraday, que consistía en hacer pasar un imán a través de una espira conductora que generaba un flujo electromotriz en la espira, este fenómeno se hizo conocido ampliamente alrededor del mundo, dando paso a la forma conocida de generación de electricidad, transformar el movimiento de rotación de un eje, en potencial eléctrico, la fuerza bruta se había transformado en algo más sutil.

Así se amplió conocimiento sobre la generación de energía a partir del viento; ingeniar la manera de “atrapar” esa energía contenida en el viento por medio de una pieza especializada y diseñada con fundamentos de aerodinámica daría campo a los conceptos de arrastre y sustentación. Conceptos ampliamente usados en la aeronáutica y dispositivos relacionados. El aerogenerador o turbina eólica hace provecho del mismo principio físico que hace volar un avión, conociendo que dicho dispositivo genera energía a partir del movimiento de masas de aire y siendo un recurso que se encuentra en cualquier lado, se planteó la posibilidad de hacer uso de dicha forma de generación de energía en el diario vivir.

En la actualidad el mercado ofrece dos tipos de turbinas eólicas, turbinas eólicas de eje horizontal y de eje vertical, de las primeras sabemos que son ampliamente usadas en la industria de la generación de energía eléctrica a grandes escalas, son bastantes conocidas y fáciles de reconocer. Por otra parte, las segundas son poco conocidas y no suelen ser usadas para la generación de energía eléctrica en masa, por lo general se pueden encontrar en espacios urbanos como lo son edificios altos y grandes autopistas, su diseño sencillo y eficiente lo hace único para ser fácilmente introducido en vehículos incorporándolos a su estructura, así como lo realizaron estudiantes de la universidad Libre de Barranquilla que , con el diseño inicial del sistema eólico se continuó con el desarrollo y fabricación de un automóvil eléctrico que estéticamente mantuviera el concepto de un vehículo convencional que fuera aerodinámicamente eficiente; el diseño incluía la integración de una turbina eólica en su interior¹. E incluso ser usadas para cargar dispositivos electrónicos móviles. De estas turbinas eólicas de eje vertical

¹ Roldan Castro, Nelson Javier; Isaza Pareja, Mario León y Olaya Dávila, Mauricio. Desarrollo de una máquina eólica de doble turbina de eje vertical para la generación de energía en un auto eléctrico., Corporación Industrial Minuto de Dios, 2015, 10 p.

podemos encontrar una variedad un poco más amplia, así se dividen en Turbina eólica tipo Savonius y turbina eólica tipo Darrieus por lo general las más conocidas y usadas.

La identificación de la turbina eólica de eje vertical más adecuada para una aplicación concreta se puede realizar mediante la prueba de un modelo de rotor en un banco didáctico de turbina eólica de eje vertical, de esta manera podemos cambiar patrones geométricos y de flujo, creando diferentes ambientes de trabajo.

El presente documento muestra la realización de un banco didáctico de pruebas para turbinas eólicas de eje vertical. El diseño mecánico del mismo se basó en la teoría de modelos (teorema de Pi Buckingham), banco que se planteó con el objetivo de ensamblar y analizar diferentes rotores de eje vertical que para este trabajo se ha limitado al uso y análisis de rotores tipo H Darrieus; de esta manera se podrá estudiar y analizar el comportamiento del rotor elegido bajo diferentes configuraciones geométricas y entornos de operación.

El análisis adimensional es una poderosa herramienta matemática que permite estudiar y abordar un problema de la vida real sin la necesidad de hacer presencia en campo o bien cuando no se dispone de los recursos suficientes para adquirir o construir equipos de un solo propósito. Son usados con la única función de realizar pruebas, así se puede inferir que el modelamiento en laboratorio es bastante sencillo y más económico. Este criterio se basa en tres pilares fundamentales; la semejanza geométrica, la semejanza cinemática y la semejanza dinámica.

El fundamento teórico Pi Buckingham nos permite obtener un modelo de laboratorio que cumple con criterios de semejanza, así, los datos y variables obtenidas son de alta confiabilidad, (semejanza geométrica, dinámica y cinemática.) De esta manera el diseño del rotor fue calculado bajo dichos criterios, encontrando que las medidas principales de estudio los números de Strouhal (St) Reynolds (Re) y Froude (Fr) serían resaltados para esta memoria, sin embargo, el más importante de ellos es el número de Reynolds (Re).

Fomentar el desarrollo en el área de energías renovables es fundamental para el estudiante de ingeniería en general, puesto que ahora se ve el problema medio ambiental que genera el uso de la energía convencional impulsada por combustibles fósiles. Es de vital importancia hacer difusión del conocimiento mediante la práctica; puesto que el ingeniero en formación tiene el potencial para crear e innovar mecanismos y sistemas de producción de energía, el banco didáctico para turbina eólica de eje vertical presta la facilidad para el reconocimiento y entendimiento del proceso de transformación de energía usando la energía ilimitada del viento.

Para lograr el desarrollo de dicho banco se plantearon tres etapas, investigación diseño y construcción. En las cuales y cada una se desarrollaron diferentes metodologías para lograr cada objetivo. En la etapa de investigación se hizo una

revisión bibliográfica organizando dicha información en un Excel. La fase de diseño se dividió en dos partes, diseño y re diseño, y finalmente la etapa de construcción en la cual se hizo búsqueda de materiales y métodos idóneos para llevar a cabo dicho proyecto, así mismo se hizo uso del centro de mecanizado CNC disponible en los laboratorios de Ingeniería Mecánica de la Universidad Santo Tomás Seccional Tunja, la recolección de datos experimentales se realizará mediante elementos de medición ya disponibles en el laboratorio de Ingeniería Mecánica y adquiridos bajo catálogo.

De esta manera para poder llevar a cabo la realización del proyecto se planteó el objetivo general que propone desarrollar un modelo de laboratorio de turbina eólica de baja potencia de eje vertical, usando tecnología de impresión 3D maquinado CNC o algún otro medio de modelación, que permitan verificar la influencia de variables geométricas y de flujo sobre el desempeño del rotor. Y consigo cuatro objetivos específicos que dividirían el proceso de trabajo de la siguiente manera:

Realizar una revisión bibliográfica con el fin de identificar configuraciones geométricas y rangos de operación de turbinas de eje vertical y parámetros adimensionales que garanticen relaciones de semejanza.

Fabricar modelo de laboratorio de rotor de eje vertical a través de impresión 3D procesos de maquinado en CNC o alguna otra metodología de formado. El modelo a fabricar debe cumplir con las relaciones de semejanza apropiadas.

Construir el banco didáctico para modelos de turbinas eólicas de eje vertical.

Realizar mediciones y análisis del desempeño del rotor fabricado para diferentes variables de flujo.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. ANTECEDENTES:

Al realizar la revisión bibliográfica se encontró que existe escasa información sobre bancos eólicos de eje vertical, de esta manera con la información recolectada, se hizo uso de los conceptos y de las herramientas que se consideraron pertinentes para poder llevar a cabo el desarrollo del proyecto planteado, como por ejemplo las dimensiones de un prototipo de turbina eólica de eje vertical tipo Darrieus H.

Leonardo José y Alan Javier en su trabajo de grado intitulado “Diseño y modelamiento de la geometría del perfil alar de un aerogenerador, basado en las condiciones de viento presente en el departamento de Córdoba para la generación de potencia”² desarrollaron una turbina eólica de eje vertical, el cual se tomó como referencia principal puesto que el prototipo elaborado cumplía con las características necesarias para llevar a cabo el análisis dimensional para obtener el modelo de laboratorio, cómo lo fue el tipo de rotor (Darrieus H) y las dimensiones (cuerda, altura, diámetro).

La teoría necesaria para el desarrollo matemático y la obtención de un modelo físico con dimensiones de un rotor Darrieus H para laboratorio se logró a través de la implementación del teorema de Pi Buckingham, para ello fue necesario recurrir a ejemplos desarrollados; se hizo uso de la cuarta edición de la Mecánica de fluidos de Yunus Cengel & John Cimbala³, el séptimo capítulo del libro hace explícito paso por paso la forma de aplicar el teorema de Pi Buckingham.

Para realizar la medición de variables en laboratorio se hace indispensable el uso de elementos de toma de datos, como lo menciona Juan Carlos Serrano Collazo en su trabajo de grado intitulado “Desarrollo de un banco de ensayo para la evaluación de las prestaciones de aerogeneradores de pequeña potencia”⁴ hace uso de un tacómetro, un anemómetro y un multímetro para tomar mediciones de su banco de ensayo con una turbina de eje horizontal, se hace mención de otros equipos de medición que no se consideraron de importancia para el desarrollo del banco de eje vertical.

² Geovo Coronado., & González Díaz. (2015). Diseño y modelamiento de la geometría del perfil alar de un aerogenerador, basado en las condiciones de viento presente en el departamento de Córdoba para la generación de potencia, 91 p.

³ Yunus Cengel. y John Cimbala. Mecánica de Fluidos, Fundamentos y Aplicaciones. Cuarta ed. 2018, p 308.

⁴ Juan Carlos Serrano Collazo. Desarrollo de un banco de ensayo para la evaluación de las prestaciones de aerogeneradores de pequeña potencia. Universidad Politécnica de Cartagena, 2011. pp. 48-58.

Juan Carlos Serrano Collazo indica en su trabajo que debe existir un elemento ubicado a una distancia calculada de la fuente de generación de viento, elemento que se usa para enderezar el flujo de viento, una simple rejilla enderezadora garantiza un flujo de viento con las características adecuadas para su disposición final sobre el aerogenerador.

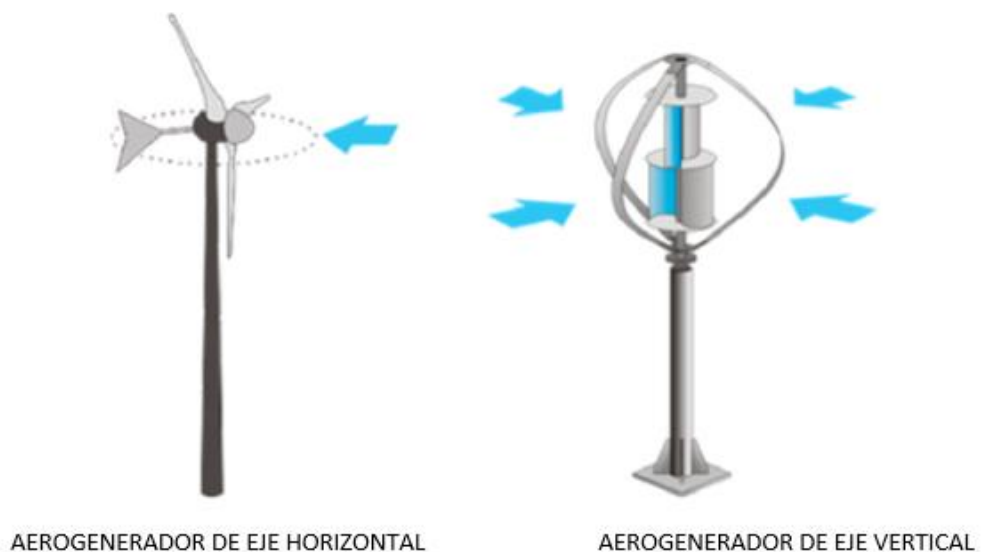
Cabe resaltar que, al realizar el presente proyecto, se está aportando a un área con pocos referentes, puesto que la bibliografía existente no menciona el uso del teorema de pi Buckingham para la obtención de un modelo de rotor Darrieus H.

1.2. MARCO TEÓRICO

1.2.1. Energía eólica: Es la energía obtenida a partir de la fuerza que llevan las corrientes de viento. Hace parte del conjunto de las energías renovables o energías amigables con el medio ambiente. Su nombre proviene del dios del viento griego Eolo. Para poder transformarla en energía útil para el ser humano, se hace uso de molinos de viento o lo que actualmente mejor conocemos como aerogeneradores, que por medio de aspas transforman la corriente de aire en un movimiento mecánico circular.

1.2.2. Aerogenerador: Un aerogenerador es un equipo que transforma la fuerza del viento (energía cinética) en energía mecánica giratoria, que posteriormente al transmitirse a un eje se convierte en energía eléctrica gracias al Efecto De Inducción De Faraday. Existen dos tipos de aerogeneradores que se clasifican según la orientación del eje de su rotor y serían; de eje horizontal y de eje vertical como se pueden apreciar en la **Figura 1**.

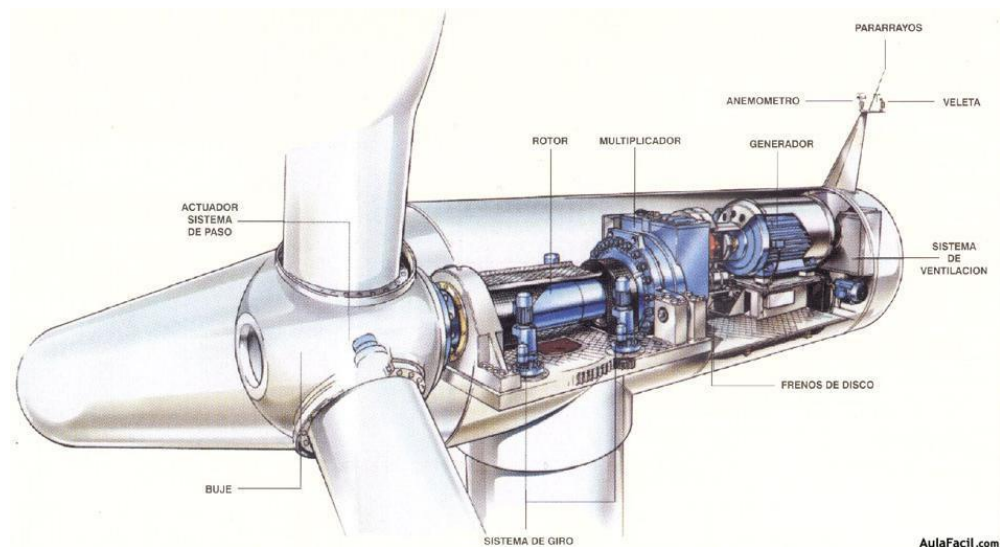
Figura 1. Aerogenerador de eje horizontal y de eje vertical.



Fuente: Dorero y García, Generador eólico de baja potencia. Universidad de Buenos Aires. 2012. Disponible en: http://diana.fadu.uba.ar/105/1/TESIS_.pdf

1.2.2.1. Aerogenerador de eje horizontal: Son de amplio uso en la industria, así como su nombre lo dice su principal característica es que el eje de su rotor se encuentra dispuesto de manera horizontal (ver **Figura 2**). Sus aspas o palas giran de forma perpendicular a la dirección de la corriente del viento, suelen ser bastante altas por esto mismo su instalación y mantenimiento se hacen costosos; por lo general son usados en campo abierto e incluso en zonas costeras tanto en tierra como sobre la superficie marina. Consta de un poste cónico o cilíndrico que sostiene la góndola, lugar en el cual se contienen todos los dispositivos encargados de transformar la energía del viento, trae consigo una caja reductora o un multiplicador, un generador eléctrico, un dispositivo de control electrónico y freno, instrumentación para la medición de las variables del viento, un orientador para cambiar la posición de las palas. Y finalmente el rotor, que está conformado por una serie de uniones y las palas o aspas.

Figura 2. Partes de un aerogenerador de eje horizontal.



Fuente: AulaFacil, Partes de un aerogenerador [Imagen]. Componentes básicos de un aerogenerador. 2020. Disponible en: <https://www.aulafacil.com/cursos/medio-ambiente/energia-eolica/partes-de-un-aerogenerador-l37049>

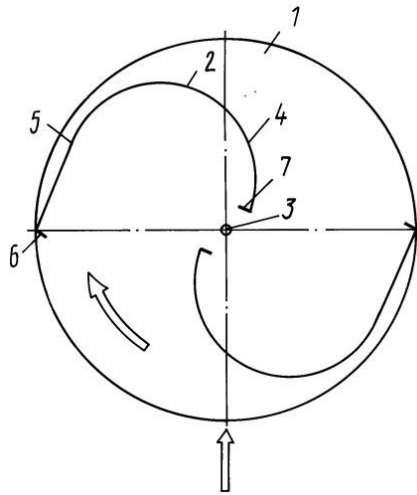
1.2.2.2. Aerogenerador de eje vertical: Al contrario de los aerogeneradores de eje horizontal, su disposición de rotor es de manera vertical girando en el mismo sentido de la dirección de la ráfaga de viento como se puede apreciar en la **Figura 1**, dando a esta, varias ventajas sobre una de eje horizontal. No es muy común ver o encontrar parques eólicos de turbinas de eje vertical, son más bien usadas en espacios urbanos y lugares donde sería imposible instalar un aerogenerador de eje horizontal. Su diseño sencillo y versátil permite una fácil instalación y disposición de sus componentes, a diferencia de un aerogenerador de eje horizontal presenta la gran facilidad de no requerir ningún sistema de orientación, puesto que sus diseños permiten que capturen el movimiento de las corrientes de viento provenientes de cualquier dirección. La ubicación de sus componentes hace que su mantenimiento sea fácil y económico.

Existen dos tipos de aerogeneradores de eje vertical, tipo Savonius y tipo Darrieus.

➤ Savonius:

Su origen se remonta al año de 1922 en Finlandia por el ingeniero Sigurd J. Savonius. El diseño del rotor es bastante sencillo, consta de dos perfiles semicirculares, sus aspas actúan como cucharas que “atrapan” en su superficie cóncava la corriente de viento del medio, de esta manera genera empuje. **Figura 3.**

Figura 3. Rotor Savonius.

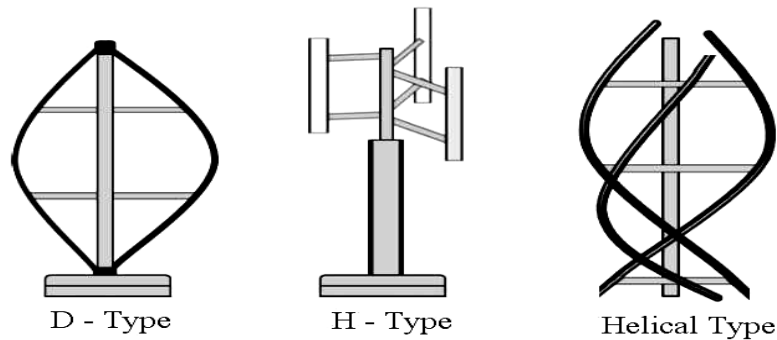


Fuente: RussianPatents. The type savonius rotor. [Imagen]. 2020. Disponible en: <https://russianpatents.com/patent/207/2073113.html>

➤ Darrieus:

De este tipo de rotor existen de tipo H, tipo D, y helicoidal. Fue diseñado y patentado por el Ingeniero aeronáutico francés Georges Jean Marie Darrieus, quien en 1926 presentó dicha patente. Su principio de operación se basa más en fundamentos aerodinámicos, haciendo cabida a conceptos como arrastre y sustentación, ángulo de ataque entre otros. Como el rotor Savonius presenta la facilidad de instalación y de mantenimiento, una de sus desventajas es que necesita de un impulso inicial para poder empezar a producir energía, por eso existen algunas configuraciones de rotores mixtos Darrieus – Savonius. **Figura 4**

Figura 4. Tipos de rotores Darrieus.



Fuente: Amlan Das. y Dr. Pradip Kumar Talapatra. Modelling and Analysis of a Mini Vertical Axis Wind Turbine. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2016.

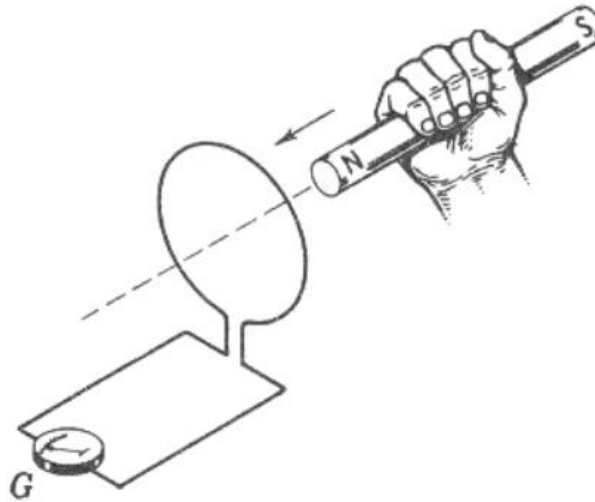
1.2.3. Ley de inducción de Faraday: Michael Faraday fue un químico y físico británico que estudió varios fenómenos electroquímicos y electromagnéticos, realizó descubrimientos importantes como lo fue la electrolisis el diamagnetismo y principalmente conocido por La Inducción Electromagnética.

Faraday en 1831 profundizó sobre las propiedades electromagnéticas de distintos materiales, así comenzó un conjunto de pruebas y experimentos que lo conducirían al descubrimiento del fenómeno de inducción electromagnética, **Figura 5**. En uno de sus laboratorios, al enrollar dos bobinas de alambre en un aro metálico llegó a concluir que al aplicar una corriente a una de dichas bobinas la otra que no recibía corriente también se cargaba de electricidad, de esta manera vislumbró que se podía generar un campo eléctrico a partir de la variación de un campo magnético.

Este descubrimiento sin saberlo Faraday, llevaría al avance en muchas tecnologías, por este gran hallazgo se considera que es uno de los científicos más importantes de la historia.⁵

⁵ María del Mar. Ley de Faraday | Inducción Electromagnética . [En línea]. espaciociencia.com. (03/06/). Disponible en: <https://espaciociencia.com/ley-de-faraday-induccion-electromagnetica/>

Figura 5. Visualización del experimento de Faraday.



Fuente: BRAUN, Eliezer. Electromagnetismo. México D. F: FCE, 2003.

1.2.4. Banco de pruebas: Un banco de pruebas es un equipo cuya función como su nombre lo dice, es realizar pruebas, son ampliamente usados en la industria especialmente cuando se están desarrollando nuevas tecnologías para ser usadas en proyectos o lanzadas al mercado, ofreciendo así datos de alta fidelidad respecto al comportamiento de los componentes del mecanismo en desarrollo o al comportamiento en general del conjunto.

En el campo de la investigación automotriz son bastante usados, siendo uno de los principales tipos de bancos desarrollados alrededor del mundo, pero así mismo también los podemos encontrar en ramas de la ingeniería como:

- Circuitos hidráulicos
- Circuitos neumáticos
- Aeronáutica
- Robótica
- Bases de datos (programación)

Así mismo el uso de dichos equipos no solo se limita al sector industrial – productivo, también se hace un fuerte uso en el área académica, con fines de enseñanza. Un banco de pruebas ofrece la visualización del comportamiento de un equipo con las mismas características, pero de mayor tamaño, esto asegura que la información dada en laboratorio es confiable y bastante cercana a la realidad.

1.2.5. Medición del viento: El viento está definido por dos características principales, las cuales son velocidad y dirección. Así para medir la velocidad del

viento es necesario usar algún tipo de principio físico, ya sea temperatura, par, presión e incluso acústica.

1.2.5.1. Anemómetro: Conocido como anemógrafo, es un instrumento meteorológico diseñado para medir la velocidad de fluidos gaseosos. Se emplea en diferentes áreas, como el vuelo de aeronaves y drones así en tareas que precisen del uso del viento o que necesiten un rango específico de velocidad.⁶

1.2.5.2. Anemómetro de hélice: Es el tipo de anemómetro más usado, hace un cálculo estimado de la velocidad del viento, basándose en el número de vueltas que da el rotor (RPM) las cuales que registra y expresa en m/s, la **Figura 6** muestra un anemómetro de hélice.

Figura 6. Anemómetro de hélice.



Fuente: Weather Station Reviews, Anemometer Buying Guide [Imagen] What Does an Anemometer Measure and How Does It Work. 2020. Disponible en: <https://weatherstationexpert.com/anemometer-buying-guide/>

1.2.5.3. Anemómetro de hilo caliente: Diferenciándose del anemómetro de hélice, este tipo de anemómetro mide con exactitud el flujo de aire a velocidades muy bajas.⁷

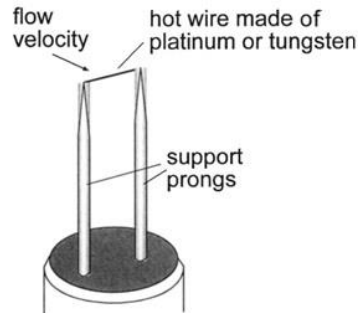
Consiste en (ver **Figura 7**) un hebra metálica caliente expuesta al paso de un flujo, este filamento se encuentra conectado a un circuito eléctrico que registra las variaciones de resistencia eléctrica por la acción del flujo. Así se puede establecer una proporción entre la velocidad del flujo y la resistencia observada en el filamento calentado.

⁶ Anemómetro, ¿Qué es un Anemómetro? [En línea]. Materiales de Laboratorio. Disponible en: <https://materialeslaboratorio.com/anemometro/>

⁷ Omega spectris company. Introducción a los anemómetros. [En línea]. OMEGA. Disponible en: <https://es.omega.com/prodinfo/anemometros.html>

El principio físico de funcionamiento se basa en el fenómeno de transferencia de calor por convección entre el hilo calentado y el flujo pasando a su alrededor.⁸

Figura 7. Anemómetro de hilo caliente.



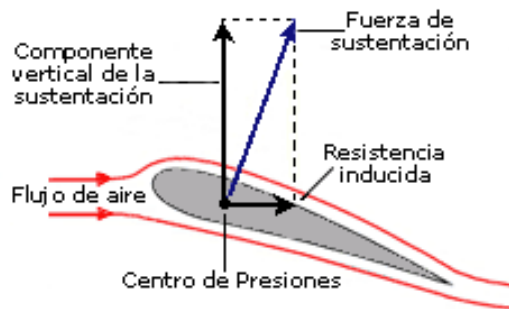
Fuente: THESIS, J. The Boundary Layer Over a Flat Plate. The Boundary Layer Over a Flat Plate.

1.2.6. Arrastre y sustentación:

1.2.6.1. Arrastre: Es la fuerza que ejerce un fluido sobre un cuerpo en la dirección del flujo. **Figura 8**

1.2.6.2. Sustentación: Fuerza de presión y tangencial en la dirección normal al flujo. **Figura 8**

Figura 8. Visualización de las fuerzas de arrastre y sustentación



Fuente: José Miguel Sánchez López Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño y Universidad Politécnica de Valencia. Diseño De Una Balanza Para Túnel De Viento. Diseño De Una Balanza Para Túnel De Viento.

1.2.7. Perfil alar: Conocido también como perfil aerodinámico, se refiere al corte que se hace al ala en forma vertical para visualizar la forma, y como dicha forma le permite desplazarse a través del aire distribuyendo las presiones que generan la sustentación, que es lo que permite a un avión sostenerse en el aire o hacer

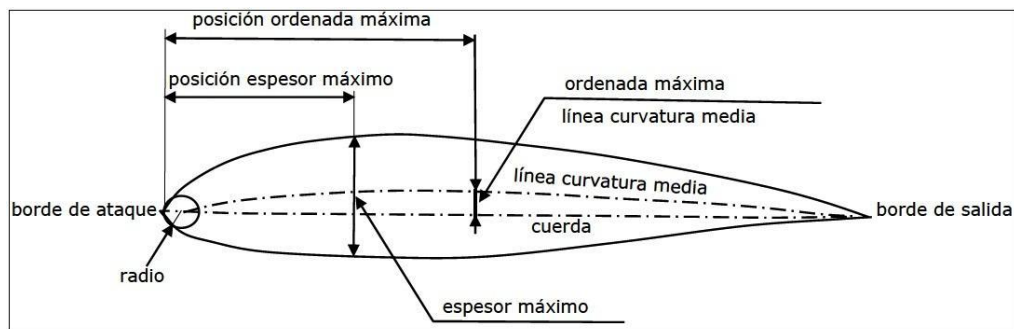
⁸ Martin Rodriguez, Patricia, et al. Utilizacion de anemometro de hilo caliente a temperatura constante para mediciones de velocidad de aire en tunel de viento. Ingeniería electrónica, automática y comunicaciones. 2014, vol. 35, nro. 1. pp. 78-92

girar un molino de viento. Según su propósito pueden variar de lo más fino a lo más grueso, entre lo curvo o simétrico e incluso variar a lo largo del ala según sea necesario. Las partes de un perfil alar se muestran en la **Figura 9**.

