



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN AEROGENERADOR DE EJE  
VERTICAL DE BAJA POTENCIA

AUTOR:

JUAN PABLO PUERTA MARTÍNEZ

Informe final de Trabajo de Grado

DIRECTOR:

ING. EMIL HERNÁNDEZ ARROYO

DOCENTE ING. MECÁNICA

UPB - BUCARAMANGA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2021

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL DE  
BAJA POTENCIA

AUTOR:

JUAN PABLO PUERTA MARTÍNEZ

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Mecánico

DIRECTOR:

ING. EMIL HERNÁNDEZ ARROYO

DOCENTE ING. MECÁNICA

UPB - BUCARAMANGA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

---

Firma del presidente del Jurado

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

### **Dedicatoria**

En primer lugar, dedico este logro a Dios por darme la oportunidad de cumplir esta meta, ya que permitió que mi familia me brindara la posibilidad de llegar a ser un ingeniero mecánico, además de la sabiduría con la que me colmó durante el proceso de estudio.

En segundo lugar, dedico este logro a mis padres y hermana que con todos sus esfuerzos, consejos y apoyo incondicional me ayudaron a culminar esta meta, la cual significa mucho para mí como para ellos, pues con esto puedo aportar mi granito de arena ante la sociedad.

Y, en tercer lugar, dedico este logro a mis amigos y allegados que estuvieron conmigo

## **Agradecimientos**

Quiero expresar mis sinceros agradecimientos:

A Dios, por nunca abandonarme durante este largo camino como ingeniero mecánico donde tuve momentos buenos como malos pero que gracias a la sabiduría y fortaleza brindada pude afrontar estas situaciones de la mejor manera.

A mis padres, porque siempre estuvieron ahí dándome ese apoyo y motivación para que esta gran meta de mi vida sea posible.

Al ingeniero Emil Hernández Arroyo, por la confianza y sus sabios aportes durante la realización del proyecto.

A mi tío Javier Puerta Rosado, por aportarme su colaboración y sus conocimientos durante la realización del proyecto.

A mi prima Natalia Puerta Rangel, por aportarme su colaboración y motivación durante la realización del documento. Además, de ser muy exigente con la elaboración de este.

A mis compañeros, amigos y familiares que quizás no se involucraron en la realización de este proyecto pero que sí estuvieron ahí conmigo durante este largo camino apoyándome.

Juan Pablo Puerta Martínez

## Tabla de contenido

Introducción .....	12
Justificación .....	14
Planteamiento del problema.....	16
1. Objetivos.....	17
1.1    Objetivo general .....	17
1.2    Objetivos específicos.....	17
2. Marco Teórico.....	22
2.1    El viento y su energía .....	18
2.1.1  Energía .....	18
2.1.2  Energía eólica.....	18
2.1.3  Origen de la energía eólica .....	18
2.1.4  Potencia del viento.....	19
2.1.5  Variación de la velocidad del viento con respecto a la altura.....	20
2.1.6  La rosa de los vientos.....	21
2.1.7  Vientos en Colombia.....	22
2.2    Turbinas Eólicas .....	24
2.2.1  Aerogenerador de eje horizontal.....	25
2.2.2  Aerogenerador de eje vertical .....	26
2.2.3  Rotor Savonius.....	27

2.2.4	Rotor Darrieus.....	28
2.2.5	Rotor Darrieus de alabe recto o tipo H .....	29
2.2.6	Ley de Betz .....	30
2.2.7	Rendimiento de los aerogeneradores .....	34
3.	Estudio del Recurso Eólico Disponible.....	40
3.1	Lugar de estudio .....	36
3.2	Medición de datos eólicos .....	36
3.3	Procedimiento y cálculos de los datos eólicos.....	36
3.4	Distribución de Weibull.....	37
4.	Desarrollo del Diseño.....	46
4.1	Enfoque.....	42
4.2	Velocidad de diseño.....	43
4.3	Potencia nominal .....	43
4.4	Dimensiones del rotor.....	45
4.5	Solidez del rotor.....	47
4.6	Solidez en función del TSR (Tip Speed Ratio) .....	48
4.7	BAR (Wing Aspect Ratio).....	49
4.8	Cuerda del perfil .....	50
4.9	Diámetro del rotor .....	51
4.10	Altura de los álabes.....	51
5.	Detalle de Diseño y Construcción.....	57
5.1	Rotor .....	53