Así, un perfil posee diferentes características, entre las más importantes encontramos (ver **Figura 9**):

- Borde de ataque
- Borde de salida
- Radio de curvatura (del borde de ataque)
- Línea de curvatura media
- Cuerda
- Intradós
- Extradós
- Espesor máximo

Figura 9. Partes de un perfil alar



Fuente: Elías Nicolás. Directrices para elaboración de normativa acústica, asociada a la etapa de operación de parques eólicos en Chile. [En línea]. Disponible en: <https://search.datacite.org/works/10.13140/rg.2.1.3309.2721>

Los perfiles alares se pueden clasificar según:

- Sus características:

De flujo laminar.
De alta sustentación.
Auto estables
Supercríticos.

- Su forma:

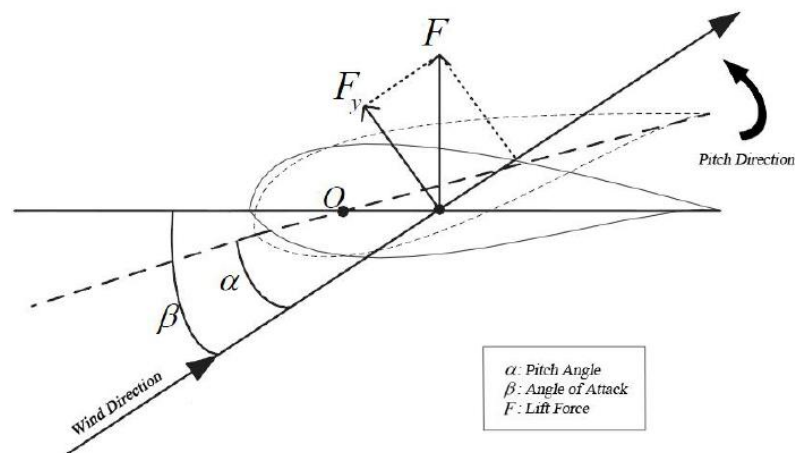
Simétricos.
Asimétricos.

- Su rango de velocidad:

Subsónicos.
Transónicos.
Supersónicos.⁹

1.2.8. Ángulo de pitch: Se define cómo el ángulo que forma la cuerda del perfil con la dirección perpendicular al radio que el alabe forma con el eje. El ángulo de Pitch toma valores positivos cuando el perfil apunta hacia el interior de la circunferencia que forma el alabe al girar, toma valores negativos cuando apunta hacia el exterior.¹⁰ La **Figura 10** muestra claramente el ángulo de pitch.

Figura 10. Ángulo de pitch.



Fuente: Pitch Control of Wind Turbines Using IT2FL Controller versus T1FL Controller [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/280822291_Pitch_Control_of_Wind_Turbines_Using_IT2FL_Controller_versus_T1FL_Controller

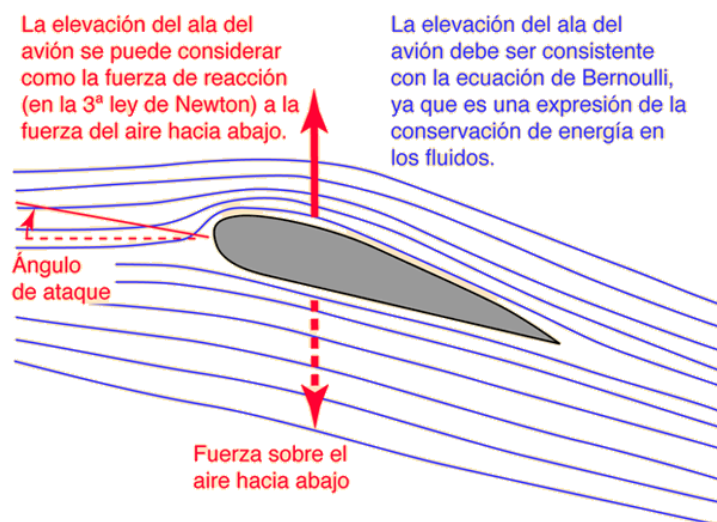
1.2.9. Ángulo de ataque: Es el ángulo formado por la cuerda del perfil y la velocidad con la que incide el viento en la pala o aspa.¹¹ Se puede apreciar gráficamente en la **Figura 11**.

⁹ Judit Arrelano Rodríguez. Perfil alar: descubre su importancia. [En línea]. ultraligeros.net. Disponible en: <https://www.ultraligeros.net/perfil-alar-descubre-su-importancia/>

¹⁰ Pérez González, Pablo. Análisis CFD de la influencia del ángulo de pitch en aerogeneradores H-Darrieus, Universidad de Valladolid, 2016, p 14.

¹¹ Legerén Álvarez, Jaime. Diseño de sistema de pitch pasivo para aerogeneradores en entornos urbanos. Universidad Politécnica de Madrid, 2014, p 32.

Figura 11. Ángulo del ángulo de ataque de un perfil aerodinámico.



Fuente: El ángulo de ataque de un perfil aerodinámico [En línea]. Disponible en: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Fluids/angatt.html>

1.2.10. Análisis dimensional: Método usado para verificar ecuaciones y planear experimentos. Con este análisis se determina una serie de grupos adimensionales que permiten usar los resultados experimentales obtenidos en situaciones restringidas, donde se tengan diferentes parámetros geométricos cinemáticos y dinámicos, y en varios casos donde las propiedades del fluido y del flujo son distintas a las trabajadas en el experimento.

En toda ecuación física, cada termino dentro de la expresión deberá tener las mismas dimensiones, a esto se le dice que la ecuación debe ser dimensionalmente homogénea, además la división de todos los términos por uno cualquiera de ellos, haría la ecuación adimensional, y cada cociente sería un grupo adimensional.

1.2.11. Teorema de π Buckingham: Este teorema establece que en un problema físico en donde existan " n " variables que incluyan " m " dimensiones diferentes; las variables se pueden agrupar en " $n-m$ " grupos adimensionales independientes. Teniendo $V_1, V_2, \dots, V_n$ como las variables que intervienen en el problema, existe una función que las relacione $f(V_1, V_2, \dots, V_n) = 0$; si $G_1, G_2, \dots, G_n$ simbolizan los grupos adimensionales que representan a las variables $V_1, V_2, \dots, V_n$; el teorema de BUCKINGHAM dice que existe una función de la forma: $g(G_1, G_2, \dots, G_n) = 0$.

El método para determinar, los grupos adimensionales ($G_i, i=1, \dots, n-m$); radica en escoger " m " de las " n " variables, con diferentes dimensiones, de manera que contengan entre todas las " m " dimensiones, y usarlas como variables repetitivas, formando cada uno de los " $n-m$ " grupos adimensionales a partir de la expresión que se observa en la **Figura 12**.

Figura 12. Expresión Genérica Teorema Buckingham.

$$G_i = V_i \cdot \prod_{j=m-n+1}^{j=n} V_j^{a_{ij}} \quad i = 1, \dots, m-n$$

Fuente: Tema 3 Análisis Dimensional 0405. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/356861804/Tema-3-Analisis-Dimensional-0405>

Los exponentes “ a_{ij} ” se establecen por la condición de que cada grupo resulte adimensional; se reemplazan las dimensiones de las variables por ellas mismas y los exponentes de M, L, T, θ , ..., se igualan a cero (adimensionalidad del parámetro).

Supongamos como ejemplo, la fuerza de arrastre en flujo externo, de un fluido sobre un objeto. La fuerza de arrastre (F_D) dependerá de: la viscosidad absoluta del fluido (μ), la densidad (ρ), la velocidad relativa entre fluido y objeto (v) y de una longitud característica del objeto (L). Cinco variables: F_D , μ , ρ , v , y L , que aportan 3 dimensiones distintas: M, L y T (Masa, Longitud, Tiempo); con lo que se tendrán $5-3=2$ grupos adimensionales:

$$G_1 = F_D L^a v^b \rho^c$$

Ecuación 1. Ej. Grupo Adimensional 1

$$G_2 = \mu_D L^d v^e \rho^f$$

Ecuación 2. Ej. Grupo Adimensional 2

Los exponentes de cada grupo se determinan a partir de sus ecuaciones dimensionales:

$$[G_1] = [F_D] [L^a] [v^b] [\rho]^c$$

$$M^0 L^0 T^0 = (MLT^{-2})(L)^a (LT^{-1})^b (ML^{-3})^c = M^{1+c} L^{1+a-b-3c} T^{2-b}$$

$$0 = 1 + c; 0 = 1 + a + b; 0 = 2 - b; \dots a = 2; b = -2; c = -1$$

Ecuación 3. Ej. Exponentes de grupos adimensionales

Así el grupo adimensional G_1 es:

$$G_1 = F_D L^{-2} v^{-2} \rho^{-1} = \frac{F_D}{L^2 v^2 \rho}$$

Ecuación 4. Ej. Expresión grupo adimensional resuelta

Y da lugar al denominado coeficiente de arrastre C_D ; se introduce el factor (1/2) para tener la presión dinámica:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho v^2 L^2}$$

Ecuación 5. Ej. Coeficiente de Arrastre C_D

De forma análoga se obtiene el segundo parámetro adimensional:

$$G_2 = \mu_D L^{-1} v^{-1} \rho^{-1}$$

Ecuación 2. Ej. Grupo Adimensional 2

Dando lugar al número de Reynolds Re .¹²

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu_D}$$

Ecuación 6. Ej. Ecuación Número De Reynolds.

1.2.12. Números adimensionales: Los números adimensionales hacen referencia a todo el conjunto de magnitudes que carecen de unidades físicas (Ej: N, m, m/s, Pa, Kg, etc.). En palabras más simples, son solo números, pero con la diferencia de que estos poseen un soporte práctico y experimental, se obtienen a partir de los resultados y conclusiones de experimentos de laboratorio. Permiten el estudio de diferentes fenómenos en diversas áreas de la ciencia y de la ingeniería, desde fenómenos de transferencia de calor hasta en mecánica de fluidos.

Existen gran cantidad de estos números, entre los números más usados y aplicados en mecánica de fluidos podemos encontrar:

- Número de Reynolds
- Número de Mach
- Número de Froude.
- Número de Euler.
- Coeficiente de arrastre.
- Coeficiente de sustentación.

1.2.12.1. Número de Reynolds: Este número adimensional se define como la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas. Permite distinguir diferentes tipos de régimen en los flujos.

¹² Martínez de la Calle, Julián. Análisis Dimensional, Universidad de Oviedo, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón, 2004, p3.

$$Re = \frac{V * L}{\nu}$$

Ecuación 7. Número de Reynolds.

1.2.12.2. Número de Mach: Es la relación entre las fuerzas de inercia y las de compresibilidad. El número de Mach indica la relación entre la velocidad de un cuerpo sumergido en un fluido y la velocidad del sonido en ese mismo fluido.

$$Ma = \frac{V}{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}$$

Ecuación 8. Número de Mach

Si $Ma > 1$ entonces el flujo es supersónico; Si $Ma = 1$ el flujo es sónico; Si $Ma < 1$ entonces el flujo es subsónico.

1.2.12.3. Número de Froude: Relación entre las fuerzas de inercia y las de gravedad. Es útil en estudio de canales abiertos, indica que tan rápido es el flujo.

$$Fr = \frac{V^2}{g * l}$$

Ecuación 9. Número de Froude.

Si $Fr > 1$ flujo rápido; Si $Fr < 1$ flujo lento.

1.2.12.4. Número de Euler: Se define como la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de presión.¹³

$$Eu = \frac{V}{\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}}$$

Ecuación 10. Número de Euler.

1.2.12.5. Coeficiente de Arrastre: Se denomina C_D al número adimensional que depende de la forma del cuerpo y su orientación respecto a la corriente del fluido. Relaciona la fuerza que se opone paralelamente al movimiento del mismo con, el área en contacto la densidad del fluido y la velocidad del cuerpo.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

¹³ Arregui de la Cruz, Francisco, et al. Apuntes de mecánica de fluidos. Editorial Universitat Politècnica de València, 2017.

Ecuación 11. Coeficiente de Arrastre.

1.2.12.6. Coeficiente de Sustentación: Se denomina C_L a la capacidad de un cuerpo para obtener sustentación a través del fluido. Es decir, la fuerza perpendicular al movimiento del objeto o cuerpo inmerso.¹⁴

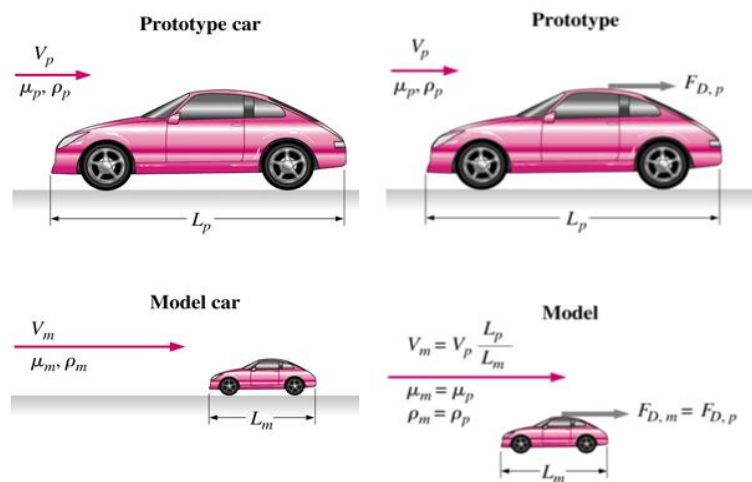
$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

Ecuación 12. Coeficiente de Sustentación.

1.2.13. Semejanza geométrica: Se establece mediante una escala de longitudes, es la razón entre las dimensiones del prototipo y modelo. **Figura 13**

1.2.14. Semejanza dinámica: Indica que dos sistemas con fronteras geoméricamente equivalentes tengan líneas de flujo geoméricamente similares, en instantes de tiempo proporcionados. Lo que implica que cada fuerza individuales que actúa sobre los elementos correspondientes de fluido tengan las mismas proporciones en los dos sistemas.¹⁵

Figura 13. Visualización, semejanza geométrica y dinámica.



Fuente: CAPITULO 6. Análisis Dimensional y Semejanza Dinámica, [En línea]. Disponible en: http://www.dicis.ugto.mx/profesores/agallegos/documentos/Cap.%207_An%C3%A1lisis%20dimensional.pdf

¹⁴ Mecanica De Fluidos Robert Mott 6ta Edicion. Mecanica De Fluidos Robert Mott 6ta Edicion.

¹⁵ Domingo i Melgosa. Estudio teórico–experimental de un sistema de disipación de energía poco habitual al pie de una caída de agua, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, 2005, pp 9-13.

2. DISEÑO DEL BANCO DIDÁCTICO.

Para llevar a cabo el diseño del banco se hizo uso del teorema Pi Buckingham y del criterio de semejanzas (dinámica y geométrica). Según las características obtenidas se hizo la selección de equipos para el desarrollo de las pruebas y prácticas de laboratorio. Una vez establecidos todos los parámetros se realizó un modelo CAD para finalmente construir el banco didáctico. el modelo de rotor obtenido para laboratorio (banco), se basó en las características geométricas de un prototipo de turbina Darrieus en H ya existente. De esta manera se enlistaron las partes de todo el conjunto se tuvo en cuenta la función y el tipo de componente, si fue diseñado o comprado, dichas características y elementos se muestran en la Tabla 1. Los componentes diseñados se muestran en el explosionado que se encuentra en el anexo A y que están relacionados con la Tabla 1 junto a los planos correspondientes.

Tabla 1. Partes del banco eólico de eje vertical

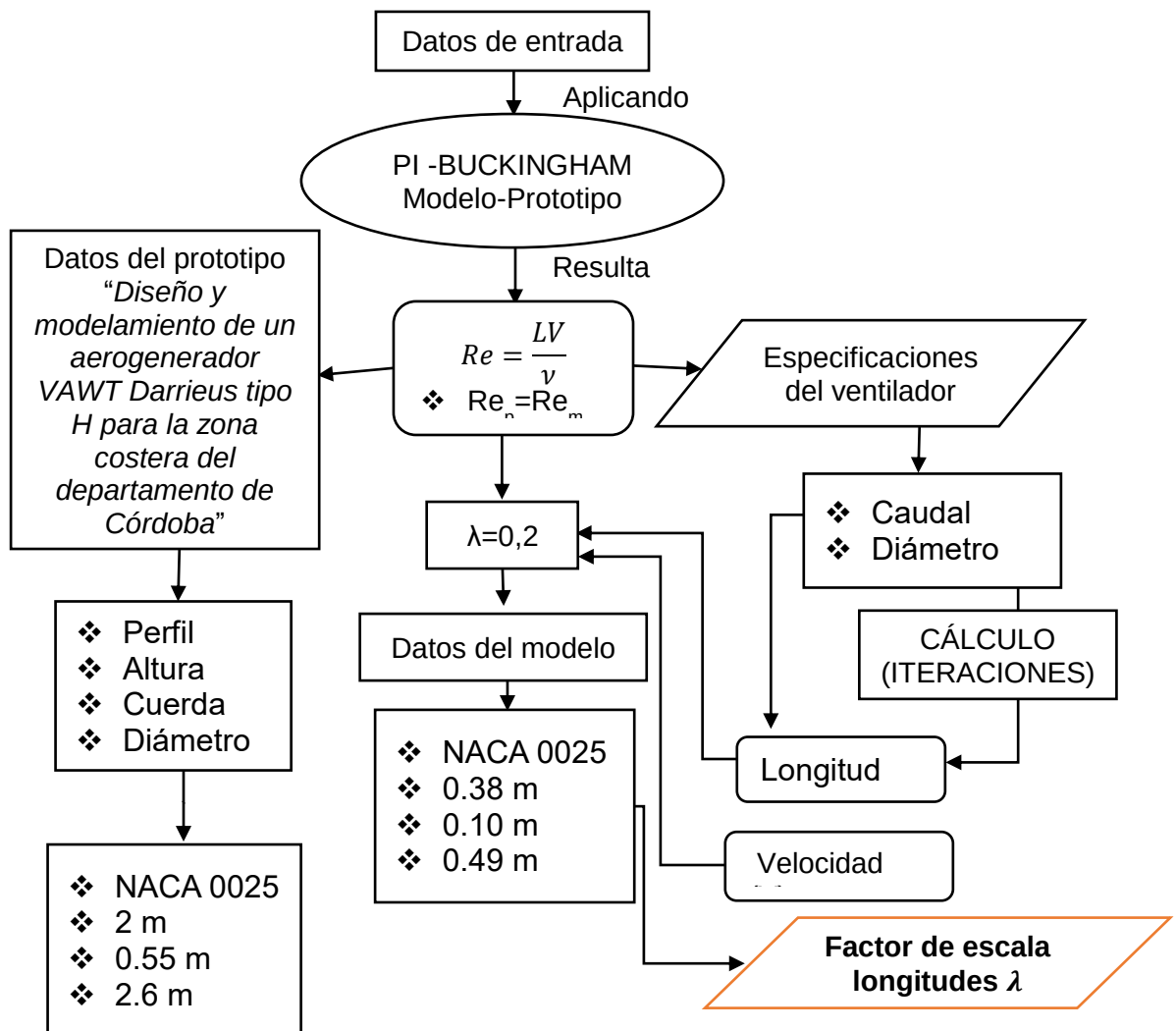
COMPONENTE	FUNCIÓN	TIPO	NUMERACIÓN
Discos	Sujeción	Diseñado	4
Láminas I & II	Sujeción	Diseñado	2 & 3
Eje	Sujeción - transmisión de potencia	Diseñado	5
Perfil aerodinámico	Generar sustentación y rotación	Diseñado	1
Tuercas	Ajuste	Compra bajo catálogo	8
Tornillos	Ajuste	Compra bajo catálogo	6 & 7
Generador eléctrico	Dispositivo generador de potencia eléctrica	Compra bajo catálogo	-
Túnel de viento	Direccionamiento del flujo	Diseñado	2
Estructura metálica	Soporte	Diseñado	1
Ventilador	Generación de flujo	Compra bajo catálogo	6
Variador	Control	Compra bajo catálogo	-
Tacómetro	Medición	Compra bajo catálogo	-
Multímetro	Medición	Compra bajo catálogo	-
Anemómetro	Medición	Compra bajo catálogo	-

Fuente: Elaboración propia.

2.1. METODOLOGÍA PLANTEADA:

Siguiendo la metodología planteada en la **Figura 14** se muestra el proceso del desarrollo del modelo de turbina de eje vertical a través del teorema Pi Buckingham, de esta manera se obtuvieron los parámetros que gobernarían el desarrollo del modelo.

Figura 14. Flujograma de la metodología.



Fuente: Elaboración propia.

Las características geométricas extraídas del prototipo; radio, altura, cuerda y perfil, corresponden a un aerogenerador de eje vertical fabricado por Leonardo Geovo y Alan González, dichos datos de prototipo fueron usados para la aplicación del teorema Pi Buckingham y las leyes de semejanza.

2.2. APLICACIÓN DEL TEOREMA PI BUCKINGHAM:

Al aplicar el teorema, fue necesario hacer la identificación de las variables que influyen en el “desarrollo”, en este caso lo son:

- Características geométricas. (longitud, L)
- Características dinámicas. (velocidad, V)
- Características del fluido. (viscosidad, ν)

Así se hizo el listado de cada una de las categorías ya mencionadas anteriormente y se obtuvieron los parámetros n de la siguiente manera:

- C. geométricas: Diámetro (D), altura (A). (m)
- C. dinámicas: Velocidad de viento (V). (m/s)
- C. del fluido: Viscosidad cinemática (ν). (m^2/s)

Por lo tanto, como se observa n será igual a 4.

Se realizó la lista de las dimensiones primarias de cada uno de los parámetros n . Ecuación 13.

$$D [m^1]; A [m^1]; V [m * s^{-1}]; \nu [m^2 * s^{-1}]$$

Ecuación 13. Dimensiones primarias de parámetros M.

Establecer una reducción j (parámetros repetitivos) como el número de dimensiones primarias ($j = 2$), posteriormente calcular un número de parámetros adimensionales K .

$$K = n - j$$
$$K = 4 - 2 = 2$$

Ecuación 14. Parámetros adimensionales K .

Formar los grupos adimensionales usando K , combinando los parámetros repetitivos con el parámetro restante. Agregar exponentes buscando lograr la cancelación de unidades. Quedando así organizados de la siguiente manera como se muestra en la Ecuación 15 y Ecuación 16

$$\pi_1 = D * A^{a_1} * V^{b_1}$$

Ecuación 15. Grupo adimensional 1.

$$\pi_2 = \nu * A^{a_2} * V^{b_2}$$

Ecuación 16. Grupo adimensional 2.

Escribimos los parámetros en unidades básicas e igualamos los grupos adimensionales con las dimensiones primarias con exponente igual a cero, para forzar a π a ser adimensional.

Usando la Ecuación 16 se describirá el proceso.

$$[L^0 T^0] = [L^2 * T^{-1} * L^{a_2} * (L^1 * T^{-1})^{b_2}]$$

Ecuación 17. Grupo adimensional 2, unidades.

Separamos para unidades de longitud y de tiempo, igualamos.

$$[L^0] = [L^2 * L^{a_2} * L^{b_2}]$$

Ecuación 18. Separación de variables, Longitud.

Operamos exponentes de la siguiente manera.

$$[0] = [2 + a_2 + b_2]$$

Ecuación 19. Expresión exponentes subíndice 2.

Procedemos de la misma manera para la segunda dimensión, tiempo.

$$\begin{aligned} [T^0] &= [T^{-1} * T^{-b_2}] \\ [0] &= [-1 - b_2] \\ [b_2] &= [-1] \\ [a_2] &= [-1] \end{aligned}$$

Ecuación 20. Exponentes del grupo adimensional 2.

Reemplazamos los valores de los exponentes obtenidos en la Ecuación 16, de esta manera tenemos que.

$$\pi_2 = \nu^1 * A^{-1} * V^{-1}$$

Ecuación 21. Reemplazo exponentes grupo adimensional 2.

$$\begin{aligned} \pi_2 &= \frac{\nu}{A * V} \\ &\Downarrow \\ \pi_2 &= \frac{A * V}{\nu} \end{aligned}$$

Ecuación 22. Expresión obtenida, Número de Reynolds.

Aplicamos el mismo procedimiento para la Ecuación 15 y de esta manera obtenemos la segunda ecuación que corresponde a un factor de escalas.

$$\pi_1 = \frac{D}{A}$$

Ecuación 23. Expresión obtenida. Factor de escala.

Así se estableció cada grupo adimensional para modelo (m) y prototipo (p) de la siguiente manera.

$$\pi_{m1} = \frac{D_m}{A_m} ; \pi_{p1} = \frac{D_p}{A_p}$$

Ecuación 24. Grupo adimensional 1 para modelo y prototipo.

$$\pi_{m2} = \frac{A_m * V_m}{\nu} ; \pi_{p2} = \frac{A_p * V_p}{\nu}$$

Ecuación 25. Grupo adimensional 2 para modelo y prototipo.

2.3. OBTENCIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL MODELO:

El concepto de semejanza, menciona que dos cuerpos con dimensiones diferentes pero semejantes entre sí, pueden manifestar el mismo comportamiento al ser sometidos a un entorno dinámico, esto siempre y cuando conserven relaciones geométricas y dinámicas entre ellos, de esta manera para cumplir con el objetivo de recrear el comportamiento de un aerogenerador nos basamos en las características geométricas de un prototipo de rotor Darrieus H, cuyo diseño fue llevado a cabo por Leonardo Geovo y Alan González, dimensiones que se presentan a continuación:

- Altura: 2 m; A_p
- Diámetro: 2.6 m; D_p
- Perfil aerodinámico: NACA 0025
- Cuerda del perfil: 0.55 m¹⁶

Se estableció una altura fija para el modelo debido a que la elaboración del mismo estuvo limitada por la capacidad de las máquinas y equipos disponibles en el laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Universidad Santo Tomás Tunja,

¹⁶ Geovo Coronado., & González Díaz. (2015). Diseño y modelamiento de la geometría del perfil alar de un aerogenerador, basado en las condiciones de viento presente en el departamento de córdoba para la generación de potencia, p 64.

lugar donde se realizó la producción y construcción del banco eólico didáctico. De esta manera se tomó una referencia de altura máxima de maquinado en el centro de mecanizado CNC.

Para facilitar los cálculos se programó un Excel con las ecuaciones anteriormente demostradas, de esta manera las variables de salida se manipularon con mayor comodidad, dichas variables fueron ajustadas respecto a la capacidad de los equipos del laboratorio y a las características de los implementos para realizar las prácticas y laboratorios con el banco.

Usando diferentes valores de altura en la hoja de cálculo de Excel se observó que, al reducir este parámetro, la velocidad de viento requerida para cumplir con la semejanza dinámica tomaba un valor bastante alto para ser alcanzado con los equipos disponibles en laboratorio.

De esta manera y de acuerdo con la limitación de fabricación por maquinaria se estableció el valor fijo de altura con el cual se procedería a realizar los cálculos correspondientes para determinar las demás dimensiones de la siguiente manera.

$$A_m = 0.38 \text{ m}$$

Ecuación 26. Altura del modelo.

Igualamos el grupo adimensional 1 para despejar y obtener D_m , tenemos que.

$$\begin{aligned}\pi_{m1} &= \frac{D_m}{A_m} = \pi_{p1} = \frac{D_p}{A_p} \\ D_m &= \frac{D_p}{A_p} * A_m ; A_p = 2 \text{ m} ; D_p = 2.6 \text{ m} \\ D_m &= \frac{2.6 \text{ m}}{2 \text{ m}} * 0.38 \text{ m} = 0.494 \text{ m}\end{aligned}$$

Ecuación 27. Diámetro del modelo.

Teniendo el valor de diámetro del modelo y del prototipo podemos calcular el factor de escala para determinar la variable restante, la cuerda del perfil aerodinámico.

$$\lambda = \frac{D_m}{D_p} = \frac{0.494 \text{ m}}{2.6 \text{ m}} = 0.19$$

Ecuación 28. Factor de escala.

De esta manera se presentan las dimensiones del modelo en la Tabla 2.

Tabla 2. Dimensiones del modelo obtenido.

DIMENSIONES DEL MODELO	
ALTURA (m)	0,38
CUERDA (m)	0,1045
DIÁMETRO (m)	0,494

Fuente: Elaboración propia.

2.3.1. Número de Reynolds y velocidad de viento: Con el segundo grupo adimensional se determinó el valor de velocidad de viento; de esta manera tomamos que el número de Reynolds del modelo debe ser igual al del prototipo para cumplir con el requisito de semejanza dinámica.

$$Re_m = \frac{A_m * V_m}{\nu} = Re_p = \frac{A_p * V_p}{\nu}$$

$$V_m = \frac{A_p}{A_m} * V_p$$

Ecuación 29. Velocidad de viento para modelo.

La velocidad de viento para esta aplicación será de una zona en la que el viento corre a 3 m/s. Por lo tanto, la velocidad de viento requerida en laboratorio será.

$$V_m = \frac{2 \text{ m}}{0.38 \text{ m}} * 3 \text{ m/s} = 15.78 \text{ m/s}$$

Ecuación 30. Valor de velocidad de viento para modelo.

De esta manera se seleccionó el equipo de generación de viento más adecuado para la aplicación, así como se detalla en el siguiente numeral.

2.4. DISEÑO DEL ROTOR:

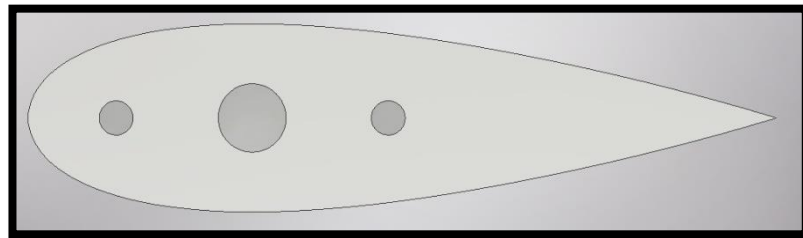
Una vez establecidas las medidas (cuerda, altura, diámetro) y características como el perfil aerodinámico y el número de aspas. Se procedió a plantear un diseño del modelo que incluyó un sistema que permitiera desacoplar el rotor de la base para la instalación y uso de diferentes rotores, de igual manera la estructura soporte de las aspas permitirá el cambio del ángulo de ataque de las mismas. El rotor consta de piezas que fueron fabricadas y unidas entre sí con tornillería.

2.4.1. Sistema de acople a la base del banco – Varilla roscada: Para facilitar el ensamble del rotor a la base, se usó una varilla roscada que permitiera sujetar al rotor de manera firme, para asegurar que durante el funcionamiento del mismo

no se desajustara se usaron dos tuercas a manera de contratuerca en cada uno de los extremos para asegurarlo. Esto facilita el proceso de instalación y desinstalación, así también es una manera efectiva y sencilla para lograr el uso de diferentes rotores sin mayor inconveniente.

2.4.2. Modificación del ángulo de ataque (β) – Perfil aerodinámico: Para facilitar el cambio del ángulo de ataque del perfil aerodinámico se realizaron perforaciones en el centro del mismo y en los extremos en la parte superior. De tal manera que existen dos agujeros de 10 milímetros ubicados al centro en cada uno de los extremos, y dos agujeros de 5 milímetros en la cara superior para facilitar la sujeción a diferentes ángulos de ataque, comprendidos entre 0° y 30° , como se observa en la **Figura 15**.

Figura 15. Agujeros en perfil para modificación del A. ataque.



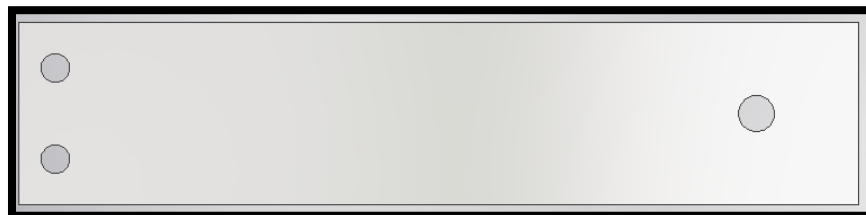
Fuente: Elaboración propia.

2.4.3. Láminas sujetadoras: Seis láminas de aluminio permiten asegurar el perfil NACA a su posición de trabajo. De esta manera se realizó el diseño y construcción de tres laminas que poseen unos pequeños radios en uno de sus extremos (**Figura 16**), permitiendo un recorrido semicircular que barre ángulos comprendidos entre 0 y 30 grados; y tres laminas más que poseen agujeros sencillos en sus extremos, como se observa en la **Figura 17**.

Figura 16. Lámina con radios (CAD).



Figura 17. Lámina sencilla (CAD).



Fuente: Elaboración propia.

2.4.4. Discos de sujeción: Para poder realizar con facilidad la sujeción de las láminas y asegurar el eje roscado a su correspondiente posición, se diseñaron y construyeron dos discos de acero, poseen un agujero central que permite el paso de la varilla roscada, y agujeros dispuestos a 120 grados de distancia entre sí; de 8 milímetros de diámetro que coinciden con las seis láminas que de la misma manera poseen agujeros de 8 milímetros de diámetro en uno de sus extremos permitiendo atornillarse entre discos y láminas. El modelo se muestra en la **Figura 18**.

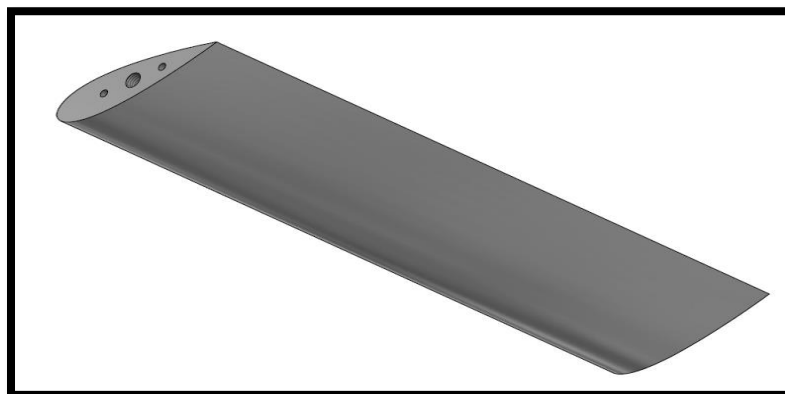
Figura 18. Disco de sujeción modelo CAD.



Fuente: Elaboración propia.

2.4.5. Perfil aerodinámico (NACA 0025): El perfil seleccionado por criterio de diseño y disposición de información fue un perfil simétrico NACA 0025, ver Figura 19, teniendo una cuerda de 10 cm, un espesor en su parte más gruesa de 27 mm y una altura de 38 cm. Se realizó maquinado sobre él para permitir la sujeción a las láminas sujetadoras. **Figura 19**

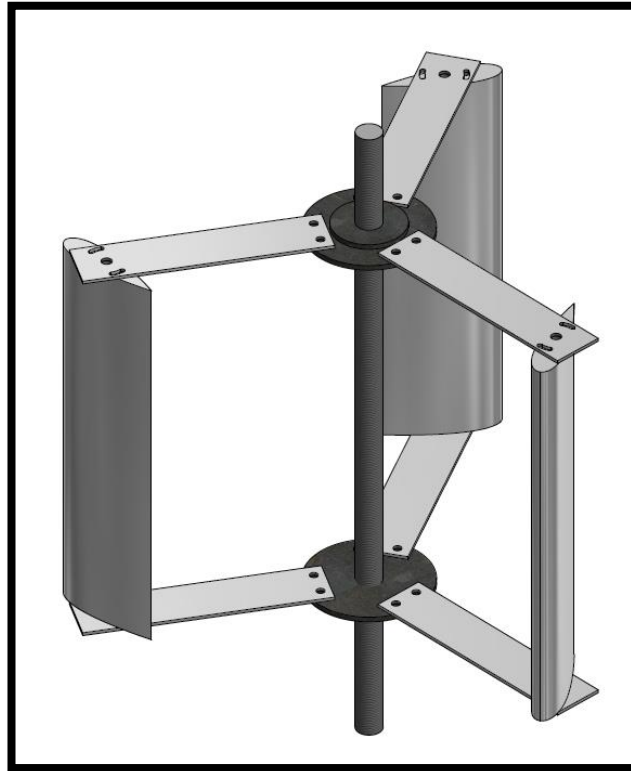
Figura 19. Modelo CAD Perfil NACA 0025.



Fuente: Elaboración propia.

2.4.6. Modelo CAD del Rotor ensamblado: El modelo CAD del rotor ensamblado se puede observar en la **Figura 20**

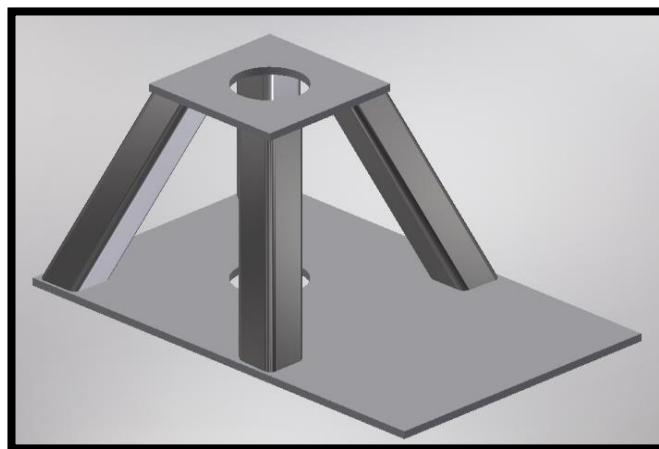
Figura 20. CAD del rotor ensamblado.



Fuente: Elaboración propia.

2.4.7. Modelo CAD de la estructura soporte del rotor: Para soportar el peso del rotor, se diseñó una estructura a modo piramidal, como se puede observar en la **Figura 21**

Figura 21. Estructura aerogenerador.



Fuente: Elaboración propia.

2.5. SELECCIÓN DEL VENTILADOR:

Fue necesario identificar los equipos de generación de viento disponibles en laboratorio y comprobar la velocidad máxima que podían producir, para hacer la medición se realizó una práctica tomando valores de velocidad de viento a diferentes distancias y bajo diferentes configuraciones de los equipos. Se usó una cinta métrica y un anemómetro de hélice. Arreglando la información como se muestra en la **Tabla 3** y **Tabla 4**

Tabla 3. Velocidad de viento equipo 1.

EQUIPO 1 (SOPLADORA)		
DISTANCIA (m)	VELOCIDAD (m/s)	
	#VELOCIDAD	VELOCIDAD(m/s)
0,5	1	10
	2	12,2
	3	14,1
	4	16
	5	17
	6	18,4
	7	23,5
1	1	5,6
	2	6,4
	3	7
	4	8,1
	5	9,4
	6	10
	7	11,5
1,5	1	5
	2	5,3
	3	6
	4	6,5
	5	7,1
	6	9,1
	7	9,9
2	1	2,8
	2	3,1
	3	3,4
	4	5
	5	5,9
	6	6,1
	7	7

Tabla 4. Velocidad de viento equipo 2.

EQUIPO 2 (COMPRESOR)		
DISTANCIA (m)	VELOCIDAD (m/s)	
	Máx	Min
0,5	8,25	5,1
1	6,1	2,4
1,5	5,4	2
2	4,1	1,5

Fuente: Elaboración propia.

Al realizar la práctica con los dos equipos para generación de viento disponibles en las instalaciones del laboratorio de ingeniería mecánica, se determinó que dichos equipos no presentaban las características adecuadas para ser usados como parte del banco eólico didáctico, puesto que, a pesar de obtener una velocidad más alta a la requerida, este no tenía un área conveniente para que el viento abarcara la superficie completa del rotor. Lo mismo ocurrió con el compresor y en segunda instancia este no fue capaz de alcanzar la velocidad requerida para cumplir con los lineamientos establecidos.

Tras realizar una revisión se encontró que el equipo más adecuado para las condiciones establecidas sería un ventilador industrial de eje axial. Se procedió a hacer consulta y cotización de diferentes ventiladores, para seleccionar el más adecuado y ajustado al presupuesto disponible, cómo se muestra en la **Tabla 5** (otorgado por la universidad Santo Tomás Tunja)

Para la selección del equipo se tuvo en cuenta el diámetro de la hélice y el caudal generado por cada equipo, con estos dos valores se hizo el cálculo de una velocidad de viento

Tabla 5. Ventilador Seleccionado.

EX - AIRE S.A.S.				
MOTOR / ESPECIFICACIÓN	DIÁMETRO (m)	ÁREA DE VENTILACIÓN (m ²)	CAUDAL (m ³ /h)	VELOCIDAD (m/s)
TRIFÁSICO 2HP (1700 RPM)	0,635	0,316692174	21060	18,47219626

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa, la velocidad calculada es superior a la velocidad requerida; para poder manipular la velocidad del ventilador se hizo la compra de un equipo para variador, lo cual se explica en el siguiente numeral.

2.6. SELECCIÓN DE CONTROL DE VELOCIDAD:

De la misma forma, para la selección de este equipo se tuvo en cuenta el presupuesto disponible (otorgado por la universidad Santo Tomás Tunja), y las características del motor del ventilador. Se siguió la misma metodología para la selección del equipo de tal manera la información encontrada y cotizaciones se organizaron en una tabla de Excel. Y las características principales del variador seleccionado se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Variador de velocidad.

VARIADORES DE VELOCIDAD		
MARCA	CARACTERÍSTICAS	
ELECTROMECAÁNICA & AUTOMATIZACIÓN IND	2HP - 220 VAC TRIFÁSICO 600HZ	

Fuente: Elaboración propia.

El equipo fue adquirido con la finalidad de regular la salida de velocidad de viento, para poder trabajar con los 15.78 m/s obtenidos en los cálculos.

2.7. ELEMENTOS DE MEDICIÓN SELECCIONADOS:

Para medir las variables de interés y asegurar el cumplimiento del valor de velocidad requerido, se hizo la selección de los siguientes elementos herramientas de medición:

- Anemómetro.
- Termómetro.
- Tacómetro.
- Multímetro.

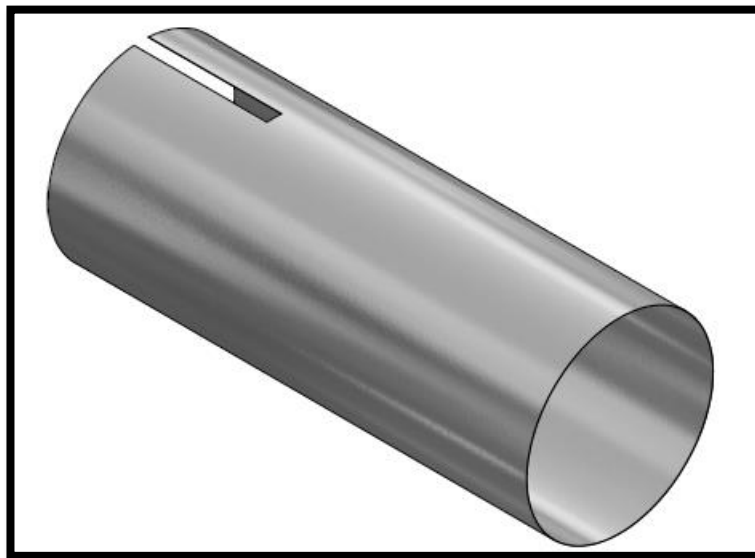
De esta manera se obtienen y leen los datos de salida con mayor facilidad.

2.8. DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS:

Para poder realizar las pruebas, se diseñó un túnel de viento que permite el flujo uniforme del aire generado por el ventilador, de esta manera para dar soporte al túnel y al ventilador se diseñó una estructura metálica. Dicha estructura se levantó en perfil CR cuadrado, cuyo espesor y dimensiones fueron elegidos y calculados para todo el conjunto.

2.8.1. Túnel de viento: Consta de una lámina rolada que forma un cilindro hueco de 1.5 milímetros de espesor, cuyo diámetro interior es de 70 cm y posee una longitud de 1.80 m. En su interior se dispuso una malla que cumple el propósito de enderezar el flujo de aire a través del túnel. La distancia del túnel se calculó teniendo en cuenta la longitud de desarrollo de flujo turbulento. El diámetro mínimo calculado en la Ecuación 31, se eligió un diámetro que se adecuara al valor mínimo del mismo y así mismo para que las paredes del túnel no interfirieran con el desplazamiento del rotor, como podemos apreciar en la **Figura 22** se observa el modelo CAD del túnel de viento.

Figura 22. Modelo CAD del túnel de viento.

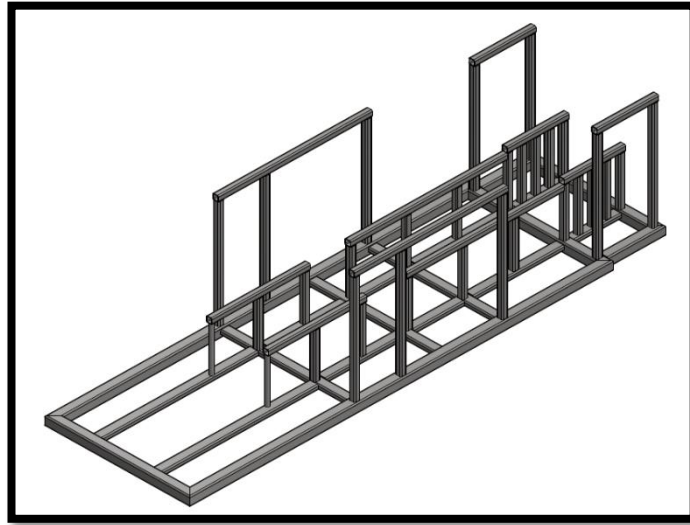


Fuente: Elaboración propia.

La muesca que se observa en la estructura tubular, permite el desplazamiento del rotor hacia dentro y fuera del mismo túnel de viento.

2.8.2. Estructura metálica o esqueleto del banco: Las medidas seleccionadas para la estructura se realizaron teniendo en cuenta la longitud y diámetro del túnel y ventilador seleccionado. Los planos de la estructura se pueden encontrar en anexos. La estructura diseñada se puede apreciar en la **Figura 23**

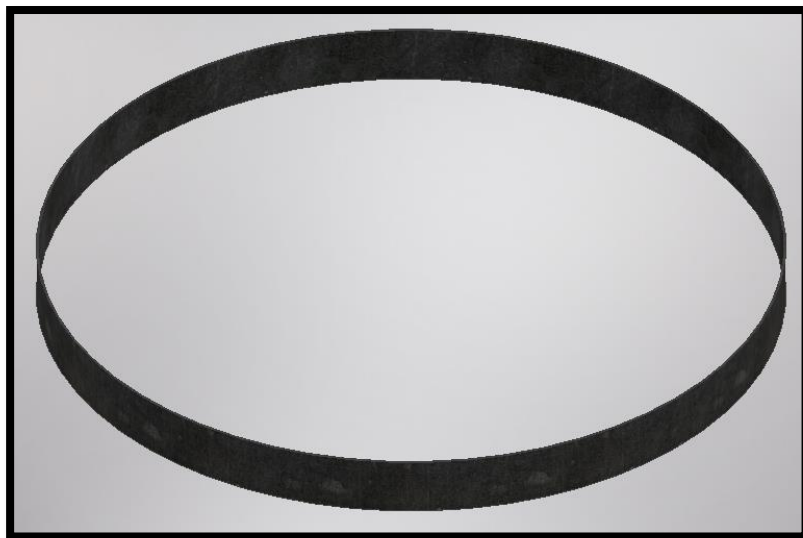
Figura 23. Modelo CAD de la estructura del banco de pruebas.



Fuente: Elaboración propia.

2.8.3. Anillos de sujeción del túnel y del ventilador (opcional): Para facilitar la unión entre el túnel de viento-ventilador y la estructura metálica, se dispuso opcionalmente de unos anillos de acero para realizar la sujeción de los elementos en mención con el esqueleto metálico. Así podemos observar el anillo mencionado en la **Figura 24**

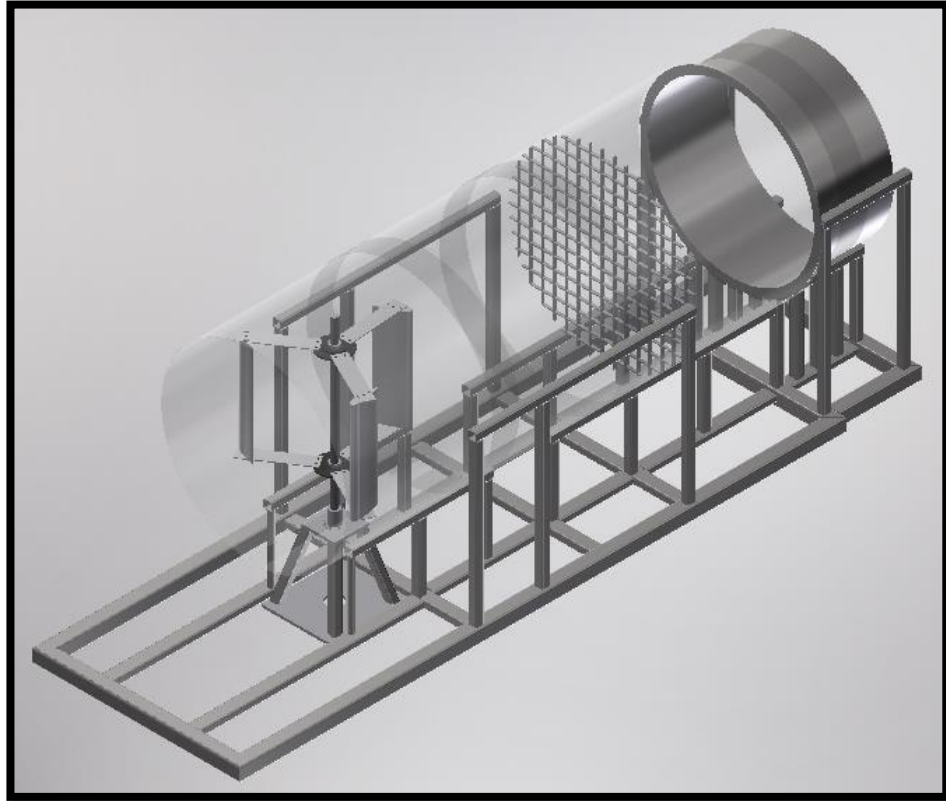
Figura 24. Anillo de sujeción.



Fuente: Elaboración propia.

2.8.4. Modelo CAD del banco didáctico de turbina de eje vertical: Finalmente se obtuvo el modelo CAD que se puede apreciar en la **Figura 25** en donde se ve el conjunto de los elementos ensamblados y en su interior el modelo de turbina eólica de eje vertical

Figura 25. Modelo CAD del Banco didáctico eólico de eje vertical.



Fuente: Elaboración propia.

El diámetro y la longitud del túnel se calcularon con la Ecuación 31 y la Ecuación 32, teniendo en cuenta que el flujo es de carácter turbulento, para lo cual asumimos un numero de Reynolds crítico (Re_{cr}) de 5×10^5 , momento en el cual ocurre el desprendimiento de la capa límite. Reemplazando los valores de velocidad requerida (15.78 m/s), y las características del aire a temperatura ambiente. Cabe resaltar que a esta misma dista (X_{cr}), se dispuso del enderezador de flujo.

$$D = \frac{Re * \nu}{v}; \frac{3.87 \times 10^5 * (1.55 \times 10^{-5} m^2/s)}{15.78 m/s} = 0.3749 m$$

Ecuación 31. Diámetro mínimo del túnel de viento.

$$X_{cr} = \frac{Re_{cr} * \nu}{v}; \frac{5 \times 10^5 * (1.55 \times 10^{-5} m^2/s)}{15.78 m/s} = 0.4843 m$$

Ecuación 32. Distancia de desenvolvimiento del flujo turbulento.

2.9. CONSTRUCCIÓN DEL BANCO

2.9.1. Túnel de viento: Una vez establecidos los parámetros de diseño se procedió a realizar la construcción del túnel de viento, que consta de láminas de 1.2 mm de grosor roladas y soldadas para poder generar el ducto de ventilación. Para este procedimiento se rolaron dos láminas que fueron soldadas por la mitad, como se aprecia en la **Figura 26** se usaron refuerzos para evitar que dichas laminas fueran a perder su forma, de la misma manera estos refuerzos fueron usados para sujetar el túnel de viento a la estructura metálica soporte.

Figura 26. Láminas con refuerzo



Fuente: Elaboración propia.

Una vez soldadas las láminas mostradas en la figura anterior se obtuvo un túnel de viento sólido, cómo lo muestra la **Figura 27**,

Figura 27. Túnel de viento.



Fuente: Elaboración propia.

Se dispuso de una malla para enderezar el flujo que atravesaría el túnel de viento, así dentro de dicha construcción se soldó este elemento de enderezamiento de flujo obteniendo la pieza mostrada en la **Figura 28**.

Figura 28. Malla enderezadora.



Fuente: Elaboración propia

2.9.2. Estructura metálica: Las medidas anotadas sobre planos (anexos), se siguieron con cautela y rigurosidad para poder obtener una estructura metálica lo más ajustada y perfecta posible, de esta forma los elementos soportados en ella se asegurarían de manera correcta. Como se observa ver en la **Figura 29** se hizo el montaje de prueba del túnel de viento comprobando así que dicha estructura lo soporta y se ajusta a las medidas establecidas previamente en la fase de diseño.

Figura 29. Estructura metálica de soporte.



Fuente: Elaboración propia

Una vez elaboradas cada una de las partes que compone el banco se hizo el correspondiente montaje y aseguramiento del túnel de viento y el ventilador a la estructura metálica.

De esta manera se procedió a realizar el mecanizado de los componentes del aerogenerador.

2.10. CONSTRUCCIÓN DEL AEROGENERADOR

De la misma forma el proceso de construcción del aerogenerador se dividió según las partes que lo componen, a continuación, se muestra el detalle de la elaboración de cada una de las piezas.

2.10.1. Discos de sujeción: Una vez el diseño establecido en CAD, se elaboraron los planos sobre los cuales se mecanizarían dos discos de acero que se muestran en la **Figura 30** como se puede apreciar, poseen agujeros en ellos, dispuestos a 120° uno de otro, en los cuales se sujetan las platinas que a su vez sujetan los perfiles aerodinámicos.

Figura 30. Discos de sujeción.





Fuente: Elaboración propia

2.10.2. Láminas sujetadoras: Para acoplar los discos y poder darle rigidez al aerogenerador se mecanizaron seis platinas de aluminio, tres de ellas con radios en sus extremos (para modificar ángulos de ataque del aerogenerador), y las restantes con agujeros sencillos, se aprecia en la **Figura 31** los arcos mencionados y en la **Figura 32** las platinas sencillas.

Figura 31. Lámina sujetadora con arcos.

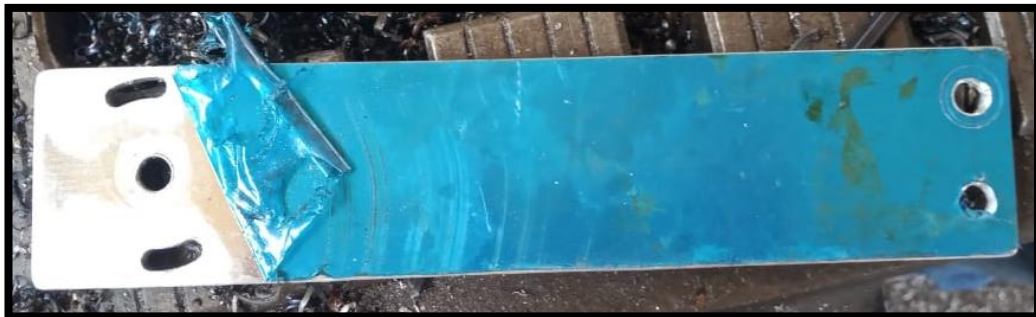


Figura 32. Lámina sujetadora sencilla.