5.2	Eje.....	54
5.3	Sistema de transmisión .....	64
5.4	Sujeción .....	67
5.5	Álabes .....	68
5.6	Estructura del aerogenerador .....	69
5.7	Sistema de generación eléctrica.....	70
6.	Análisis de Resultados.....	77
6.1	Evaluación experimental del aerogenerador.....	73
6.2	Evaluación técnica del aerogenerador .....	80
6.3	Especificaciones ENAIR E200 .....	81
6.3	Presupuesto.....	83
	Conclusiones .....	85
	Recomendaciones .....	87
	Bibliografías.....	89
	Anexos .....	91

## Índice de figuras

Figura 1. Recirculación de viento .....	19
Figura 2. Variación de la capa límite con respecto a la altura sobre el emplazamiento ...	21
Figura 3. Rosa de viento de estación meteorológica de Riohacha.....	22
Figura 4. Ciclo anual de la velocidad media del viento en Colombia a 10 m de altura....	24
Figura 5. Aerogenerador de eje horizontal con 3 palas .....	26
Figura 6. Rotor Savonius .....	27
Figura 7. Aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus.....	29
Figura 8. Rotor Darrieus tipo H .....	30
Figura 9. Comportamiento flujo del viento antes y después de pasar por aerogenerador	31
Figura 10. Curva de eficiencia de Betz.....	33
Figura 11. Valores de Cp para diferentes tipos de aerogeneradores.....	35
Figura 12. Curva distribución de Weibull.....	41
Figura 13. Valores de Cp para diferentes tipos de aerogeneradores.....	44
Figura 14. Valores estándar de la densidad del aire a presión atmosférica .....	46
Figura 15. Solidez en función del TSR.....	49
Figura 16. Cp vs TSR para varios valores de BAR .....	50
Figura 17. Rotor del aerogenerador .....	53
Figura 18. Propiedades de diseño del acero 1020.....	55
Figura 19. Resistencia a la fatiga en función a la resistencia a la tensión según la condición superficial del acero forjado.....	56
Figura 20. Factores de confiabilidad aproximados .....	56

Figura 21. Factor por tamaño con respecto al diámetro del eje .....	57
Figura 22. Figura 22. Diagrama de fuerzas en el eje .....	59
Figura 23. Diagrama de fuerzas cortantes.....	62
Figura 24. Diagrama de momento flector .....	63
Figura 25. Sistema de poleas con correa.....	65
Figura 26. Sistema de transmisión del aerogenerador .....	67
Figura 27. Caja de chumacera.....	68
Figura 28. Álabes del rotor .....	69
Figura 29. Estructura del aerogenerador .....	70
Figura 30. Sistema de generación eléctrica.....	71
Figura 31. Funcionamiento del sistema de generación eléctrica .....	72
Figura 32. Aerogenerador construido .....	73
Figura 33. Posición del ventilador primera prueba.....	74
Figura 34. Toma de dato de 6V .....	75
Figura 35. Toma de dato de 7V .....	76
Figura 36. Toma de dato de 8V .....	76
Figura 37. Posición del ventilador segunda prueba .....	77
Figura 38. Toma de dato de 10V .....	78
Figura 39. Toma de dato de 11V .....	78
Figura 40. Toma de dato de 12V .....	79
Figura 41. Ficha técnica ENAIR E200 .....	81

### Índice de tablas

Tabla 1. Resultados obtenidos luego de aplicar el método estadístico .....	40
Tabla 2. Ficha técnica aerogenerador .....	81
Tabla 3. Presupuesto aerogenerador .....	83

## Índice de anexos

Anexo 1. Registro de datos de estación meteorológica aeropuerto almirante padilla .....	91
Anexo 2. Cálculo de la aplicación del método de la distribución de Weibull a datos del 6 de abril de 2020.....	95
Anexo 3. Cálculo de la aplicación del método de la distribución de Weibull a datos del 7 de abril de 2020.....	98