Fuente: Elaboración propia

2.10.3. Estructura soporte piramidal: El rotor se apoya sobre dos rodamientos ubicados en una base de forma piramidal, uno en la parte superior de la estructura y uno en la parte inferior, así mismo en dicha base se apoyaría una planta generadora de energía. La estructura se muestra en la **Figura 33**.

Figura 33. Estructura piramidal.



Fuente: Elaboración propia

2.10.4. Eje roscado: Se usó una varilla lisa a la cual se le realizó un roscado en uno de sus extremos. Como se muestra en la **Figura 34** se ve uno de sus extremos roscados y los diferentes diámetros que posee.

Figura 34. Eje roscado.



Fuente: Elaboración propia

2.10.5. Álabes NACA 0025: Se mecanizaron los álabes sobre 3 bloques de aluminio fundido de 42 cm x 12 cm x 4 cm (**Figura 35**)

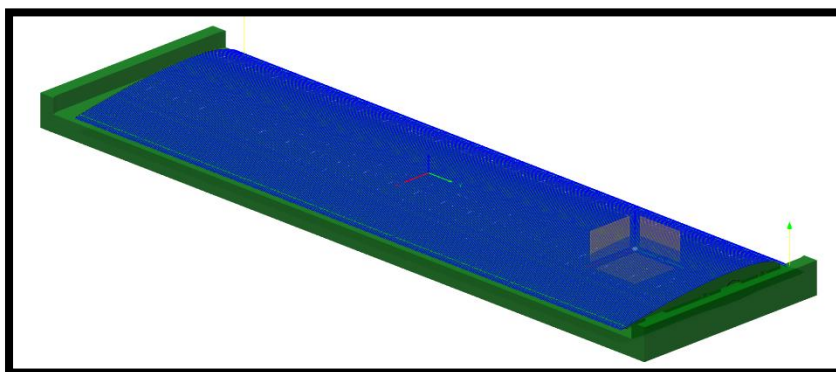
Figura 35. Bloques de aluminio.



Fuente: Elaboración propia

Se hizo uso del centro de mecanizado del laboratorio de la facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Santo Tomás Tunja, para ello primero se realizó el modelo en CAD (**Figura 19**), y posteriormente en el software FUSION 360 se realizó el post-procesado del perfil alar, obteniendo el código G (ver anexo B), y como primer resultado la pieza que se muestra en la **Figura 36**

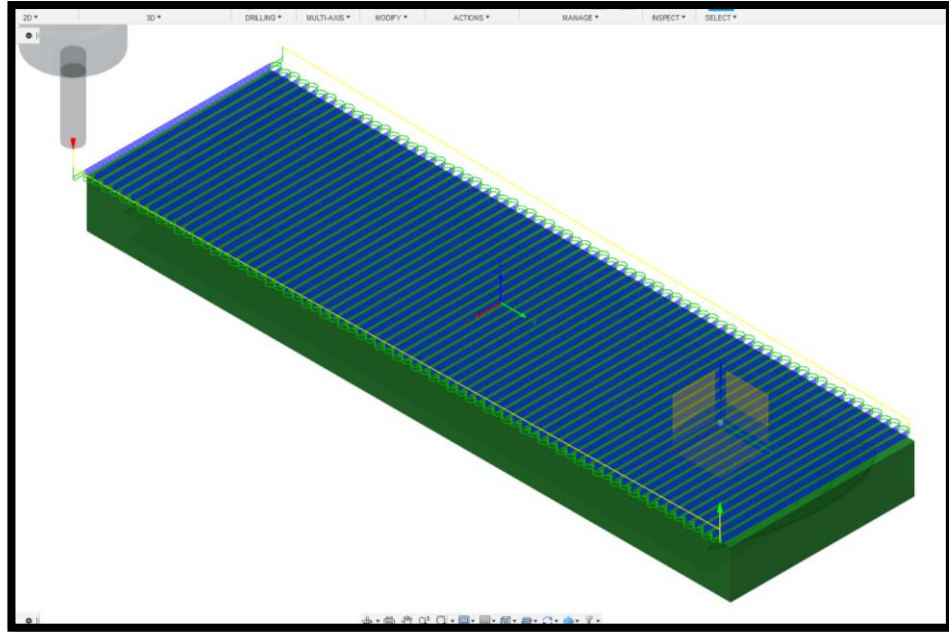
Figura 36. Post Procesado del perfil alar.



Fuente: Elaboración propia

De esta manera, el proceso se dividió en 3 etapas, primero un aplanado de las caras, segundo un desbaste grueso (rampa) y finalmente un acabado superficial. Como se muestra en la **Figura 37** primero se realizó un aplanado sobre el stock de material.

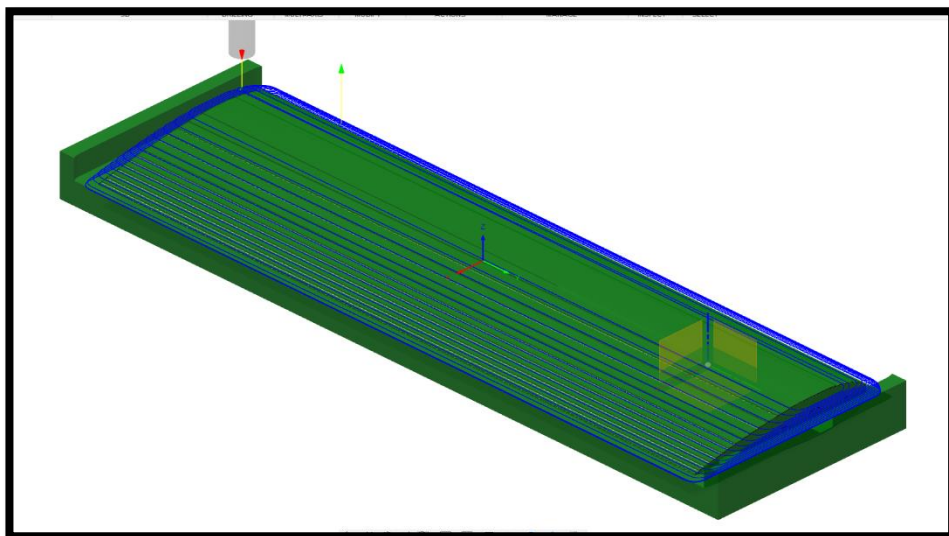
Figura 37. Aplanado de las caras del material (FUSION 360)



Fuente: Elaboración propia

Seguido a este paso se procedió a realizar el mecanizado de desbaste (rampa) obtenido lo que se puede apreciar en la **Figura 38**.

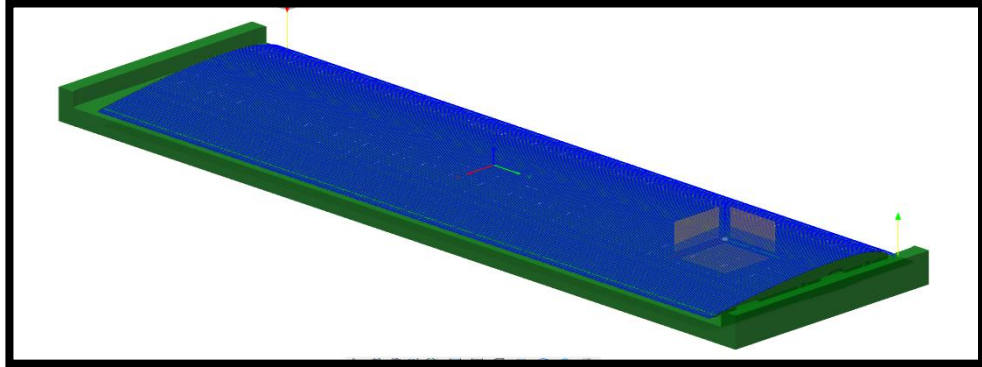
Figura 38. Mecanizado de desbaste "rampa" (FUSION 360)



Fuente: Elaboración propia

Finalmente se realizó un acabado superficial sobre los escalones que dejó el desbaste grueso. **Figura 39**

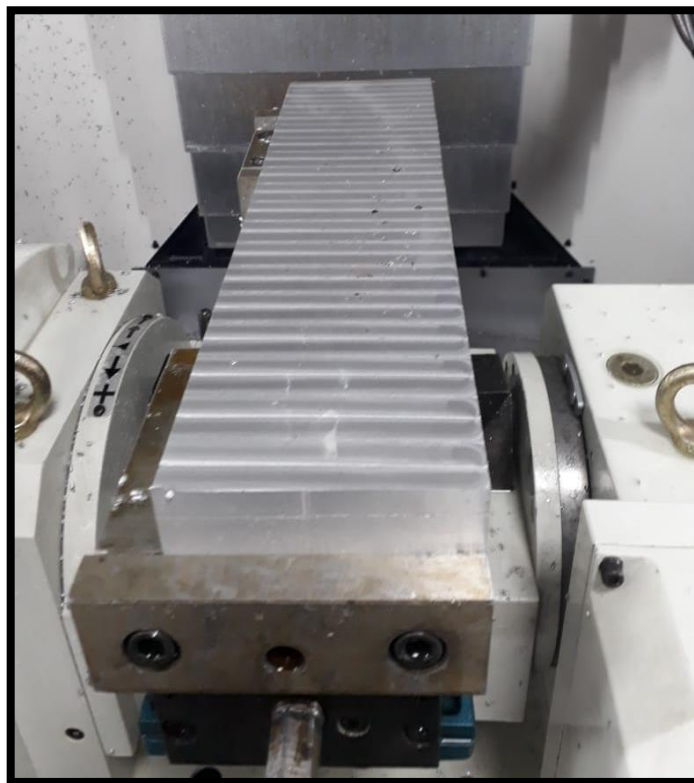
Figura 39. Acabado superficial (FUSION 360)



Fuente: Elaboración propia

Primero se realizó un aplanado a las dos caras del material como se muestra en la **Figura 40**, para ello se utilizó un escariador de 4 filos de punta plana. Para realizar todo este proceso se mecanizaría por cada cara del material.

Figura 40. Aplanado de las caras del material.



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se usó la misma herramienta para realizar el segundo mecanizado que consistió en una rampa para obtener el perfil alar escalonado, así en la **Figura 41** y **Figura 42** se muestra el proceso de elaboración.

Figura 41. Proceso de mecanizado "rampa"

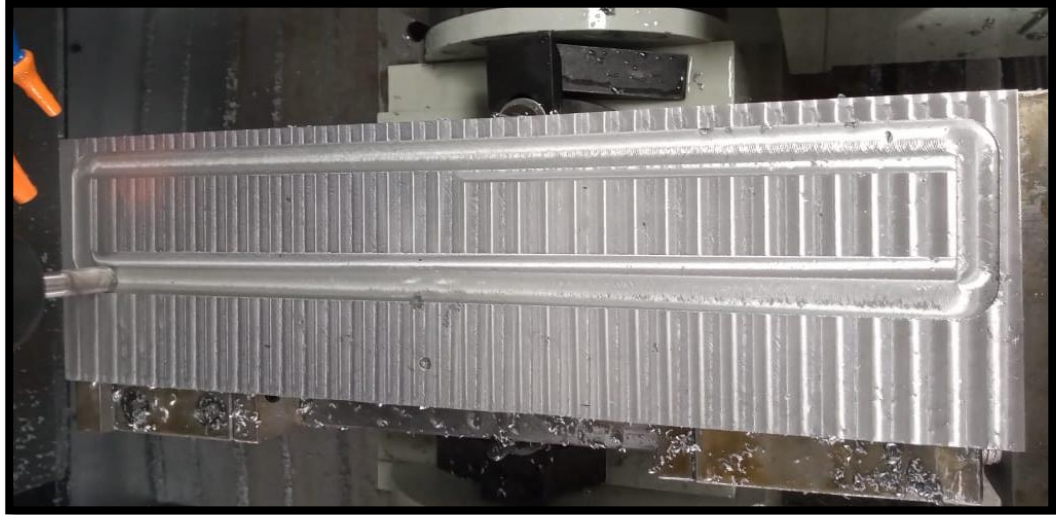


Figura 42. Mecanizado "rampa".



Fuente: Elaboración propia

El resultado obtenido de este proceso se puede apreciar en la **Figura 43** donde se puede observar fácilmente el escalonado dejado por el tipo de mecanizado elegido para esta etapa de la elaboración del perfil alar.

Figura 43. Perfil alar escalonado.



Fuente: Elaboración propia

Una vez finalizado el proceso de desbaste grueso se procedió a pasar al desbaste fino o el acabado superficial, para ello se hizo cambio de herramienta a una de punta roma de 10 mm de diámetro de 4 filos. De esta manera el proceso que se muestra en la **Figura 44** fue llevado a cabo para el acabado superficial y para finalizar el mecanizado de uno de los volúmenes del perfil alar.

Figura 44. Acabado superficial.



Fuente: Elaboración propia

Así como se puede observar en la **Figura 45** el resultado de todo este proceso de mecanizado, se obtuvo la primera mitad del primer alabe.

Figura 45. Mecanizado final del primer volumen (primer álabe).



Fuente: Elaboración propia

El mismo proceso fue llevado a cabo en el otro lado del material obteniendo así el perfil alar o álabe deseado que se puede apreciar en la **Figura 46** y en la **Figura 47**

Figura 46. Álabe obtenido vista lateral.



Fuente: Elaboración propia

Figura 47. Álabes obtenidos vista superior.



Fuente: Elaboración propia

2.10.6. Ensamble del aerogenerador: Una vez elaboradas cada una de las piezas/componentes del aerogenerador, se procedió a hacer la instalación de cada uno de sus componentes sobre la estructura construida para soportar el peso del mismo. Se dispusieron dos rodamientos de contacto angular sobre los dos extremos de la estructura, encargados de dar firmeza y facilitar la rotación de todo el ensamble. Así como se muestra en la **Figura 48** se puede apreciar el rodamiento superior, usando carcasas de metal dentro de las cuales se insertaron los rodamientos.

Figura 48. Estructura con rodamientos y acople de alternador.



Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 48** se aprecia que se dispuso de un tornillo en el lado derecho de la estructura para sujetar el dispositivo generador de corriente (alternador) seleccionado.

Con los componentes listos se procedió a hacer un montaje de prueba para comprobar cada uno de las piezas enlistadas. Como se muestra en la **Figura 49**, se ensamblaron las láminas de aluminio y se sujetaron a los discos de acero con tornillería Bristol de 8 mm. En la parte inferior se puede apreciar el alternador apenas sujeto.

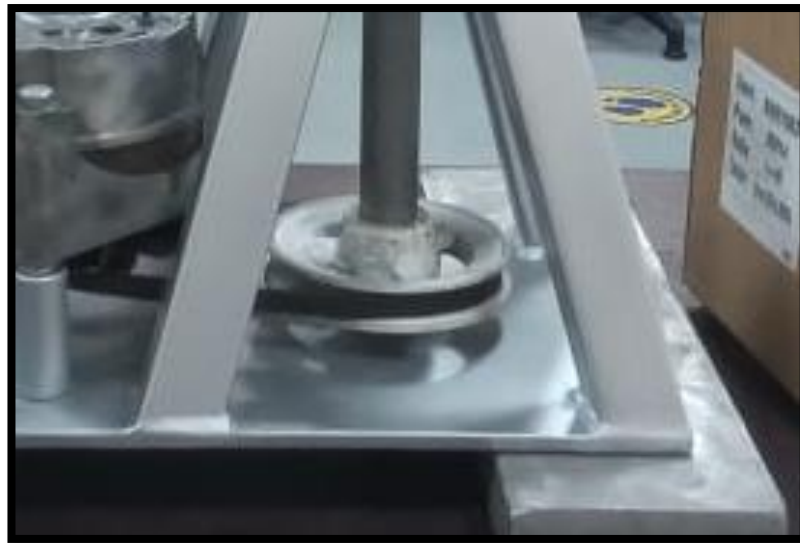
Figura 49. Ensamble de prueba del aerogenerador.



Fuente: Elaboración propia

Para la transmisión de potencia – torque se hizo uso de una polea y de una correa, en la **Figura 50** se puede apreciar con mayor detalle. Para la selección de dicha polea se tuvo en cuenta el espacio disponible que existía entre los perfiles que forman la estructura piramidal, así mismo la relación de giro entre esta y la polea que viene acoplada por fabrica del alternador.

Figura 50. Detalle polea.



Fuente: Elaboración propia

Para garantizar el agarre entre la polea y el eje, se hizo uso de dos tornillos prisioneros para ajustarla. Se puede apreciar dicho detalle en la **Figura 51**

Figura 51. Polea.



Fuente: Elaboración propia

El alternador usado para la elaboración del aerogenerador fue una planta usada de vehículo Ford 60' (**Figura 52**), se escogió debido a su sencillez de instalación y de la misma manera que este no requería de ningún sistema electrónico para su puesta en marcha.

Figura 52. Planta (alternador) Ford 60'



Fuente: Elaboración propia

Una vez finalizado el proceso de mecanizado de los tres álabes en el CNC se procedió a hacer el montaje de los mismos (**Figura 53**) para realizar los orificios correspondientes sobre la cara superior como se muestra en la **Figura 54** tres orificios sobre una cara y sobre la otra solo se hizo una perforación. Se usaron machuelos para hacer las correspondientes roscas de los orificios, a los extremos de 5 mm y en los centros 8 mm.

Figura 53. Montaje para perforación de orificios.



Fuente: Elaboración propia

Figura 54. Agujeros sobre la cara superior del álabe.



Fuente: Elaboración propia

En el mismo montaje realizado en el centro de mecanizado, se realizó la elaboración de las roscas como se muestra en la **Figura 55**

Figura 55. Elaboración de roscas.



Fuente: Elaboración propia

Una vez finalizado el proceso de roscado, se procedió a realizar el montaje de los alabes sobre las platinas dispuestas sobre la estructura piramidal. De esta manera se obtuvo el aerogenerador que se puede apreciar en la **Figura 56**

Figura 56. Aerogenerador ensamblado.



Fuente: Elaboración propia

3. RESULTADOS

Finalmente se obtuvieron dos unidades, en primer lugar, una estructura soporte que incluye el ventilador y el dispositivo de variación de velocidad junto con sus equipos de medición (tacómetro, multímetro, anemómetro) y la segunda unidad que corresponde al aerogenerador que incluye una base soporte junto con las piezas de ensamble del eje y de los álabes. En conjunto forman el banco eólico de eje vertical que se aprecia en la **Figura 57** y en la **Figura 58**.

Figura 57. Banco Eólico de eje vertical vista frontal.



Fuente: Elaboración propia

Figura 58. Banco Eólico de eje vertical vista de perspectiva.



Fuente: Elaboración propia

Cumpliendo con el objetivo de realizar el diseño y construcción del banco didáctico se obtuvo una estructura metálica un túnel de viento calculado para flujo turbulento, de manera análoga la estructura se diseñó y construyó para soportar un porcentaje mas alto de la carga de diseño.

La elaboración de los perfiles alares se llevó a cabo en dos etapas, la primera que constó de la rectificación de las caras de los bloques para aproximar las aristas a 90° y la segunda etapa del mecanizado de la geometría que a su vez se dividió en tres fases. Un mecanizado de desbaste aplanado de las caras más grandes, un desbaste grueso (rampa **Figura 43**) y finalmente un desbaste fino o acabado superficial.

Se presentaron dos tipos de defecto sobre la pieza final, por mecanizado (**Figura 59**) y por calidad del material (**Figura 60**), así por un lado para minimizar el error en mecanizado se trató de llevar a cabo milimétricamente los pasos mencionados y en segundo lugar llevar a cabo procesos de corrección sobre el material (relleno de porosidades), sin embargo, este proceso correctivo aplicó para los dos parámetros de trabajo.

Figura 59. Defectos de mecanizado sobre la pieza final.



Fuente: Elaboración propia

Figura 60. Porosidades sobre la pieza final.



Fuente: Elaboración propia

El proceso de mecanizado tuvo un matiz iterativo, las piezas tuvieron que ser sometidas al proceso correctivo (relleno) sobre las partes de mecanizado fallido. Se corrigieron los errores y cómo se observa en la **Figura 61** se rellenaron las porosidades para poder obtener una pieza uniforme.

Figura 61. Álabes con relleno de masilla para carro.



Fuente: Elaboración propia

Al finalizar el proceso de mecanizado en CNC se obtuvieron los tres álabes, con las estructuras dispuestas se procedió a realizar la conexión del variador de velocidad al motor del ventilador, como lo muestra la **Figura 62** se aprecia las tres conexiones del motor al variador de velocidad.

Figura 62. Conexión variador-motor



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se realizó la conexión a la red eléctrica del laboratorio de procesos de manufactura de la facultad de Ingeniería Mecánica, red que cuenta con una toma corriente trifásica de 220V y 20A, **Figura 63**.

Figura 63. Toma Corriente 220V - 20A



Fuente: Elaboración propia

Una vez conectado a la fuente de poder, se procedió a hacer uso del equipo, visualizando en la pantalla principal la frecuencia que ofrece el variador por defecto, de 0 a 50Hz. **Figura 64**

Figura 64. Variador de frecuencia conectado a la red eléctrica.

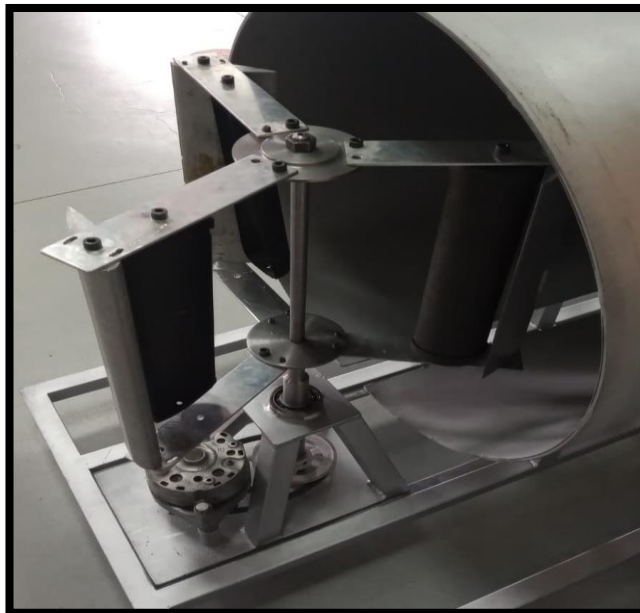


Fuente: Elaboración propia

Al poner en marcha el motor del ventilador se observó que el ventilador estaba realizando el trabajo de generar flujo contrario al sentido de dirección del túnel de viento, para solucionar esto bastó con invertir dos de las líneas (fases) del motor del ventilador. Una vez solucionado dicho inconveniente, se dispuso del aerogenerador dentro del túnel viento para realizar la primera prueba. Se presentó una segunda dificultad, la resistencia de giro del aerogenerador frente a la corriente de viento; para esto se puso al máximo el motor generando una corriente de viento cercana a los 20 m/s.

Al tratarse de un rotor construido enteramente de materiales metálicos, su inercia es bastante alta, además de la posición de los alabes frente a la línea de corriente de viento, se notó que, al ser un perfil simétrico, necesitaba de un cambio de ángulo de ataque constante para generar arrastre constante, para lo cual se requeriría diseñar un sistema de direccionamiento de los mismos sobre la parte superior del aerogenerador. Para poder cumplir con el objetivo de realizar mediciones se planteó la posibilidad de crear nuevos álabes en un material más liviano y con una geometría más sencilla, así se conservaría el diseño inicial y se evitaría diseñar un nuevo sistema que alterara de manera significativa las piezas ya fabricadas, se obtuvieron tres cazoletas elaboradas en su totalidad con materiales plásticos. Cortando un tubo plástico de ventilación de 3" de diámetro y de 1 m de longitud a la mitad, se obtuvieron 4 cazoletas, para realizar la sujeción se dispuso en los extremos de los mismos tapones plásticos sellados y pegados con soldadura plástica. Se obtuvo el rotor mostrado en la **Figura 65**. Dichas cazoletas se añadieron al rotor original para aumentar el arrastre, así se pudo romper con la inercia del mismo. Sobre las platinas se realizaron perforaciones a una distancia de 90 mm del borde exterior para poder ensamblar las cazoletas lo más cerca posible a los álabes y a su vez permitir el cambio de ángulo de ataque.

Figura 65. Rotor con cazoletas plásticas.



Fuente: Elaboración propia

Se pegaron cintas reflectivas sobre unas de las cazoletas y se pintaron de negro mate, esto para facilitar la medición de la velocidad de giro, medidas realizadas con un tacómetro de pistola digital. **Figura 66**

Figura 66. Tacómetro digital.



Fuente: Elaboración propia

De la misma manera para hacer medición de la velocidad de viento generada por el ventilador-extractor se hizo uso de un anemómetro digital.

Figura 67. Anemómetro digital.



Fuente: Elaboración propia

Para realizar las mediciones se tuvieron en cuenta estos elementos (**Figura 66** y **Figura 67**). El ventilador se puso en marcha y se hizo una prueba de medición de velocidad de viento configurando el variador a la opción de cambiar por revoluciones del motor (0 rpm – 1420 rpm), se notó que había un cambio significativo en el flujo de viento al marcar en el variador 100 rpm, se decidió que hacer mediciones cada 100 rpm hasta llegar al máximo ofrecido por el equipo.

De la misma manera para asegurar un valor real se tomaron las revoluciones que mostraba la pantalla del variador y se midieron las revoluciones sobre el ventilador con el tacómetro, así se tomó un promedio de revoluciones del ventilador.

Los datos medidos fueron organizados en la **Tabla 7** donde se aprecia los resultados obtenidos, dichos resultados muestran la potencia extraíble del viento. El procedimiento de medición constó en realizar metraje sobre el giro del ventilador siguiendo de la velocidad de viento generada por este, y finalmente se tomaron las revoluciones por minuto del aerogenerador.

Tabla 7. Mediciones sobre el banco eólico.

MEDICIÓN						
VENTILADOR (RPM)			AEROGENERADOR	v1	v2	VELOCIDAD VIENTO
VARIADOR	TACÓMETRO	PROM	RPM	m/s	m/s	m/s
99	104	101,5	0	0,8	0	0,4
199	209	204	0	2,3	0,8	1,55
298	312	305	0	2,7	1	1,85
400	418	409	0	5	1,3	3,15
500	522	511	0	6,3	1,5	3,9
599	624	611,5	0	7,4	1,9	4,65
701	724	712,5	30,5	9	1,6	5,3
801	831	816	46,5	10,2	1,6	5,9
900	931	915,5	64,2	11,8	1,7	6,75
1000	1032	1016	76,4	12,3	1,9	7,1
1099	1133	1116	89,4	12,8	2,2	7,5
1201	1234	1217,5	100,1	15,2	2,3	8,75
1301	1333	1317	110,6	16,3	2,5	9,4
1400	1427	1413,5	123,4	17,4	2,7	10,05
1420	1446	1433	127,2	18,6	3,2	10,9

Fuente: Elaboración propia

Se usó el tacómetro para obtener las revoluciones del rotor, paralelamente se tomaron mediciones de velocidad de viento; dichas mediciones se realizaron antes que el flujo tocara el rotor y después de pasar sobre él, de esta manera se obtuvieron V_1 y V_2 , correspondientemente. La forma de tomar mediciones se estableció con base en la ley de Betz

Las mediciones de potencia extraíble del viento fueron calculadas con los datos recolectados en la práctica, estos datos aseguran el comportamiento del rotor puesto que las medidas realizadas sobre el banco fueron hechas con equipos especializados y calibrados para esta tarea. Para calcular la potencia que un aerogenerador puede producir se usa la ecuación de la ley de Betz. Ecuación 33

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

Ecuación 33. Potencia teórica de un aerogenerador.

En los términos de la ecuación podemos identificar la densidad del aire, la velocidad del viento y un área que corresponde a la superficie barrida por las aspas del rotor. Una vez identificado el parámetro del área, se determinó una potencia teórica para cada una de las condiciones flujo seleccionadas por el variador sobre las cuales existiera un giro del rotor. Para valores de velocidad medida se obtuvo la **Tabla 8**.

Tabla 8. Potencia teórica aprovechable por el rotor.

POTENCIA TEÓRICA (W)
-
-
-
-
-
-
-
18,02593783
24,86716609
37,2375911
43,33564913
51,08037188
81,11373867
100,5666124
122,9046871
156,8013343

Fuente: Elaboración propia

Estos valores se refieren a la energía que el rotor puede aprovechar del aire, con una eficiencia del 100%, como el límite de Betz indica, el máximo porcentaje de potencia aprovechable del viento roza el 60%, no se puede decir que este sería el rango de valores establecidos para el aerogenerador en estas condiciones de viento para un caso real, por lo tanto, hace falta determinar un C_p (coeficiente de potencia) que establece el porcentaje de energía real aprovechada por el aerogenerador (0% – 59.3%). Ecuación 34.

$$C_p = \frac{1}{2} * (1 + a) * (1 - a^2)$$

Ecuación 34. Coeficiente de potencia.

El valor de a , es adimensional y está dado por la siguiente relación mostrada en la Ecuación 35.

$$a = \frac{v_2}{v_1}$$

Ecuación 35. Coeficiente a.

De esta manera en una hoja de cálculo en Excel se obtuvo la **Tabla 9** donde se aprecian los valores de la velocidad de viento, el coeficiente a y el C_p .

Tabla 9. Valores de C_p

v_1	v_2	a	C_p
m/s	m/s	$\frac{v_2}{v_1}$	$\frac{1}{2} * (1 + a) * (1 - a^2)$
0,8	0	0	0,5
2,3	0,4	0,34782609	0,592381031
2,7	1,3	0,37037037	0,591195448
5	1,7	0,26	0,587412
6,3	2	0,23809524	0,583954217
8,1	2,5	0,25675676	0,586953142
8,8	1,6	0,17777778	0,570277092
10,4	1,7	0,15686275	0,564198536
11,3	2,1	0,1440678	0,560161032
12,6	2,3	0,15447154	0,563462085
13,1	2,5	0,171875	0,568628311
14,8	2,8	0,15131579	0,562477362
16,1	2,9	0,15337423	0,563121328
17,9	3,1	0,15517241	0,56367881
18,1	3,3	0,17204301	0,568675973

Fuente: Elaboración propia

La ecuación que define la potencia extraíble real está dada por la siguiente expresión, Ecuación 36. Nótese el C_p dentro de la expresión.

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

Ecuación 36. Potencia real de un aerogenerador.

Se observa que basta con multiplicar el valor obtenido de potencia teórica por el coeficiente de potencia C_p , los valores obtenidos se organizaron en la **Tabla 10**.

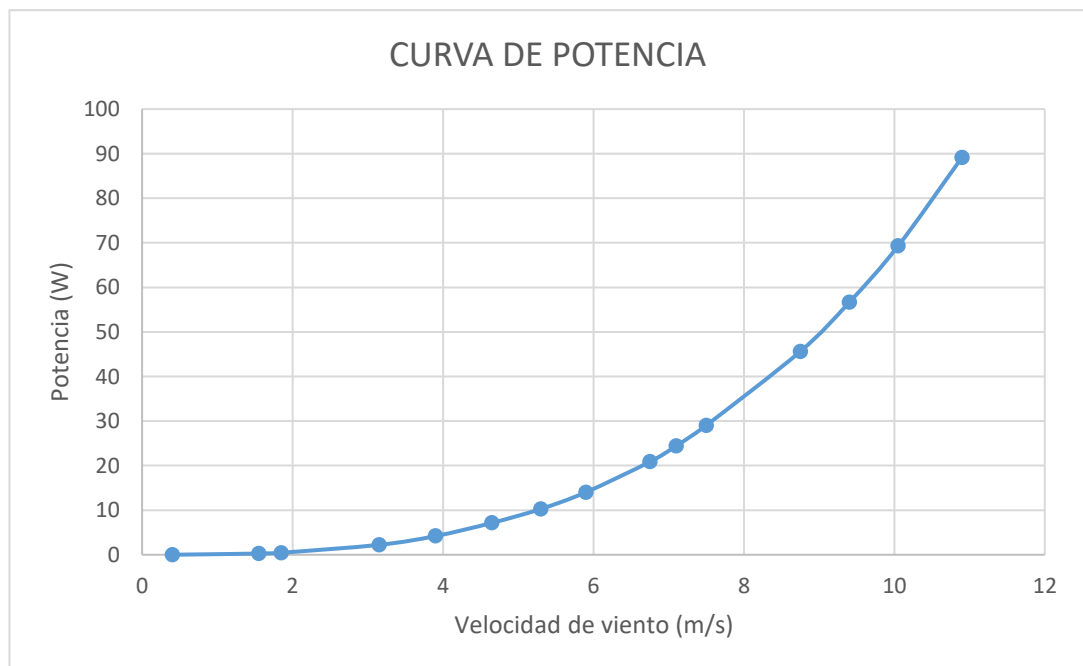
Tabla 10. Potencia real del aerogenerador.

POTENCIA REAL (W)
-
-
-
-
-
-
10,27977941
14,0300187
20,85904744
24,41799522
29,04574559
45,62464176
56,63120427
69,27876778
89,16915143

Fuente: Elaboración propia

Con estos valores se graficó una curva característica de potencia aprovechable por el rotor, se aprecia en la **Figura 68**.

Figura 68. Curva de potencia utilizable por el rotor.



Fuente: Elaboración propia

Una vez determinados estos valores, se usó la velocidad angular medida sobre el rotor para calcular el par que la fuerza de viento ejerció sobre este. De esta manera se relacionaron características del fluido y del rotor obteniendo la **Tabla 11** usando la velocidad del viento se calculó una presión dinámica que posteriormente sirvió para calcular la fuerza ejercida por el viento.

Tabla 11. Cálculo de la fuerza de viento para diferentes velocidades.

CÁLCULO DE LA FUERZA GENERADA POR EL VIENTO		
V (m/s)	Presión (Pa)	Fuerza (N)
0,4	0,1032	0,0193727
1,55	1,5496125	0,29089326
1,85	2,2075125	0,41439425
3,15	6,4000125	1,20141035
3,9	9,81045	1,84161767
4,65	13,9465125	2,61803933
5,3	18,11805	3,40112035
5,9	22,45245	4,21477391
6,75	29,3878125	5,51668016
7,1	32,51445	6,10361255
7,5	36,28125	6,81071625
8,75	49,3828125	9,27014156
9,4	56,9922	10,6985758
10,05	65,1466125	12,2293221
10,9	76,63245	14,3854435

Fuente: Elaboración propia

Para calcular los valores mostrados en la tabla se hizo uso de la Ecuación 37 y Ecuación 38, teniendo los valores de fuerza, se hizo un cálculo de torque multiplicando dicha fuerza generada por el viento por el brazo desde el centro del rotor a uno de sus extremos. Los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 12** teniendo en cuenta solo los valores calculados desde el momento en el que el rotor rompió la inercia de sí mismo generado movimiento circular.

$$p = \frac{1}{2} \rho * v^2$$

Ecuación 37. Ecuación para calcular presión.

$$F = \frac{1}{2} \rho * v^2 * A$$

Ecuación 38. Ecuación para calcular fuerza.

Tabla 12. Torque producido por el rotor.

TORQUE PRODUCIDO (N-m)
-
-
-
-
-
-
1,680153451
2,082098314
2,72524
3,015184602
3,364493828
4,579449932
5,285096437
6,041285117
7,106409096

Fuente: Elaboración propia

Con valores de torque y velocidad angular podemos calcular una potencia generada por el rotor. Usando la Ecuación 39 se obtiene la **Tabla 13**, la velocidad angular es convertida de RPM a Rad/s.

$$P = T * \omega$$

Ecuación 39. Potencia generada por par.

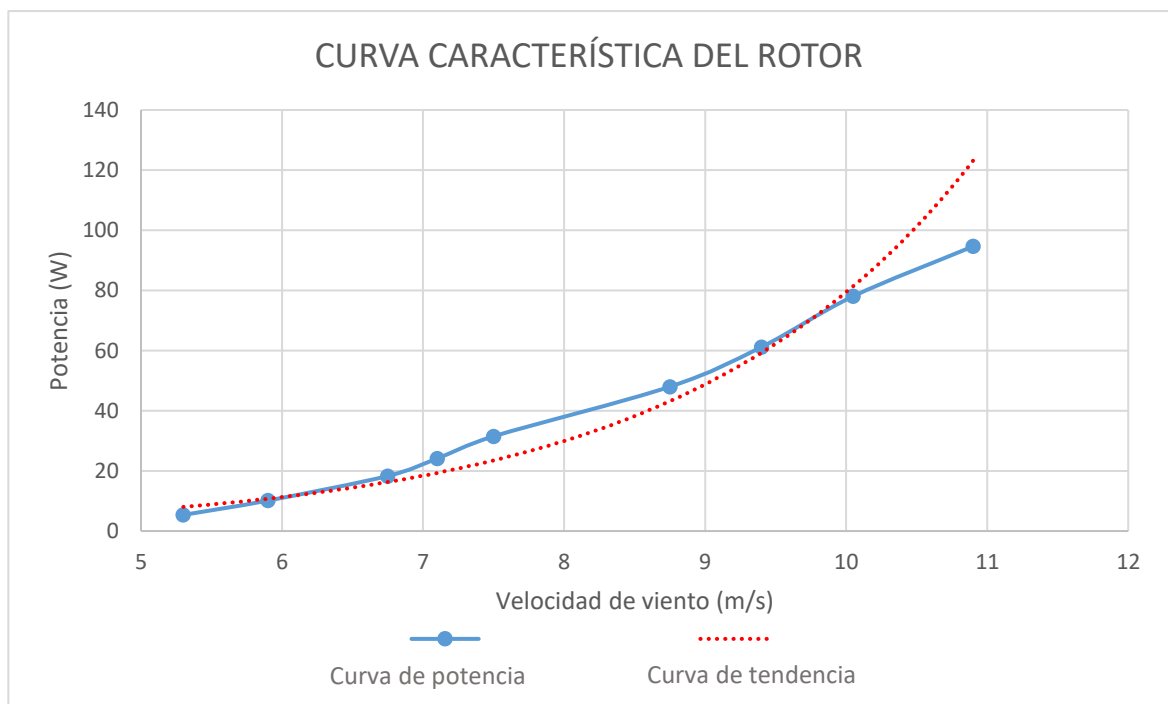
Tabla 13. Potencia generada por el rotor.

POTENCIA GENERADA POR EL ROTOR (W)
-
-
-
-
-
-
5,366330367
10,13871239
18,32181108
24,12325363
31,49820989
48,00384343
61,21201292
78,06801022
94,65987666

Fuente: Elaboración propia

Se graficaron los datos obtenidos y se pueden apreciar en la **Figura 69**.

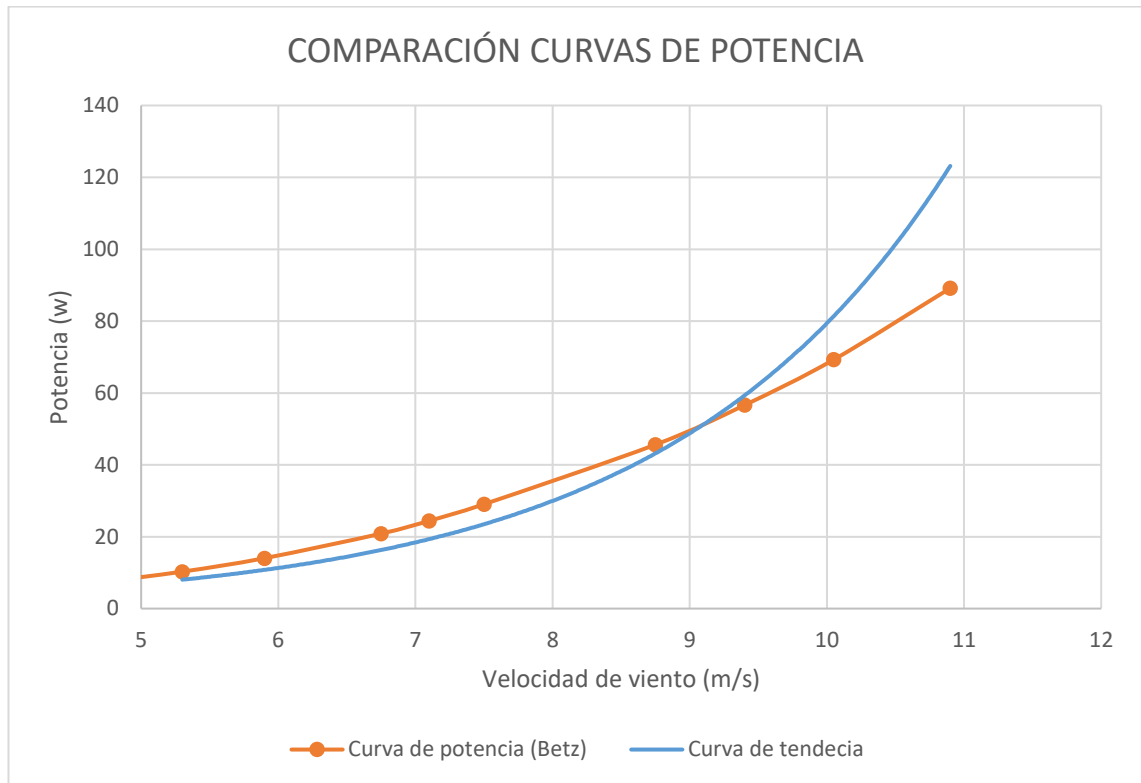
Figura 69. Curva característica del rotor.



Fuente: Elaboración propia

Finalmente se compararon las curvas de potencia obtenidas, real y por límite de Betz que se puede contemplar en la **Figura 70**.

Figura 70. Comparación de curvas de potencia obtenidas.



Fuente: Elaboración propia

4. CONCLUSIONES

Al realizar proyectos de ingeniería se encuentran diferentes obstáculos para poder llevar a cabo el objetivo propuesto, de esta manera a través del proceso se encuentran diferentes alternativas a las propuestas para lograr los resultados obtenidos, también usar diferentes recursos para obtener resultados análogos.

El mecanizado de piezas complejas requiere de preparación especializada; refiriéndose primero a preparar el material para que sea idóneo al realizar un mecanizado en una maquina compleja como lo es un CNC, en segunda instancia la intuición del maquinista, quien en el momento de realizar dichas tareas tenga la certeza de resolver pequeños inconvenientes durante el proceso.

La estructura calculada y diseñada para soportar los elementos que componen el banco eólico de eje vertical fue la ideal, así como los materiales y dimensiones seleccionadas.

Por otro lado, el equipo para generar corriente de viento (ventilador), cumplió con los rangos y parámetros calculados, se podría decir que, en este nivel, la teoría igualó a la práctica.

Se obtuvieron tres álabes de aluminio mecanizados en CNC, el proceso de mecanizado estuvo siempre rodeado de inconvenientes, por un lado debido a los recursos disponibles en los laboratorios de la facultad de ingeniería mecánica de la universidad Santo Tomas Tunja, en segunda instancia la poca experiencia realizando piezas de alta complejidad dificultó la comprensión del proceso, a pesar de disponer de un equipo de alta tecnología, esto no garantiza que se facilite la realización de diferentes componentes para maquinas, este proceso de mecanizado servirá de ejemplo para trabajos futuros en los que se requiera el uso del equipo CNC disponible en los laboratorios de la facultad de ingeniería mecánica de la Universidad Santo Tomás Tunja.

Los datos medidos en laboratorio se organizaron en tablas así se generó una gráfica característica de potencia del aerogenerador construido. La velocidad de viento aprovechada está limitada al ventilador instalado en el banco eólico, como se observa en la **Figura 68** la potencia máxima aprovechable por el aerogenerador es alrededor de 80 Watts.

Para tomar mediciones se tiene que ser cauteloso parametrizar y planear la forma de medición, puesto que existieron diferentes anomalías dentro del laboratorio que dificultaron la recolección de datos; siguiendo con esta idea también esto permitió reconocer los fenómenos que se generan en el momento de poner un equipo de estas características en marcha, como la generación de vórtices y leyes que se han estudiado con anterioridad.

Para crear rotores de estas características se recomienda usar materiales idóneos, puesto que al poner en marcha un equipo pesado se requerirá invertir más energía para arrancar el proceso y por otro lado si se tiene un equipo muy liviano no existirá la suficiente inercia para mover todos sus componentes. Por otro lado la pérdida de material por mecanizado o ya sea por defectos propios del mismo, dificultó el balanceo del aerogenerador, esto es un punto vital a la hora de seleccionar los materiales de fabricación para evitar dichos inconvenientes.

Se diseñó y construyó una estructura que permite el intercambio de álabes, permitiendo así el intercambio de álabes metálicos por cazoletas plásticas, el intercambio de un rotor Darrieus por un rotor Savonius.

A partir de la recolección y medición de datos en laboratorio se puede obtener información de interés de un aerogenerador, a través del análisis matemático y el uso de ecuaciones previamente planteadas podemos determinar coeficientes de potencia de arrastre de sustentación y crear una ficha técnica de un equipo hecho y diseñado sin fines comerciales.

5. TRABAJOS FUTUROS

Dentro de este trabajo se proponen diferentes trabajos sobre el proyecto ya desarrollado, puesto que este se presta para diversificar los resultados obtenidos.

La instrumentación del banco eólico es una posibilidad para facilitar la medición de variables, esto evitaría el intercambio de herramientas de medición y disminuir el error al marcar y leer los datos obtenidos, la instalación de un torquímetro digital facilitará la medición de variables de potencia y de fuerza así mismo como la instalación de un tubo de Pitot.

Por un lado, se propone crear moldes para la manufactura de perfiles simétricos NACA 0025, esto facilitaría el proceso de mecanizado sobre metal y reduciría el peso de un futuro rotor permitiendo que el espectro de trabajo de este sea más amplio (reducir rangos de velocidad de viento y aumentar el trabajo – potencia obtenida), disminuyendo la inercia y la fuerza inicial para vencerla, lo que se refleja en eficiencia.

Así mismo poder usar los perfiles creados a modo de base, para crear un álabe mucho más liviano, cortando secciones del aspa ya mecanizada y usándola como guía de forma y soporte, disponiendo sobre dichas secciones una lámina de un material más liviano y con un mejor acabado superficial.

El uso de un dispositivo de conversión de energía está abierto a diferentes posibilidades, generando un acople al mismo sobre la base de la estructura permitirá usar y reconocer diferentes parámetros de trabajo y la medición de variables de interés.

La estructura soporte del aerogenerador diseñado permitirá acoplar diferentes mecanismos y piezas haciendo pequeñas modificaciones sobre ella, dando la posibilidad de usar membranas o álabes experimentales dejando abierta la creatividad del interesado y creando la posibilidad de realizar mediciones de su diseño.

Generar una ranura sobre las platinas ya mecanizadas permitirá el acople de diferentes álabes o cazoletas a diferentes distancias del centro del mismo, de esta manera se diversifica los tipos de rotores, mediciones y resultados dependiendo del tipo de estudio.

6. BIBLIOGRAFÍA

Roldan Castro, Nelson Javier; Isaza Pareja, Mario León y Olaya Dávila, Mauricio. Desarrollo de una máquina eólica de doble turbina de eje vertical para la generación de energía en un auto eléctrico., Corporación Industrial Minuto de Dios, 2015, 10 p

Geovo Coronado., & González Díaz. (2015). Diseño y modelamiento de la geometría del perfil alar de un aerogenerador, basado en las condiciones de viento presente en el departamento de córdoba para la generación de potencia, 91 p

Yunus Cengel. y John Cimbala. Mecánica de Fluidos, Fundamentos y Aplicaciones. Cuarta ed. 2018, p 308.

Juan Carlos Serrano Collazo. Desarrollo de un banco de ensayo para la evaluación de las prestaciones de aerogeneradores de pequeña potencia. Universidad Politécnica de Cartagena, 2011. pp. 48-58.

Maria del Mar. Ley de Faraday | Inducción Electromagnética . [En línea]. espaciociencia.com. (03/06/). Disponible en: <https://espaciociencia.com/ley-de-faraday-induccion-electromagnetica/>

Anemómetro, ¿Qué es un Anemómetro? [En línea]. Materiales de Laboratorio. Disponible en: <https://materialeslaboratorio.com/anemometro/>

Omega spectris company. Introducción a los anemómetros. [En línea]. OMEGA. Disponible en: <https://es.omega.com/prodinfo/anemometros.html>

Martin Rodriguez, Patricia, et al. Utilizacion de anemometro de hilo caliente a temperatura constante para mediciones de velocidad de aire en tunel de viento. Ingeniería electrónica, automática y comunicaciones. 2014, vol. 35, nro. 1. pp. 78-92

Judit Arrelano Rodriguez. Perfil alar: descubre su importancia. [En línea]. ultraligeros.net. Disponible en: <https://www.ultraligeros.net/perfil-alar-descubre-su-importancia/>

Pérez González, Pablo. Análisis CFD de la influencia del ángulo de pitch en aerogeneradores H-Darrieus, Universidad de Valladolid, 2016, p 14.

Legerén Álvarez, Jaime. Diseño de sistema de pitch pasivo para aerogeneradores en entornos urbanos. Universidad Politécnica de Madrid, 2014, p 32.

Martínez de la Calle, Julián. Análisis Dimensional, Universidad de Oviedo, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón, 2004, p3

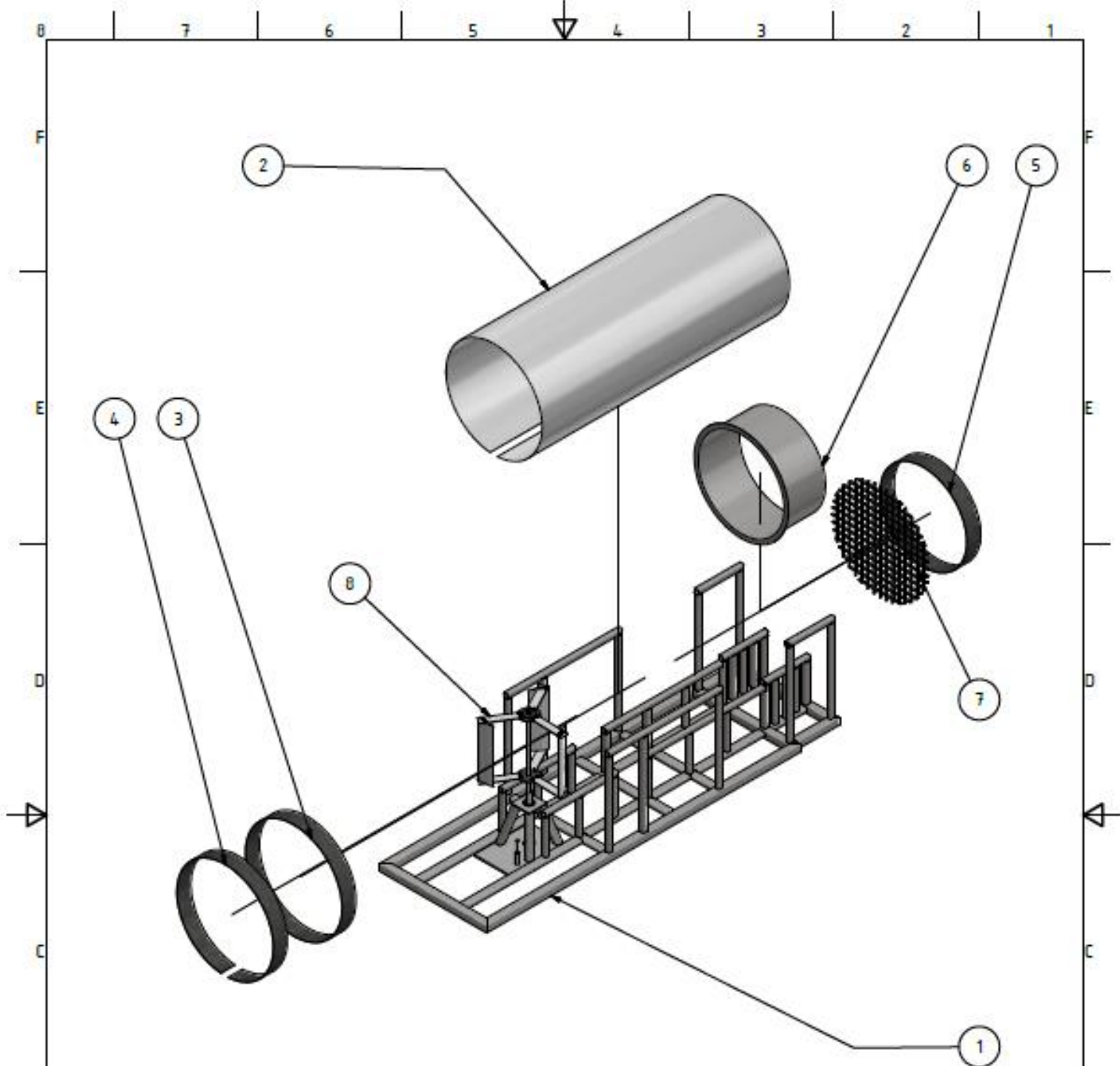
Arregui de la Cruz, Francisco, et al. Apuntes de mecánica de fluidos. Editorial Universitat Politècnica de València, 2017.

Mecanica De Fluidos Robert Mott 6ta Edicion. Mecanica De Fluidos Robert Mott 6ta Edicion.

Domingo i Melgosa. Estudio teórico–experimental de un sistema de disipación de energía poco habitual al pie de una caída de agua, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, 2005, pp 9-13.