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL DE BAJA POTENCIA

**AUTOR(ES):** Juan Pablo Puerta Martínez

**PROGRAMA:** Facultad de Ingeniería Mecánica

**DIRECTOR(A):** Emil Hernández Arroyo

### RESUMEN

El presente trabajo de grado abarca el diseño y construcción de un aerogenerador de eje vertical para la generación de electricidad a través de la energía eólica, y así, abastecer la carga energética para un banco de baterías. El desarrollo de esta investigación se llevó a cabo en la ciudad de Riohacha (La Guajira), lugar que solo cuenta con aerogeneradores de eje horizontal. El diseño del aerogenerador propuesto contempla el desarrollo de un rotor de eje vertical tipo Darrieus con cuatro álabes rectos en el rotor, diferenciándolo de otras máquinas similares, ya que normalmente este tipo de aerogeneradores poseen tres álabes, además el modelo propuesto incluye la implementación de un sistema multiplicador de velocidad. La estructura propuesta para este proyecto, inicialmente cita aspectos teóricos sobre la energía eólica, los sistemas de generación eólicos y los principios que rigen el funcionamiento de estas máquinas. Se describe el estudio del recurso eólico disponible en el lugar de instalación donde se mencionan los principales aspectos y se desarrollan los cálculos para su debida evaluación. Se detalla el proceso de diseño explicando las piezas mecánicas que integran el aerogenerador y las variables involucradas para el desarrollo de cálculos y dimensionamiento de este. Por último, se hace énfasis en las piezas más importante de la construcción del aerogenerador teniendo en cuenta los ítems de diseño. En el análisis de resultados se muestra los datos obtenidos de las pruebas experimentales que dan lugar a las conclusiones y recomendaciones para la construcción y puesta en funcionamiento del aerogenerador. El modelo baso su construcción en materiales livianos y adecuados para la geometría del aerogenerador. De esta forma, el prototipo se construyó con un diámetro de 1,38 m y una altura de 0,94 m en su rotor y, así, el área barrida por el viento es de  $1,29 \text{ m}^2$ .

### PALABRAS CLAVE:

Energía eólica, aerogenerador, recurso eólico, diseño, construcción.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

## GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

**TITLE:** DESING AND CONSTRUCTION OF A VERTICAL AXIS LOW POWER WIND GENERATOR

**AUTHOR(S):** Juan Pablo Puerta Martínez

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Mecánica

**DIRECTOR:** Emil Hernández Arroyo

### ABSTRACT

This degree work covers the design and construction of a vertical axis wind turbine for the generation of electricity through wind energy, and thus, supply the energy load for a battery bank. The development of this research was carried out in the city of Riohacha (La Guajira), a place that only has horizontal axis wind turbines. The design of the proposed wind turbine contemplates the development of a Darrieus-type vertical axis rotor with four straight blades in the rotor, differentiating it from other similar machines, since normally this type of wind turbine has three blades; in addition the proposed model includes the implementation of a speed multiplier system. The proposed structure for this project, initially cites theoretical aspects about wind energy, generation systems and the principles that govern the operation of these machines. The study of the wind resource available at the installation site is described; where the main aspects are mentioned and the calculations are developed for their due evaluation. The design process is detailed explaining the mechanical parts that make up the wind turbine and the variables involved for the development of calculations and its sizing. Finally, emphasis is placed on the most important parts of the wind turbine construction, taking into account the design items. The results analysis shows the data obtained from the experimental test that give rise to the conclusions and recommendations for the construction and commissioning of the wind turbine. The model based its construction on lightweight materials suitable for the geometry of the turbine. In this way, the prototype was built with a diameter of 1,38 m and a height of 0,94 m in its rotor and, thus, the area swept by the wind is 1,29 m<sup>2</sup>.

### KEYWORDS:

Wind energy, wind turbine, wind resource, design, construction.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

## Introducción

A finales del siglo XX, uno de los principales temas de discusión que se plantea a nivel mundial ha sido el cambio climático ya que este es un fenómeno global que está generando grandes consecuencias tales como el calentamiento global, la emisión de gases efecto invernadero, el aumento del nivel de mar, la deforestación, entre otros; afectando de una u otra forma a las poblaciones y el sector económico de los países. Por esto, el cambio climático es un reto global que requiere de una concientización colectiva y el trabajo coordinado de todos los países.

En la actualidad, la mayor parte de la demanda energética a nivel mundial es suplida por la energía térmica. Esta es, la energía que se obtiene a partir del calor generado por la combustión de fósiles tales como el carbón, el petróleo y el gas natural. El uso de combustibles fósiles es la Nota primordial de emisiones de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), el principal gas de efecto invernadero que causa el cambio climático (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, 2008). La emisión de gases efecto invernadero, es uno de los asuntos que más preocupa a la población mundial por lo que es muy frecuente a diario haciendo de este una de las amenazas más graves hacia el medio ambiente lo cual conlleva al riguroso cambio climático.