7. ANEXOS

Anexo A, planos del banco eólico de eje vertical (BEDEV)



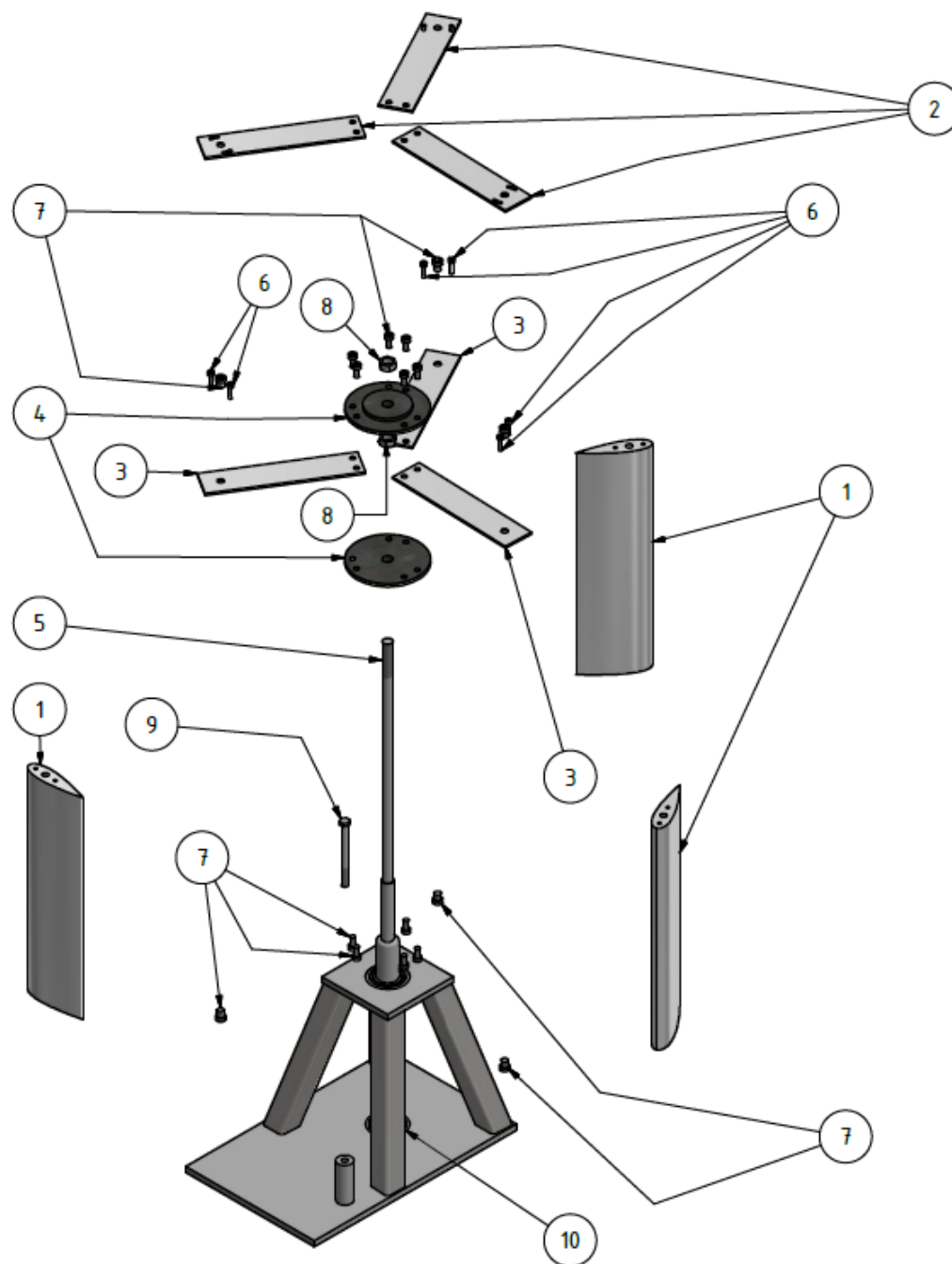
PARTS LIST			
ITEM	PART NUMBER		
1	Estructura Soporte		
2	Túnel de viento		
3	Anillo Sujeción Túnel		
4	Anillo Sujeción Túnel (Con muesca)		
5	Anillo Sujeción Ventilador		
6	Ventilador (Carcasa)		
7	Rejilla Enderezadora		
8	Aerogenerador		

 FACULTAD INGENIERÍA MECÁNICA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS TUNJA				BANCOS BANCAL Y AEROGEN VIND CALVO (INDICACIONES, NO TOMAR MEDIDAS SOBRE EL PLANO)		Proyecto:	
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO EN EL PLANO, COTAS EN mm						Banco eólico de eje vertical	
						Asignatura:	
						Trabajo De Grado	
						Nombre de la pieza:	
						Explosionado BEDEV	
						Código de la pieza:	
						BEDEV	
						Hoja 1 de 1	
						Dirección académica:	

Nombre	Código	Fecha
Diseño: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2185407	9/10/2020
Diseño: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2185407	9/10/2020
Diseño: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2185407	9/10/2020
Verificado: Ing. Fina. Ing. Cornejo	Tutor	
Aprobado: Ing. Fina. Ing. Cornejo	Tutor	
Elaborado: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2185407	

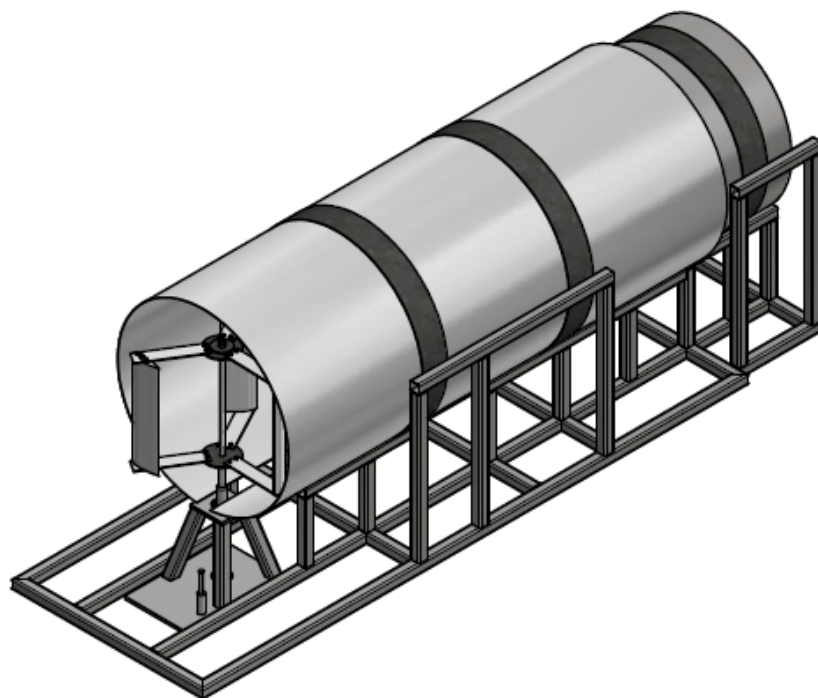
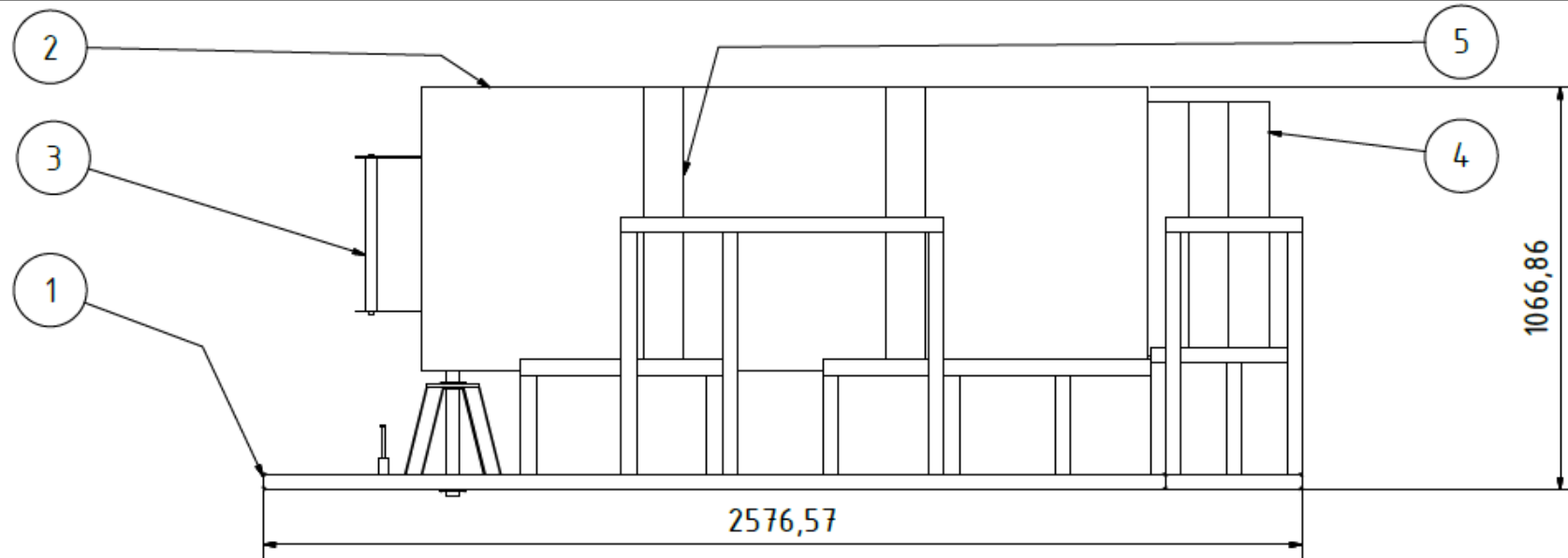
Formato	Escala	Representación
A3	1 : 20	

Proyecto	Escala	Representación
A3	1 : 20	



PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	
1	3	Perfil Aerodinámico	
2	3	Lámina I	
3	3	Lámina II	
4	2	Discos	
5	1	Eje semirotatorio	
6	6	Tornillos 5 mm	
7	18	Tornillos 8 mm	
8	2	Tuerca	
9	1	Tornillo de sujeción	
10	1	Estructura piramidal	

		Facultad INGENIERÍA MECÁNICA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS TUNJA		ELIMINAR REBARBAS Y ARISTAS VIVAS CALVO INDICACIONES, NO TOMAR MEDIDAS SOBRE EL PLANO		Proyecto: Banco eólico de eje vertical
		SI NO SE INDICA LO CONTRARIO EN EL PLANO: COTAS EN mm		Asignatura: Trabajo De Grado		Nombre de la pieza: Explosionado Aerogenerador
Diseñó: Juan Carlos Rodríguez Díaz Código: 2165487 Fecha: 3/10/2020	Diseñó: Juan Carlos Rodríguez Díaz Código: 2165487 Fecha: 10/06/2020	Diseñó: Juan Carlos Rodríguez Díaz Código: 2165487 Fecha: 10/06/2020	Verificó: Ing. Yhisel Leonardo Tutor	Aprobó: Ing. Yhisel Leonardo Tutor	Formato: A3 Escala: 1 : 7 Representación: Hoja 1 de 1	Código de la pieza: A-01 Nota: Dirección acceso:



PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	Estructura Soporte	Perfil cuadrado estructural CR
2	1	Túnel de viento	Lámina acero rolada 1.2 mm
3	1	Aerogenerador	-
4	1	Ventilador	Comercial - 630 mm Diámetro
5	3	Anillos de sujeción	Lámina acero rolada 3 mm



**FACULTAD
INGENIERÍA
MECÁNICA**
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS TUNJA



ELIMINAR REBARBAS Y ARISTAS VIVAS SALVO
INDICACIONES. NO TOMAR MEDIDAS SOBRE EL PLANO
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO EN EL
PLANO: COTAS EN mm

Proyecto:
Banco eólico de eje vertical

Signature:
Trabajo De Grado

Nombre de la pieza:
Banco Eólico De Eje Vertical

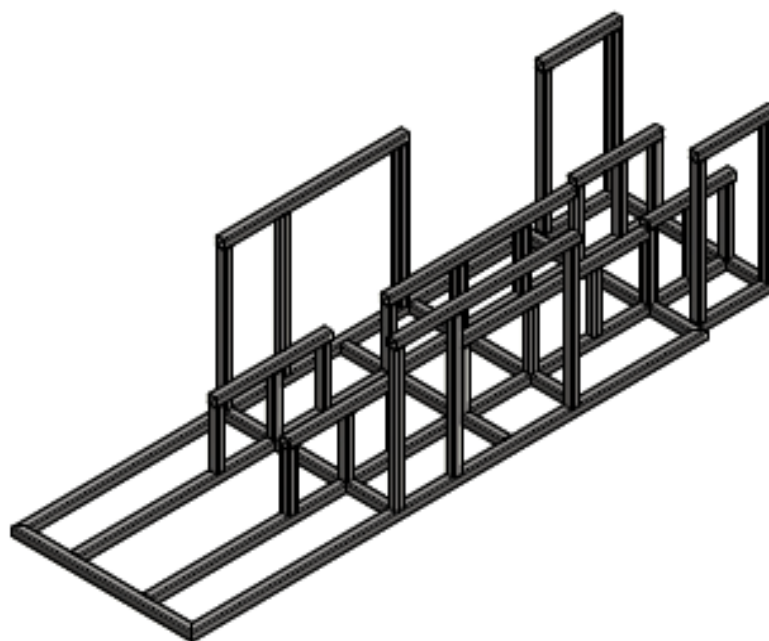
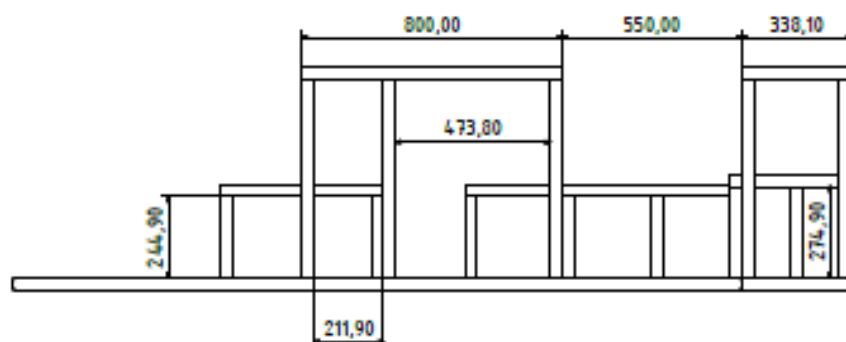
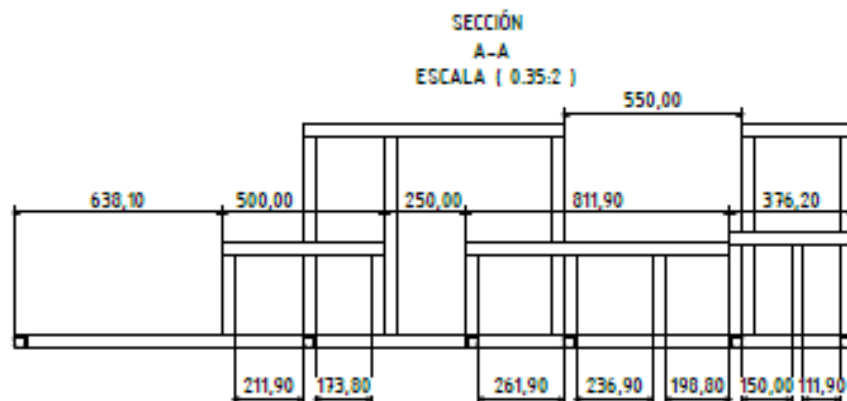
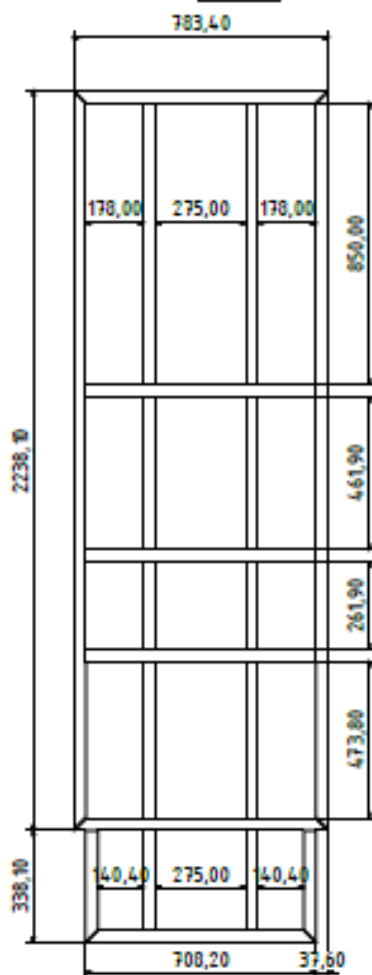
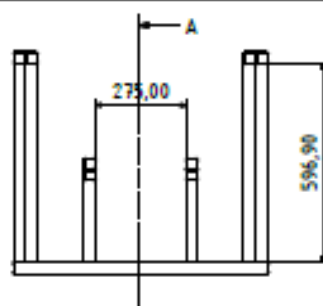
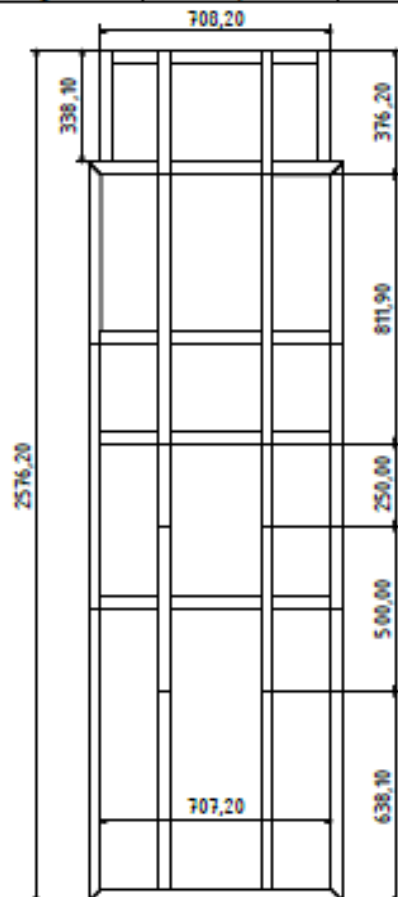
Código de la pieza:
BEDEV

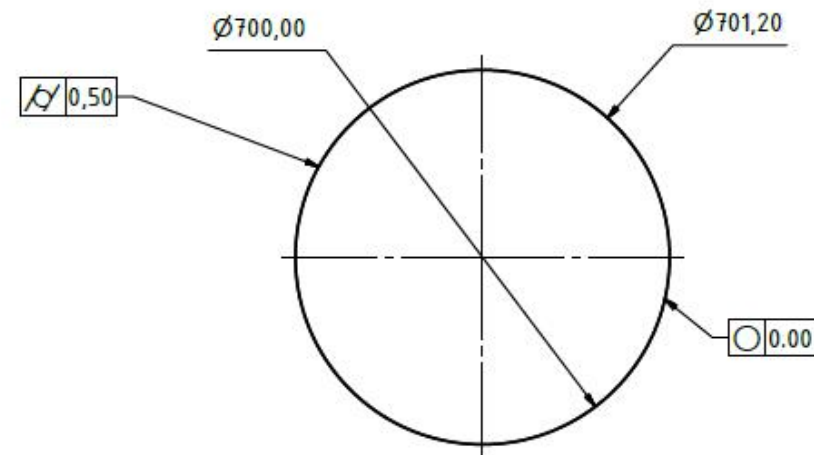
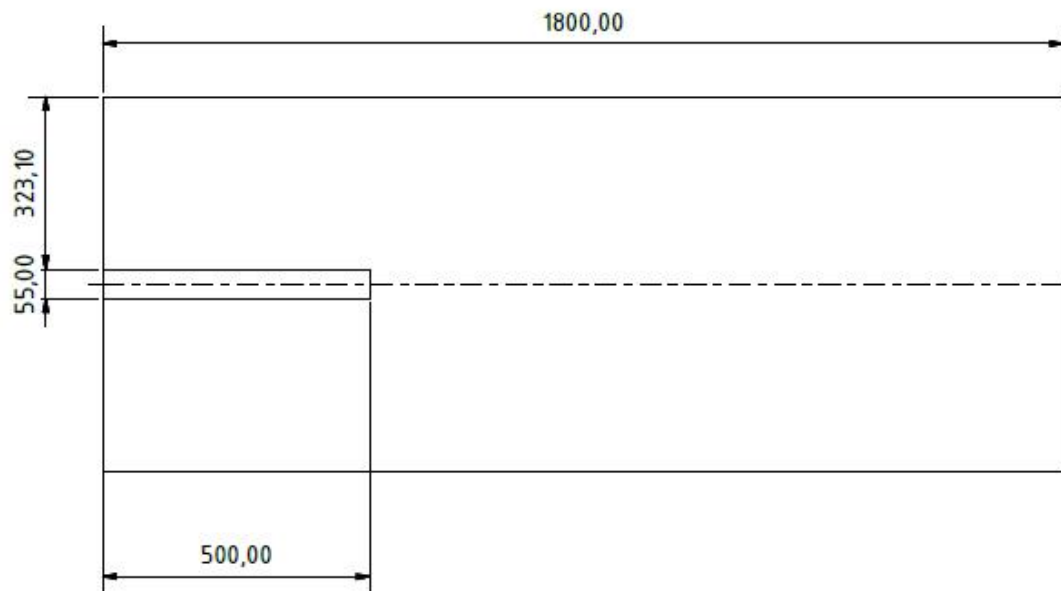
Nota:

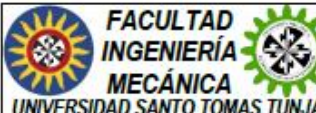
Dirección acceso:

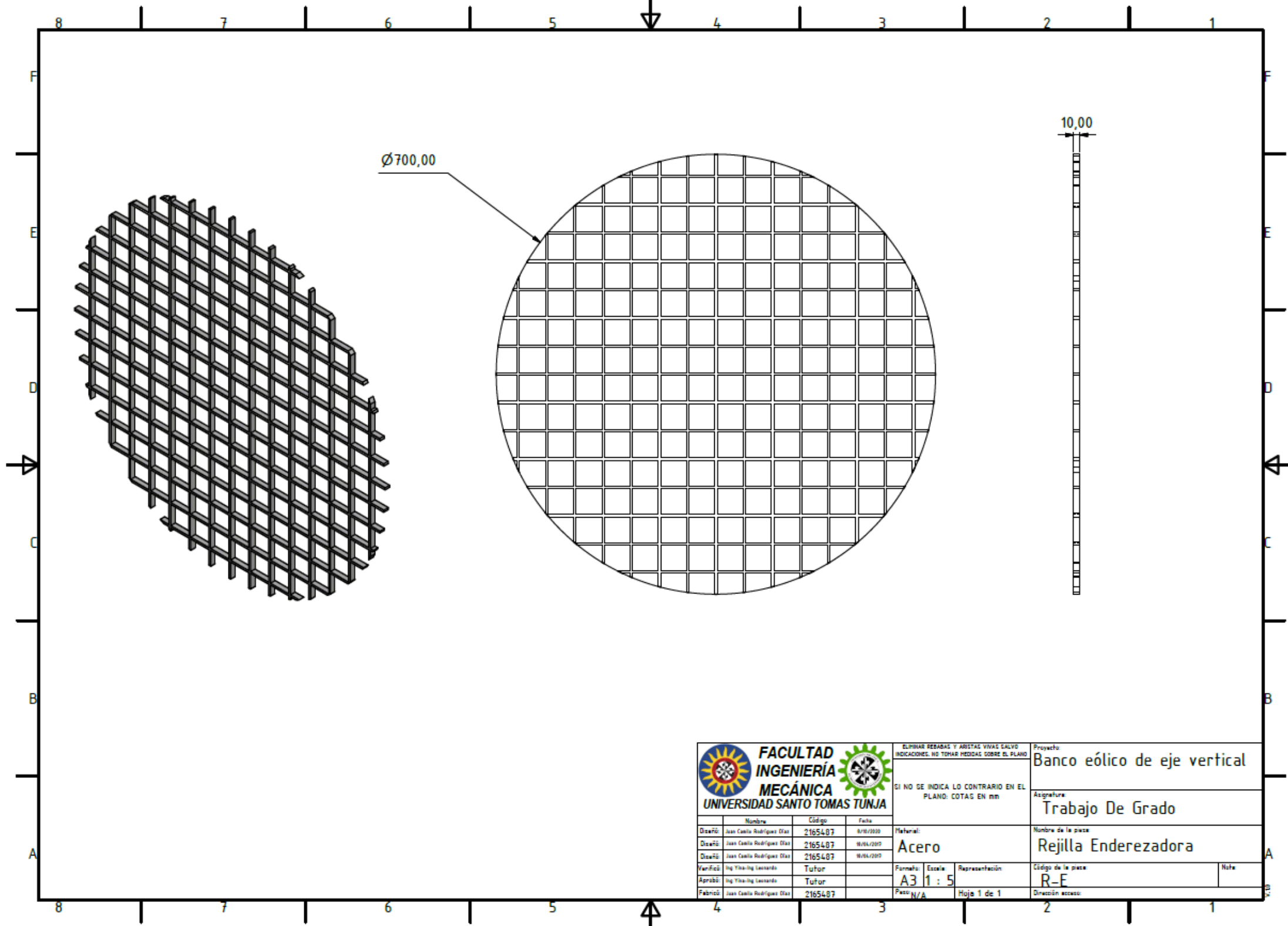
Nombre	Código	Fecha
Diseño: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487	26/06/2021
Diseño: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487	18/06/2021
Diseño: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487	18/06/2021
Verificó: Ing Yhis-Ing Leonardo	Tutor	
Aprobó: Ing Yhis-Ing Leonardo	Tutor	
Fabrió: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487	

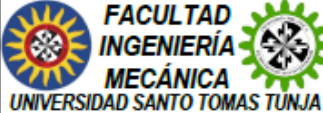
Material:	Forma:	Escala:	Representación:
-	A3	1 : 12	
	Peso: N/A	Hoja 1 de 1	

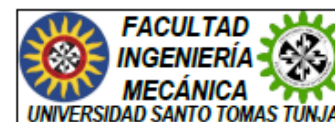




			ELIMINAR RESABAS Y ARISTAS VIVAS CALVO INDICACIONES. NO TOMAR MEDIDAS SOBRE EL PLANO		Proyecto: Banco eólico de eje vertical																													
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO EN EL PLANO: COTAS EN mm					Asignatura: Trabajo De Grado																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Nombre</th> <th>Código</th> <th>Fecha</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Diseño</td> <td>Juan Carlos Rodríguez Díaz</td> <td>2165487</td> <td>16/09/2019</td> </tr> <tr> <td>Diseño</td> <td>Juan Carlos Rodríguez Díaz</td> <td>2165487</td> <td>16/09/2019</td> </tr> <tr> <td>Diseño</td> <td>Juan Carlos Rodríguez Díaz</td> <td>2165487</td> <td>16/09/2019</td> </tr> <tr> <td>Verificó</td> <td>Ing Yira-Ing Leonardo</td> <td>Tutor</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Aprobó</td> <td>Ing Yira-Ing Leonardo</td> <td>Tutor</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Elaboró</td> <td>Juan Carlos Rodríguez Díaz</td> <td>2165487</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				Nombre	Código	Fecha	Diseño	Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487	16/09/2019	Diseño	Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487	16/09/2019	Diseño	Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487	16/09/2019	Verificó	Ing Yira-Ing Leonardo	Tutor		Aprobó	Ing Yira-Ing Leonardo	Tutor		Elaboró	Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487		Material: Lámina CR [1.2 mm]		Nombre de la pieza: Túnel de Viento	
	Nombre	Código	Fecha																															
Diseño	Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487	16/09/2019																															
Diseño	Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487	16/09/2019																															
Diseño	Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487	16/09/2019																															
Verificó	Ing Yira-Ing Leonardo	Tutor																																
Aprobó	Ing Yira-Ing Leonardo	Tutor																																
Elaboró	Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487																																
Formato: A3 Escala: 1 : 10 Representación: N/A			Hoja 1 de 1		Código de la pieza: TV-0																													
					Dirección:																													



 FACULTAD INGENIERÍA MECÁNICA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS TUNJA			ELIMINAR REBASAS Y ARISTAS VIVAS CALVO INDICACIONES, NO TOMAR MEDIDAS SOBRE EL PLANO		Proyecto: Banco eólico de eje vertical	
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO EN EL PLANO: COTAS EN mm					Asignatura: Trabajo De Grado	
			Material: Acero		Nombre de la pieza: Rejilla Enderezadora	
Verificó: Ing Yha-Ing Lescanda Aprobó: Ing Yha-Ing Lescanda Fabricó: Juan Carlos Rodríguez Díaz			Formato: Escala: Representación: A3 1 : 5		Código de la pieza: R-E	
			Paso: N/A Hoja 1 de 1		Dirección acceso:	



Nombre	Código	Fecha
Diseño: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165407	20/09/2020
Diseño: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165407	18/04/2019
Diseño: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165407	18/04/2019
Verificó: Ing Yira-Ing Leonardo	Tutor	
Aprobó: Ing Yira-Ing Leonardo	Tutor	
Fabricó: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165407	

ELIMINAR DEBORDOS Y ARISTAS VIVAS SALVO INDICACIONES. NO TOMAR MEDIDAS SOBRE EL PLANO.

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO EN EL PLANO. COTAS EN mm

Material:
Lámina CR

Formato: A3
Escala: 1:5
Peso: 2,599 kg
Representación: Hoja 1 de 1

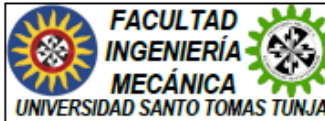
Proyecto:
Banco eólico de eje vertical

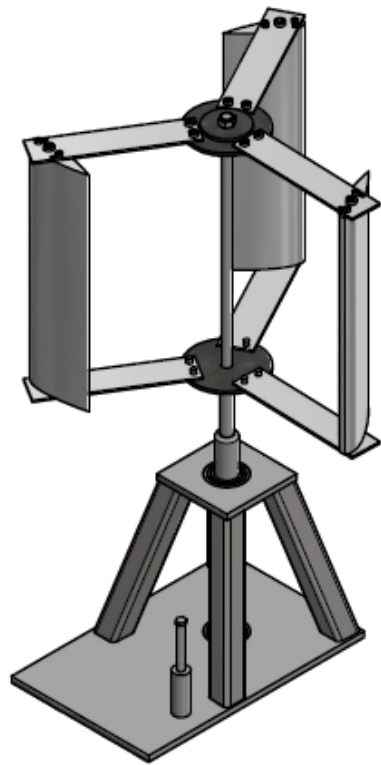
Asignatura:
Trabajo De Grado

Nombre de la pieza:
Anillo Sujeción I

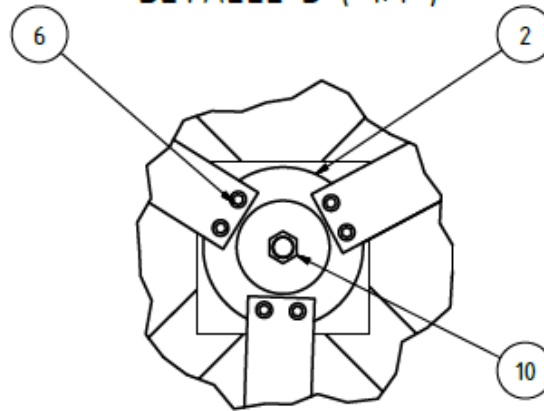
Código de la pieza: AS-01
Nota:
Dirección acceso:



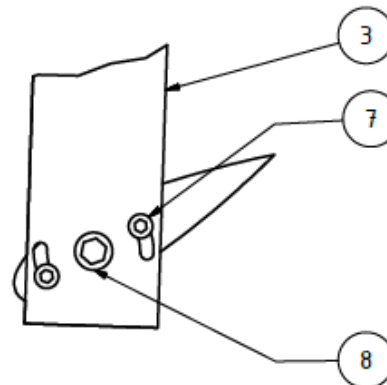
				ELIMINAR REBASAS Y ARISTAS VIVAS SALVO INDICACIONES. NO TOMAR MEDIDAS SOBRE EL PLANO		Proyecto: Banco eólico de eje vertical	
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO EN EL PLANO: COTAS EN mm				Signature: Trabajo De Grado			
Nombre		Código	Fecha	Material:		Nombre de la pieza:	
Diseñó:	Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487	3/10/2019	Lámina CR		Anillo Sujeción II	
Diseñó:	Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487	10/06/2019				
Diseñó:	Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487	10/06/2019				
Verificó:	Ing Yika Ing Leonardo	Tutor		Formato:	Escala:	Representación:	Código de la pieza:
Aprobó:	Ing Yika Ing Leonardo	Tutor		A3	1 : 5		AS-02
Elaboró:	Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487		Peso: 2,535 kg	Hoja 1 de 1		Nota:
						Dirección acceso:	



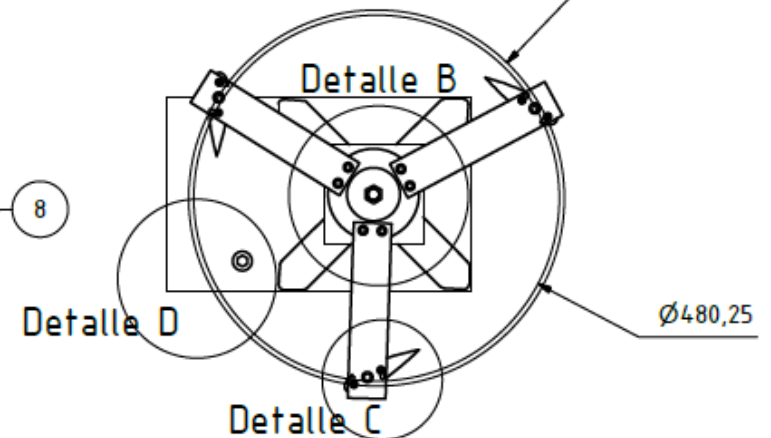
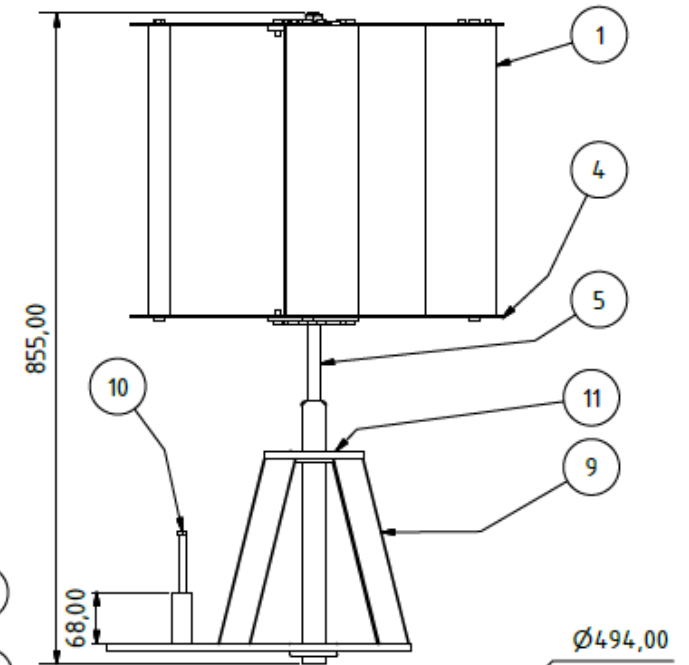
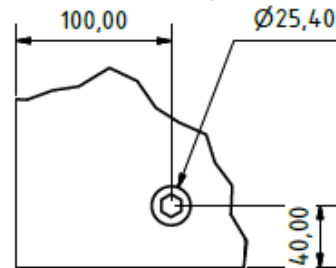
DETALLE B (1:4)



DETALLE C (1:2)

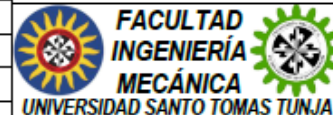


DETALLE D (0,29:1)



PARTS LIST

ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	3	Perfil Aerodinámico	Aluminio
2	1	Disco Sujeción	Acero
3	3	Lámina Sujeción I	Lámina calibre 11
4	2	Lámina Sujeción II	Lámina calibre 11
5	12	Eje roscado	Varilla lisa roscada
6	6	Tornillo I	Comercial de 8 mm
7	6	Tornillo II	Comercial de 5 mm
8	1	Tornillo III	Comercial de 3/8"
9	4	Estructura aerogenerador	Láminas 10 mm - perfil estructural CR
10	2	Tuerca I	Comercial 25 mm
11	2	Rodamientos de Contacto Angular	Comercial SKF 7206 BEP - 62 mm
10	1	Tornillo fijación.	Comercial 110 mm x10 mm

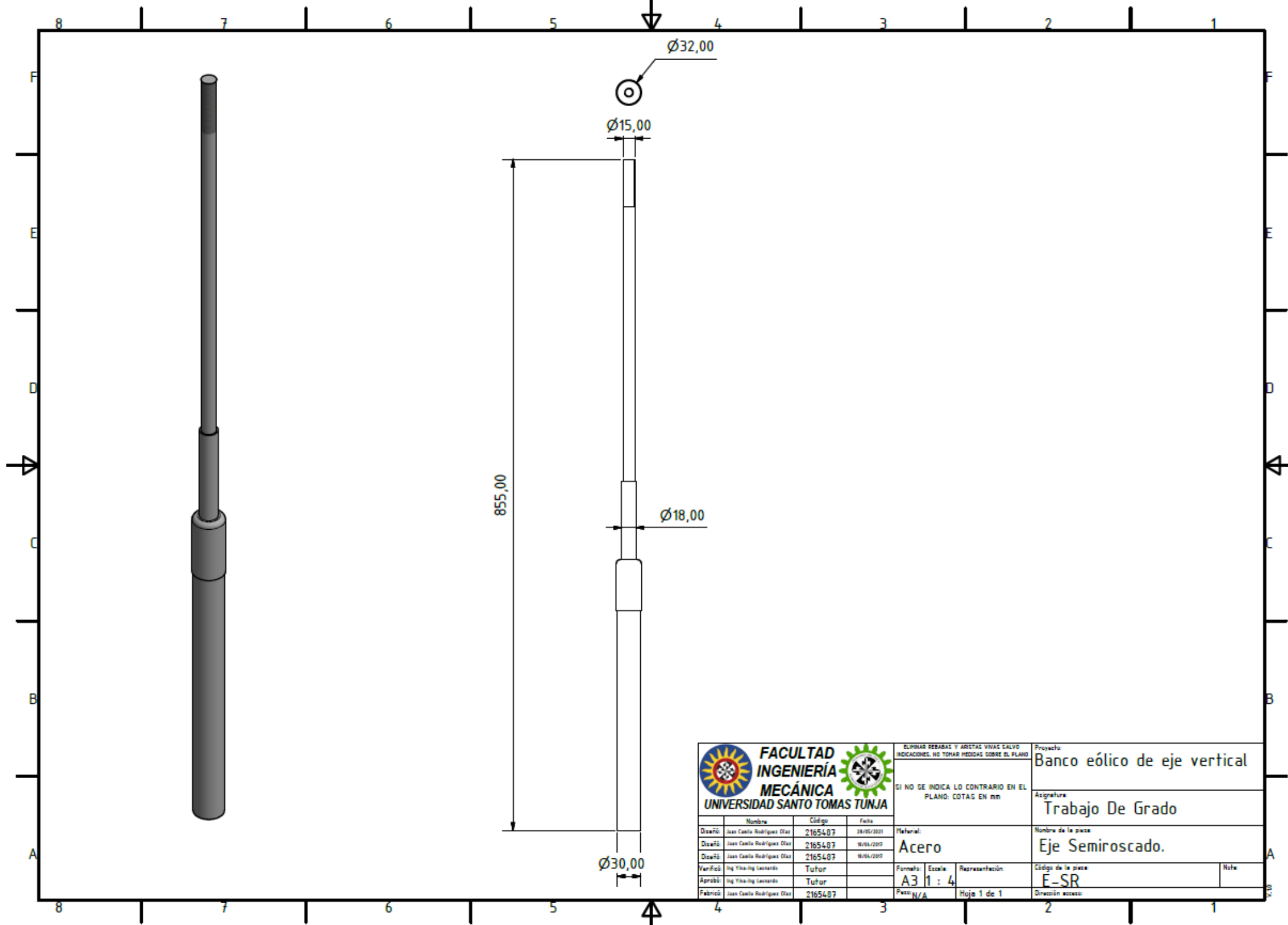


Nombre	Código	Fecha
Diseño: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487	3/16/2020
Diseño: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487	11/14/2017
Diseño: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487	11/14/2017
Verificó: Ing. Yina-Ing. Leonardo	Tutor	
Aprobó: Ing. Yina-Ing. Leonardo	Tutor	
Fabrió: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487	

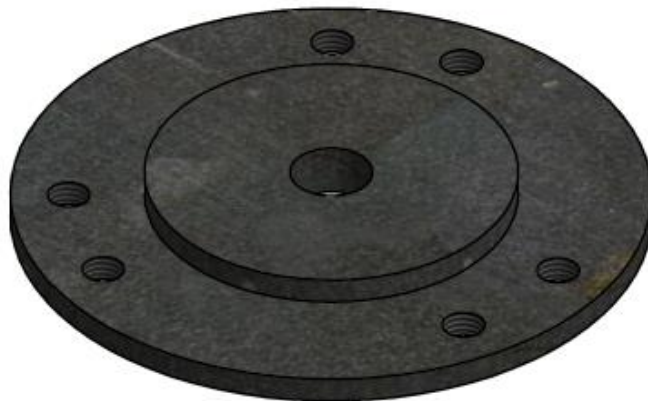
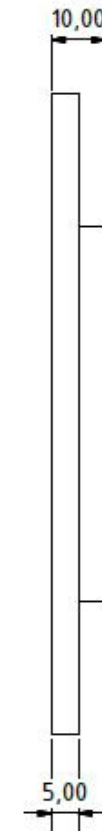
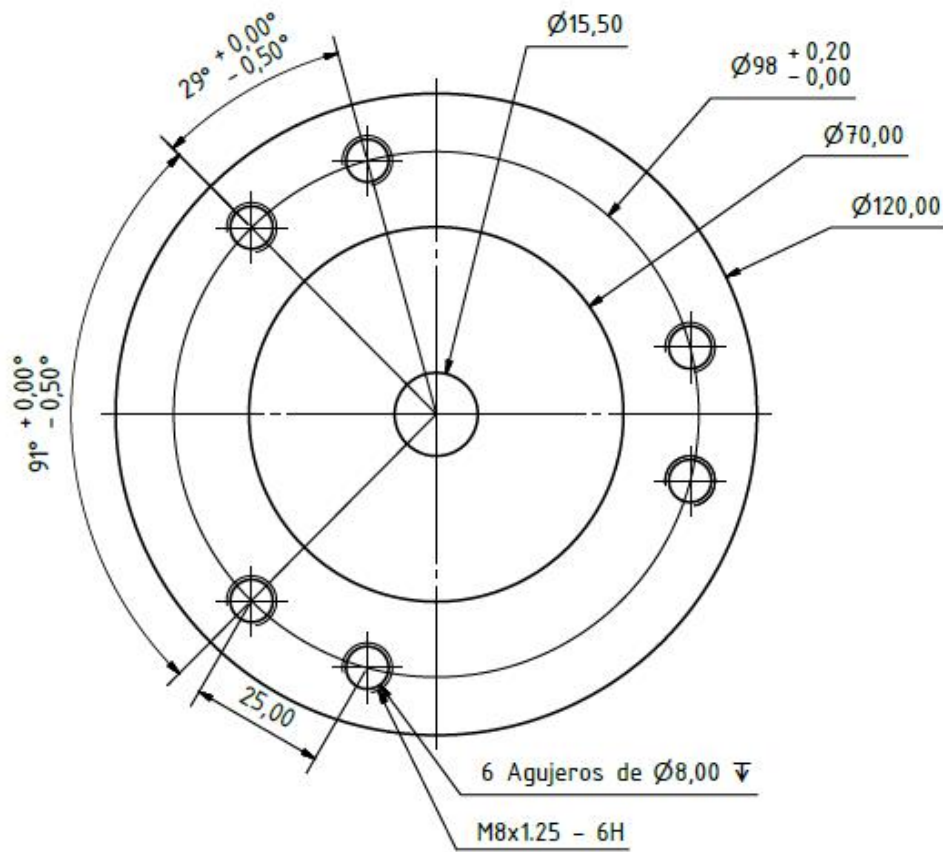
ELIMINAR REBASAS Y ARISTAS VIVAS SALVO INDICACIONES. NO TOCAR MEDIDAS SOBRE EL PLANO.
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO EN EL PLANO: COTAS EN mm

Material:	
Formato:	A3
Escala:	1:7
Representación:	
Folio:	N/A
Hoja:	1 de 1

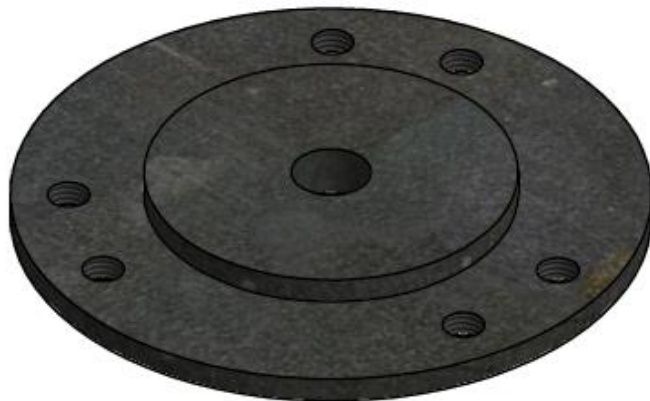
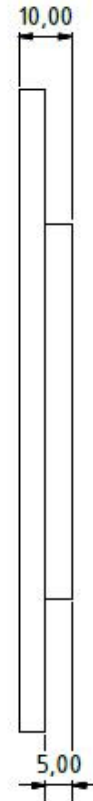
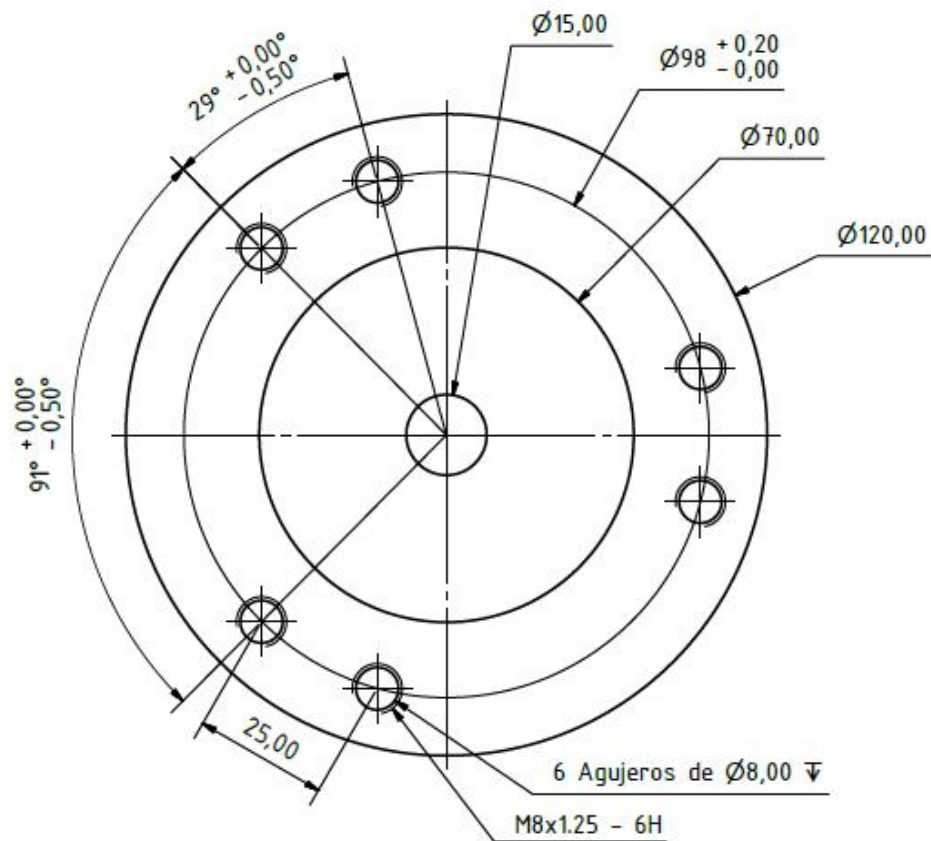
Proyecto:	Banco eólico de eje vertical
Asignatura:	Trabajo De Grado
Nombre de la pieza:	Aerogenerador
Código de la pieza:	A-01
Nota:	

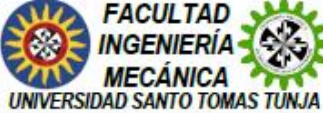


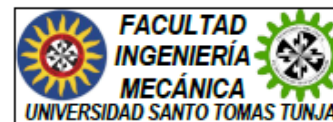
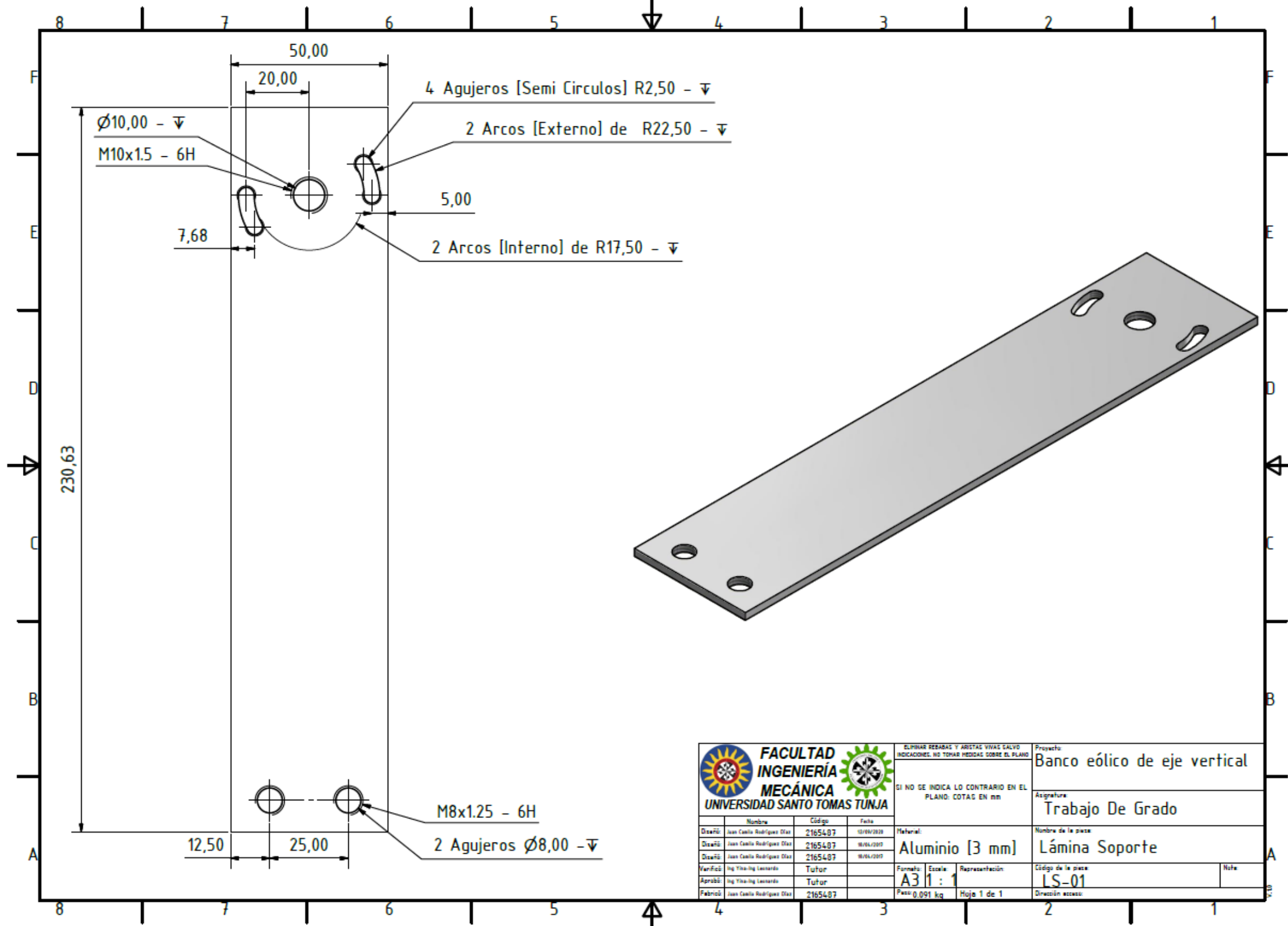
 FACULTAD INGENIERÍA MECÁNICA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS TUNJA						ELIMINAR DESBAGAS Y ARISTAS VIVAS CALVO INDICACIONES, NO TOMAR MEDIDAS SOBRE EL PLANO		Proyecto: Banco eólico de eje vertical							
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO EN EL PLANO: COTAS EN mm						Signature: Trabajo De Grado									
						Material: Acero									
						Nombre de la pieza: Eje Semiroscado.									
						Formato:		Escala:		Representación:		Código de la pieza: E-SR		Nota:	
Verificó: Ing Yina Ing Lacerda Tutor						A3		1 : 4							
Aprobó: Ing Yina Ing Lacerda Tutor						Peso:		N/A		Hoja 1 de 1		Dirección acceso:			
Fabricó: Juan Carlos Rodríguez Díaz 2165487															



FACULTAD INGENIERÍA MECÁNICA UNIVERSIDAD SANTO TOMAS TUNJA				ELIMINAR REDADAS Y ARISTAS VIVAS SALVO INDICACIONES. NO TOMAR MEDIDAS SOBRE EL PLANO.		Proyecto: Banco eólico de eje vertical	
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO EN EL PLANO: COTAS EN mm				Material: Acero		Asignatura: Trabajo De Grado	
Nombre: Juan Carlos Rodríguez Díaz Código: 2165487 Fecha: 10/09/2019				Nombre de la pieza: Disco Soporte		Código de la pieza: DS-0	
Verificó: Ing. Yina Ing. Leonardo Tutor:				Formato: A3 Escala: 1:1 Representación:		Hoja 1 de 1	
Firmó: Juan Carlos Rodríguez Díaz Código: 2165487				Dirección:		Nota:	



			ELIMINAR BOMBAS Y ARISTAS VIVAS CALVO INDICACIONES. NO TOMAR MEDIDAS SOBRE EL PLANO		Proyecto
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO EN EL PLANO: COTAS EN mm					Banco eólico de eje vertical
					Asignatura
					Trabajo De Grado
					Nombre de la pieza
					Disco Soporte 2
					Código de la pieza
					DS-0
					Nota
					Dirección acceso:

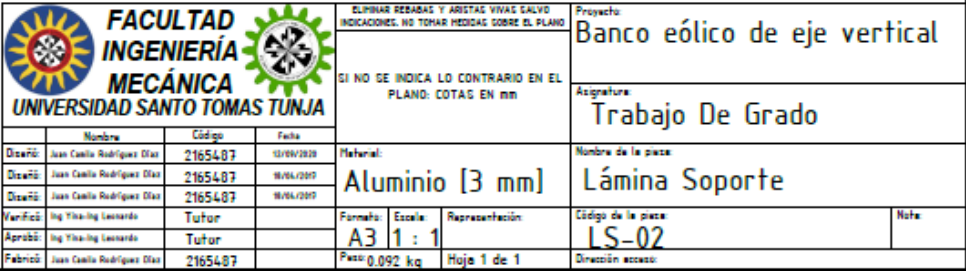


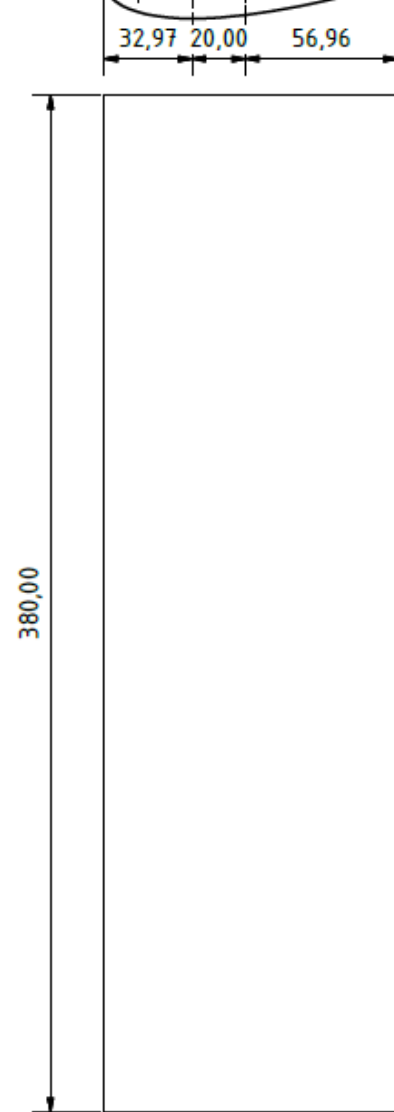
Nombre	Código	Fecha
Diseño: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487	13/09/2023
Diseño: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487	18/01/2024
Diseño: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487	18/01/2024
Verificó: Ing Yira Ing Lacerda	Tutor	
Aprobó: Ing Yira Ing Lacerda	Tutor	
Fabricó: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487	

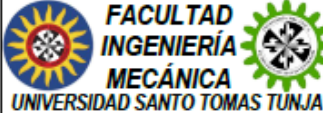
ELIMINAR REDONDEOS Y ARISTAS VIVAS SALVO INDICACIONES. NO TOMAR MEDIDAS SOBRE EL PLANO.
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO EN EL PLANO, COTAS EN mm

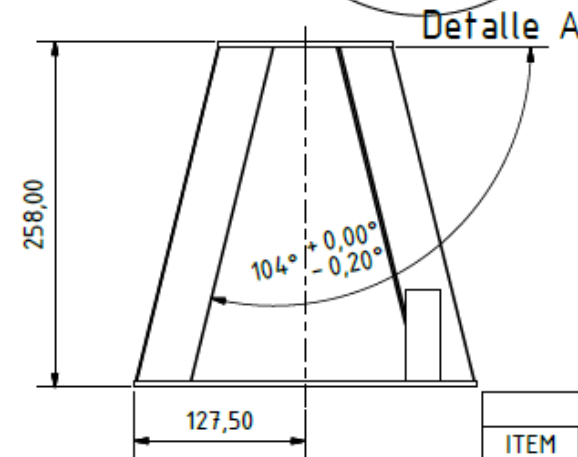
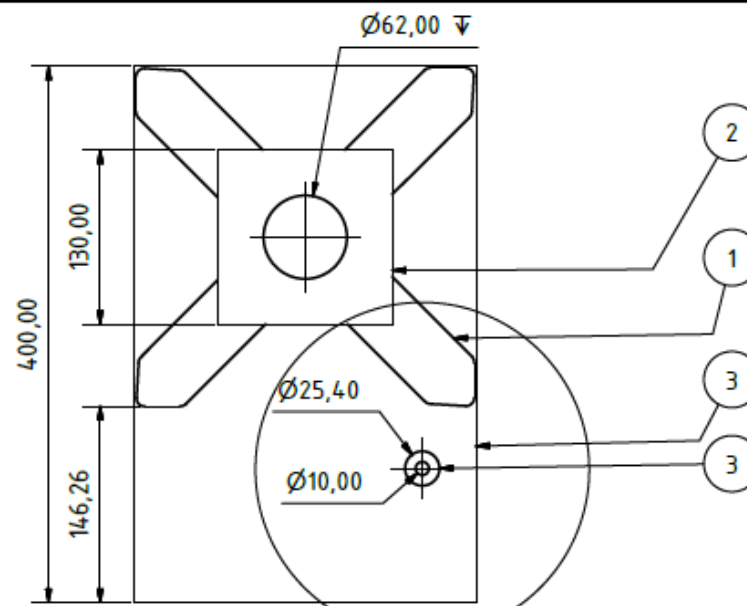
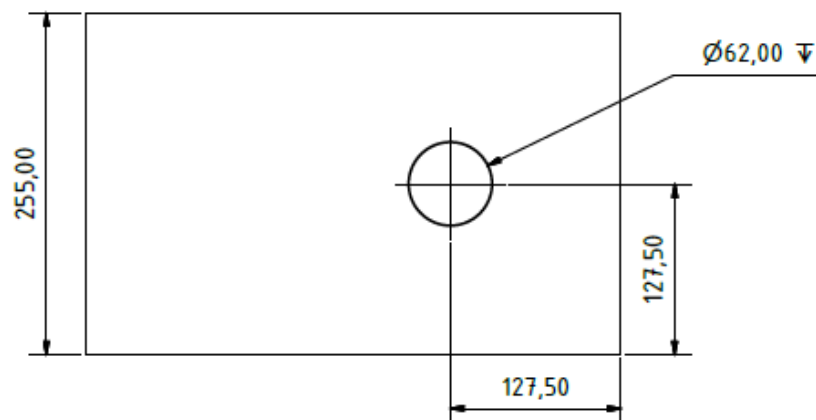
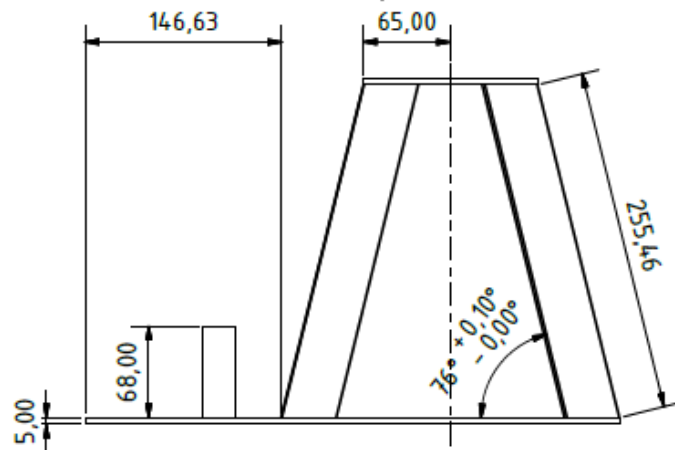
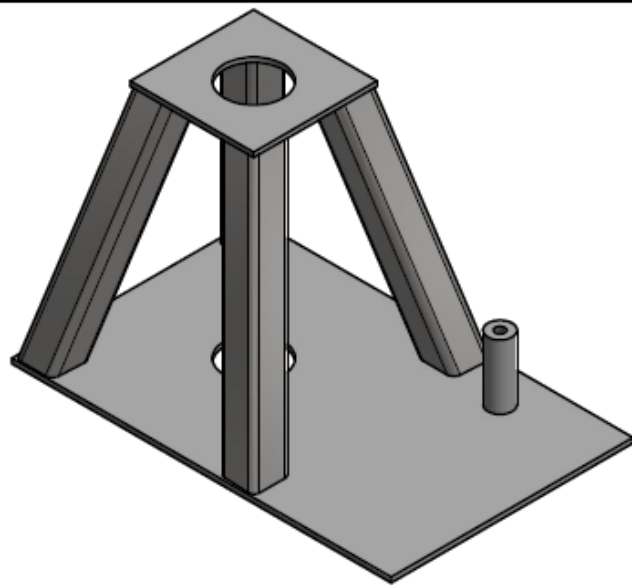
Material:	Aluminio [3 mm]
Formato:	A3
Escala:	1 : 1
Representación:	Hoja 1 de 1
Peso:	0,091 kg

Proyecto:	Banco eólico de eje vertical
Asignatura:	Trabajo De Grado
Nombre de la pieza:	Lámina Soporte
Código de la pieza:	LS-01
Nota:	
Dirección asesor:	

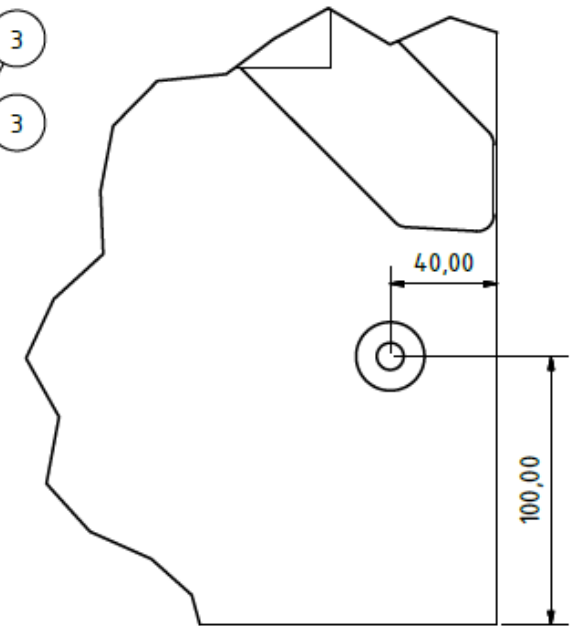




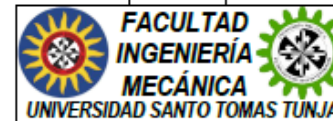
 FACULTAD INGENIERÍA MECÁNICA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS TUNJA			ELIMINAR RESABAS Y ARISTAS VIVAS CALVO INDICACIONES. NO TOMAR MEDIDAS SOBRE EL PLANO. SI NO SE INDICA LO CONTRARIO EN EL PLANO: COTAS EN mm		Proyecto: Banco eólico de eje vertical Asignatura: Trabajo De Grado													
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nombre</th> <th>Código</th> <th>Fecha</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Diseño: Juan Carlos Rodríguez Díaz</td> <td>2165487</td> <td>18/07/2019</td> </tr> <tr> <td>Diseño: Juan Carlos Rodríguez Díaz</td> <td>2165487</td> <td>18/04/2019</td> </tr> <tr> <td>Diseño: Juan Carlos Rodríguez Díaz</td> <td>2165487</td> <td>18/04/2019</td> </tr> </tbody> </table>			Nombre	Código	Fecha	Diseño: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487	18/07/2019	Diseño: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487	18/04/2019	Diseño: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487	18/04/2019	Material: Aluminio		Nombre de la pieza: Perfil NACA	
Nombre	Código	Fecha																
Diseño: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487	18/07/2019																
Diseño: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487	18/04/2019																
Diseño: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165487	18/04/2019																
Verificó: Ing Yira-Ing Leonardo Aprobó: Ing Yira-Ing Leonardo Fabricó: Juan Carlos Rodríguez Díaz			Tutor: Tutor: 2165487		Formato: Escala: Representación: A3 1 : 2 Peso: N/A Hoja 1 de 1													
					Código de la pieza: PN0025 Dirección:													



DETALLE A (1 : 2)



PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1126,060 mm	Tubo Cuadrado (1 1/2x1 1/2x1/8)	Tubo CR
2	1	Placa Superior	Lámina de acero
3	1	Placa Inferior	Lámina de acero
4	1	Torre tornillo de sujeción	Acero



Nombre	Código	Fecha
Diseñó: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165407	15/06/2017
Diseñó: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165407	16/06/2017
Diseñó: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165407	16/06/2017
Verificó: Ing Yilayng Leonardo	Tutor	
Aprobó: Ing Yilayng Leonardo	Tutor	
Revisó: Juan Carlos Rodríguez Díaz	2165407	

ELIMINAR REBASAS Y ARISTAS VIVAS SALVO INDICACIONES. NO TONAR MEDIDAS SOBRE EL PLANO.
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO EN EL PLANO: COTAS EN mm

Material:	Forma:	Escala:	Representación:
-	A3	1 : 4	Hoja 1 de 1
Peso: N/A			

Proyecto:	Banco eólico de eje vertical
Asignatura:	Trabajo De Grado
Nombre de la pieza:	Estructura Aerogenerador.
Código de la pieza:	E-AG
Dirección acceso:	

Anexo B, código G, programación de los tres procesos de mecanizado en CNC de los álabes, (Rectificación de caras; desbaste grueso; acabado superficial)

(PLANEADO CARAS)
(T5 D=12. CR=0. - ZMIN=-3.22 - FLAT END MILL)

G21
G40
G49
G80
G90

M5
T5 M6
S5000 M3
G54
G0 B0. C0.
G17
G0 X68.281 Y-210.508 Z15.
G94 G1 Z5. F1000.
Z0.98
G18 G3 X67.081 Z-0.22 R1.2
G1 X60.5
X-60.5
G17 G2 X-63.466 Y-207.542 R2.966
X-60.5 Y-204.576 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-201.61 R2.966
X60.5 Y-198.644 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-195.678 R2.966
X-60.5 Y-192.712 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-189.745 R2.966
X60.5 Y-186.779 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-183.813 R2.966
X-60.5 Y-180.847 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-177.881 R2.966
X60.5 Y-174.915 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-171.949 R2.966
X-60.5 Y-168.983 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-166.017 R2.966
X60.5 Y-163.051 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-160.085 R2.966
X-60.5 Y-157.119 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-154.153 R2.966

X60.5 Y-151.187 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-148.221 R2.966
X-60.5 Y-145.255 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-142.289 R2.966
X60.5 Y-139.323 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-136.356 R2.966
X-60.5 Y-133.39 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-130.424 R2.966
X60.5 Y-127.458 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-124.492 R2.966
X-60.5 Y-121.526 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-118.56 R2.966
X60.5 Y-115.594 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-112.628 R2.966
X-60.5 Y-109.662 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-106.696 R2.966
X60.5 Y-103.73 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-100.764 R2.966
X-60.5 Y-97.798 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-94.832 R2.966
X60.5 Y-91.866 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-88.9 R2.966
X-60.5 Y-85.934 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-82.967 R2.966
X60.5 Y-80.001 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-77.035 R2.966
X-60.5 Y-74.069 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-71.103 R2.966
X60.5 Y-68.137 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-65.171 R2.966
X-60.5 Y-62.205 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-59.239 R2.966

X60.5 Y-56.273 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-53.307 R2.966
X-60.5 Y-50.341 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-47.375 R2.966
X60.5 Y-44.409 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-41.443 R2.966
X-60.5 Y-38.477 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-35.511 R2.966
X60.5 Y-32.545 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-29.578 R2.966
X-60.5 Y-26.612 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-23.646 R2.966
X60.5 Y-20.68 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-17.714 R2.966
X-60.5 Y-14.748 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-11.782 R2.966
X60.5 Y-8.816 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-5.85 R2.966
X-60.5 Y-2.884 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y0.082 R2.966
X60.5 Y3.048 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y6.014 R2.966
X-60.5 Y8.98 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y11.946 R2.966
X60.5 Y14.912 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y17.878 R2.966
X-60.5 Y20.845 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y23.811 R2.966
X60.5 Y26.777 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y29.743 R2.966
X-60.5 Y32.709 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y35.675 R2.966

X60.5 Y38.641 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y41.607 R2.966
X-60.5 Y44.573 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y47.539 R2.966
X60.5 Y50.505 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y53.471 R2.966
X-60.5 Y56.437 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y59.403 R2.966
X60.5 Y62.369 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y65.335 R2.966
X-60.5 Y68.301 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y71.267 R2.966
X60.5 Y74.234 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y77.2 R2.966
X-60.5 Y80.166 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y83.132 R2.966
X60.5 Y86.098 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y89.064 R2.966
X-60.5 Y92.03 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y94.996 R2.966
X60.5 Y97.962 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y100.928 R2.966
X-60.5 Y103.894 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y106.86 R2.966
X60.5 Y109.826 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y112.792 R2.966
X-60.5 Y115.758 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y118.724 R2.966
X60.5 Y121.69 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y124.656 R2.966
X-60.5 Y127.623 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y130.589 R2.966

X60.5 Y133.555 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y136.521 R2.966
X-60.5 Y139.487 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y142.453 R2.966
X60.5 Y145.419 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y148.385 R2.966
X-60.5 Y151.351 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y154.317 R2.966
X60.5 Y157.283 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y160.249 R2.966
X-60.5 Y163.215 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y166.181 R2.966
X60.5 Y169.147 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y172.113 R2.966
X-60.5 Y175.079 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y178.045 R2.966
X60.5 Y181.012 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y183.978 R2.966
X-60.5 Y186.944 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y189.91 R2.966
X60.5 Y192.876 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y195.842 R2.966
X-60.5 Y198.808 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y201.774 R2.966
X60.5 Y204.74 R2.966
G1 X-60.5
G18 G3 X-61.7 Z0.98 R1.2
G1 Z5.
X-68.281 Y-210.508
Z-0.02
G2 X-67.081 Z-1.22 R1.2
G1 X-60.5
X60.5
G17 G3 X63.466 Y-207.542 R2.966
X60.5 Y-204.576 R2.966
G1 X-60.5

G2 X-63.466 Y-201.61 R2.966
X-60.5 Y-198.644 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-195.678 R2.966
X60.5 Y-192.712 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-189.745 R2.966
X-60.5 Y-186.779 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-183.813 R2.966
X60.5 Y-180.847 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-177.881 R2.966
X-60.5 Y-174.915 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-171.949 R2.966
X60.5 Y-168.983 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-166.017 R2.966
X-60.5 Y-163.051 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-160.085 R2.966
X60.5 Y-157.119 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-154.153 R2.966
X-60.5 Y-151.187 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-148.221 R2.966
X60.5 Y-145.255 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-142.289 R2.966
X-60.5 Y-139.323 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-136.356 R2.966
X60.5 Y-133.39 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-130.424 R2.966
X-60.5 Y-127.458 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-124.492 R2.966
X60.5 Y-121.526 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-118.56 R2.966
X-60.5 Y-115.594 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-112.628 R2.966
X60.5 Y-109.662 R2.966
G1 X-60.5

G2 X-63.466 Y-106.696 R2.966
X-60.5 Y-103.73 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-100.764 R2.966
X60.5 Y-97.798 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-94.832 R2.966
X-60.5 Y-91.866 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-88.9 R2.966
X60.5 Y-85.934 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-82.967 R2.966
X-60.5 Y-80.001 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-77.035 R2.966
X60.5 Y-74.069 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-71.103 R2.966
X-60.5 Y-68.137 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-65.171 R2.966
X60.5 Y-62.205 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-59.239 R2.966
X-60.5 Y-56.273 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-53.307 R2.966
X60.5 Y-50.341 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-47.375 R2.966
X-60.5 Y-44.409 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-41.443 R2.966
X60.5 Y-38.477 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-35.511 R2.966
X-60.5 Y-32.545 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-29.578 R2.966
X60.5 Y-26.612 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-23.646 R2.966
X-60.5 Y-20.68 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-17.714 R2.966
X60.5 Y-14.748 R2.966
G1 X-60.5

G2 X-63.466 Y-11.782 R2.966
X-60.5 Y-8.816 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-5.85 R2.966
X60.5 Y-2.884 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y0.082 R2.966
X-60.5 Y3.048 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y6.014 R2.966
X60.5 Y8.98 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y11.946 R2.966
X-60.5 Y14.912 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y17.878 R2.966
X60.5 Y20.845 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y23.811 R2.966
X-60.5 Y26.777 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y29.743 R2.966
X60.5 Y32.709 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y35.675 R2.966
X-60.5 Y38.641 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y41.607 R2.966
X60.5 Y44.573 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y47.539 R2.966
X-60.5 Y50.505 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y53.471 R2.966
X60.5 Y56.437 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y59.403 R2.966
X-60.5 Y62.369 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y65.335 R2.966
X60.5 Y68.301 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y71.267 R2.966
X-60.5 Y74.234 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y77.2 R2.966
X60.5 Y80.166 R2.966
G1 X-60.5

G2 X-63.466 Y83.132 R2.966
X-60.5 Y86.098 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y89.064 R2.966
X60.5 Y92.03 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y94.996 R2.966
X-60.5 Y97.962 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y100.928 R2.966
X60.5 Y103.894 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y106.86 R2.966
X-60.5 Y109.826 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y112.792 R2.966
X60.5 Y115.758 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y118.724 R2.966
X-60.5 Y121.69 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y124.656 R2.966
X60.5 Y127.623 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y130.589 R2.966
X-60.5 Y133.555 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y136.521 R2.966
X60.5 Y139.487 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y142.453 R2.966
X-60.5 Y145.419 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y148.385 R2.966
X60.5 Y151.351 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y154.317 R2.966
X-60.5 Y157.283 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y160.249 R2.966
X60.5 Y163.215 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y166.181 R2.966
X-60.5 Y169.147 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y172.113 R2.966
X60.5 Y175.079 R2.966
G1 X-60.5

G2 X-63.466 Y178.045 R2.966
X-60.5 Y181.012 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y183.978 R2.966
X60.5 Y186.944 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y189.91 R2.966
X-60.5 Y192.876 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y195.842 R2.966
X60.5 Y198.808 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y201.774 R2.966
X-60.5 Y204.74 R2.966
G1 X60.5
G18 G2 X61.7 Z-0.02 R1.2
G1 Z5.
X68.281 Y-210.508
Z-1.02
G3 X67.081 Z-2.22 R1.2
G1 X60.5
X-60.5
G17 G2 X-63.466 Y-207.542 R2.966
X-60.5 Y-204.576 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-201.61 R2.966
X60.5 Y-198.644 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-195.678 R2.966
X-60.5 Y-192.712 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-189.745 R2.966
X60.5 Y-186.779 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-183.813 R2.966
X-60.5 Y-180.847 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-177.881 R2.966
X60.5 Y-174.915 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-171.949 R2.966
X-60.5 Y-168.983 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-166.017 R2.966
X60.5 Y-163.051 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-160.085 R2.966
X-60.5 Y-157.119 R2.966

G1 X60.5
G3 X63.466 Y-154.153 R2.966
X60.5 Y-151.187 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-148.221 R2.966
X-60.5 Y-145.255 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-142.289 R2.966
X60.5 Y-139.323 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-136.356 R2.966
X-60.5 Y-133.39 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-130.424 R2.966
X60.5 Y-127.458 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-124.492 R2.966
X-60.5 Y-121.526 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-118.56 R2.966
X60.5 Y-115.594 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-112.628 R2.966
X-60.5 Y-109.662 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-106.696 R2.966
X60.5 Y-103.73 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-100.764 R2.966
X-60.5 Y-97.798 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-94.832 R2.966
X60.5 Y-91.866 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-88.9 R2.966
X-60.5 Y-85.934 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-82.967 R2.966
X60.5 Y-80.001 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-77.035 R2.966
X-60.5 Y-74.069 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-71.103 R2.966
X60.5 Y-68.137 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-65.171 R2.966
X-60.5 Y-62.205 R2.966

G1 X60.5
G3 X63.466 Y-59.239 R2.966
X60.5 Y-56.273 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-53.307 R2.966
X-60.5 Y-50.341 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-47.375 R2.966
X60.5 Y-44.409 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-41.443 R2.966
X-60.5 Y-38.477 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-35.511 R2.966
X60.5 Y-32.545 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-29.578 R2.966
X-60.5 Y-26.612 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-23.646 R2.966
X60.5 Y-20.68 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-17.714 R2.966
X-60.5 Y-14.748 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-11.782 R2.966
X60.5 Y-8.816 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-5.85 R2.966
X-60.5 Y-2.884 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y0.082 R2.966
X60.5 Y3.048 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y6.014 R2.966
X-60.5 Y8.98 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y11.946 R2.966
X60.5 Y14.912 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y17.878 R2.966
X-60.5 Y20.845 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y23.811 R2.966
X60.5 Y26.777 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y29.743 R2.966
X-60.5 Y32.709 R2.966

G1 X60.5
G3 X63.466 Y35.675 R2.966
X60.5 Y38.641 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y41.607 R2.966
X-60.5 Y44.573 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y47.539 R2.966
X60.5 Y50.505 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y53.471 R2.966
X-60.5 Y56.437 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y59.403 R2.966
X60.5 Y62.369 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y65.335 R2.966
X-60.5 Y68.301 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y71.267 R2.966
X60.5 Y74.234 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y77.2 R2.966
X-60.5 Y80.166 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y83.132 R2.966
X60.5 Y86.098 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y89.064 R2.966
X-60.5 Y92.03 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y94.996 R2.966
X60.5 Y97.962 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y100.928 R2.966
X-60.5 Y103.894 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y106.86 R2.966
X60.5 Y109.826 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y112.792 R2.966
X-60.5 Y115.758 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y118.724 R2.966
X60.5 Y121.69 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y124.656 R2.966
X-60.5 Y127.623 R2.966

G1 X60.5
G3 X63.466 Y130.589 R2.966
X60.5 Y133.555 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y136.521 R2.966
X-60.5 Y139.487 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y142.453 R2.966
X60.5 Y145.419 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y148.385 R2.966
X-60.5 Y151.351 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y154.317 R2.966
X60.5 Y157.283 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y160.249 R2.966
X-60.5 Y163.215 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y166.181 R2.966
X60.5 Y169.147 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y172.113 R2.966
X-60.5 Y175.079 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y178.045 R2.966
X60.5 Y181.012 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y183.978 R2.966
X-60.5 Y186.944 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y189.91 R2.966
X60.5 Y192.876 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y195.842 R2.966
X-60.5 Y198.808 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y201.774 R2.966
X60.5 Y204.74 R2.966
G1 X-60.5
G18 G3 X-61.7 Z-1.02 R1.2
G1 Z5.
X-68.281 Y-210.508
Z-2.02
G2 X-67.081 Z-3.22 R1.2
G1 X-60.5
X60.5
G17 G3 X63.466 Y-207.542 R2.966

X60.5 Y-204.576 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-201.61 R2.966
X-60.5 Y-198.644 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-195.678 R2.966
X60.5 Y-192.712 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-189.745 R2.966
X-60.5 Y-186.779 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-183.813 R2.966
X60.5 Y-180.847 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-177.881 R2.966
X-60.5 Y-174.915 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-171.949 R2.966
X60.5 Y-168.983 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-166.017 R2.966
X-60.5 Y-163.051 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-160.085 R2.966
X60.5 Y-157.119 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-154.153 R2.966
X-60.5 Y-151.187 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-148.221 R2.966
X60.5 Y-145.255 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-142.289 R2.966
X-60.5 Y-139.323 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-136.356 R2.966
X60.5 Y-133.39 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-130.424 R2.966
X-60.5 Y-127.458 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-124.492 R2.966
X60.5 Y-121.526 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-118.56 R2.966
X-60.5 Y-115.594 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-112.628 R2.966

X60.5 Y-109.662 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-106.696 R2.966
X-60.5 Y-103.73 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-100.764 R2.966
X60.5 Y-97.798 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-94.832 R2.966
X-60.5 Y-91.866 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-88.9 R2.966
X60.5 Y-85.934 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-82.967 R2.966
X-60.5 Y-80.001 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-77.035 R2.966
X60.5 Y-74.069 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-71.103 R2.966
X-60.5 Y-68.137 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-65.171 R2.966
X60.5 Y-62.205 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-59.239 R2.966
X-60.5 Y-56.273 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-53.307 R2.966
X60.5 Y-50.341 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-47.375 R2.966
X-60.5 Y-44.409 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-41.443 R2.966
X60.5 Y-38.477 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-35.511 R2.966
X-60.5 Y-32.545 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-29.578 R2.966
X60.5 Y-26.612 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-23.646 R2.966
X-60.5 Y-20.68 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-17.714 R2.966

X60.5 Y-14.748 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y-11.782 R2.966
X-60.5 Y-8.816 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y-5.85 R2.966
X60.5 Y-2.884 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y0.082 R2.966
X-60.5 Y3.048 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y6.014 R2.966
X60.5 Y8.98 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y11.946 R2.966
X-60.5 Y14.912 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y17.878 R2.966
X60.5 Y20.845 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y23.811 R2.966
X-60.5 Y26.777 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y29.743 R2.966
X60.5 Y32.709 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y35.675 R2.966
X-60.5 Y38.641 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y41.607 R2.966
X60.5 Y44.573 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y47.539 R2.966
X-60.5 Y50.505 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y53.471 R2.966
X60.5 Y56.437 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y59.403 R2.966
X-60.5 Y62.369 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y65.335 R2.966
X60.5 Y68.301 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y71.267 R2.966
X-60.5 Y74.234 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y77.2 R2.966

X60.5 Y80.166 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y83.132 R2.966
X-60.5 Y86.098 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y89.064 R2.966
X60.5 Y92.03 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y94.996 R2.966
X-60.5 Y97.962 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y100.928 R2.966
X60.5 Y103.894 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y106.86 R2.966
X-60.5 Y109.826 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y112.792 R2.966
X60.5 Y115.758 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y118.724 R2.966
X-60.5 Y121.69 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y124.656 R2.966
X60.5 Y127.623 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y130.589 R2.966
X-60.5 Y133.555 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y136.521 R2.966
X60.5 Y139.487 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y142.453 R2.966
X-60.5 Y145.419 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y148.385 R2.966
X60.5 Y151.351 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y154.317 R2.966
X-60.5 Y157.283 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y160.249 R2.966
X60.5 Y163.215 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y166.181 R2.966
X-60.5 Y169.147 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y172.113 R2.966

X60.5 Y175.079 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y178.045 R2.966
X-60.5 Y181.012 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y183.978 R2.966
X60.5 Y186.944 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y189.91 R2.966
X-60.5 Y192.876 R2.966
G1 X60.5
G3 X63.466 Y195.842 R2.966
X60.5 Y198.808 R2.966
G1 X-60.5
G2 X-63.466 Y201.774 R2.966
X-60.5 Y204.74 R2.966
G1 X60.5
G18 G2 X61.7 Z-2.02 R1.2
G1 Z15.
G17

M5
M30