Debido a lo anterior, ha aumentado el interés hacia la investigación y el desarrollo de Notas de energías alternativas que sean sostenibles y que causen menor impacto sobre el medio ambiente con el fin de disminuir el uso de combustibles fósiles que satisfagan la demanda energética. A partir de esto, la investigación en la materia se ha dirigido hacia tecnologías que permitan el aprovechamiento de recursos inagotables tales como la radiación solar, el viento, los saltos de agua, las olas del mar, la vegetación o el calor interior de la tierra.

Hoy por hoy, la energía eólica es una de las fuentes de energías renovables no convencionales que ha generado mayor interés en los últimos años, debido a que no contamina ni el aire ni el agua ni el medio ambiente y, además, su producción de energía es muy eficiente lo que la hace ambientalmente sostenible.

En vista de lo anterior, los aerogeneradores de eje vertical se caracterizan por tener su eje de rotación en dirección perpendicular al suelo y cuentan con la capacidad de recibir el viento en cualquier dirección de giro.

Es por todo lo anterior que el presente proyecto tiene como objetivo principal diseñar y construir un aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus de álabe recto. Para el desarrollo de su contenido, en primer lugar, se presenta el marco conceptual con el cual se busca contextualizar al lector sobre los temas y los principios que abarcan la investigación. Luego, se desarrolla un estudio del recurso eólico disponible en el lugar de instalación, teniendo en cuenta los conceptos y los cálculos que interfieren para su desarrollo. Posteriormente, se expone el diseño del aerogenerador, considerando las variables y los cálculos efectuados para obtener el dimensionamiento de la máquina. Después se presenta la etapa de diseño y construcción donde se describe cada componente mecánico del aerogenerador. Más adelante, se hará alusión a la ficha técnica y al presupuesto del aerogenerador. Finalmente, se concluirá y se enunciarán las recomendaciones para optimizar trabajos a futuros.

## Justificación

Debido al cambio climático, el desarrollo energético a nivel mundial tiene como prioridad buscar alternativas que traten de independizar los sistemas de generación energética de las fuentes de abastecimiento actuales las cuales son no renovables, por tanto, en algún momento se van a agotar, sumándole que estas ocasionan impactos negativos hacia el medio ambiente en consecuencia a la emisión de gases efecto invernadero.

La generación energética a partir de energías renovables ha tomado fuerza en los últimos años, principalmente por el desarrollo de nuevas tecnologías; las cuales basan su principio en el uso de energías limpias, y esto se evidencia en la reducción de los costos, tanto ambientales como económicos y la capacidad de poder solventar la crisis de generación energética a nivel mundial a pequeña y media escala, dado que su potencial de producción energética es muy elevado.

Debido a esta gran demanda energética a nivel mundial se ha hecho un gran esfuerzo en aspectos de investigación y desarrollo ante la búsqueda de Notas de energía alternativas que contribuyan a disminuir la dependencia energética de los combustibles fósiles e hidroeléctricas, y así, reemplazarlas con estos recursos inagotables tales como la radiación solar, el viento, los saltos de agua, las olas del mar, la vegetación o el calor interior de la tierra. Como bien se ha mencionado, la importancia de la implementación de la energía eólica radica en su bajo nivel de incidencia en cuanto a los daños ambientales. En consecuencia, a lo anterior, la energía eólica es una de las energías renovables con mayores perspectivas.

Los aerogeneradores de eje vertical presentan distintas ventajas con respecto a los de eje horizontal ya que las primeras necesitan velocidades de viento más bajas para operar y aprovechan la fuerza directa del viento, bajo costo de mantenimiento y menos daño al ecosistema. Bajo esta

perspectiva, este proyecto contempla el diseño y construcción de un aerogenerador de eje vertical para suplir demandas energéticas de baja potencia.

### **Planteamiento del problema**

En un mundo como el actual, en el que existe una mayor conciencia por la preservación de los recursos naturales y una creciente preocupación por vivir y generar avances de manera sostenible, el cuestionamiento sobre la generación eléctrica obtenida a través de los combustibles fósiles no se ha hecho esperar. Si bien este tipo de fuente energética ha sido fundamental para el desarrollo económico de las sociedades, el cual parece no responder por completo a las preocupaciones actuales de la humanidad por sus consecuencias negativas sobre el medio ambiente. De lo anterior, surge una aparente dicotomía expresada en el siguiente cuestionamiento: ¿cómo diseñar un elemento que pueda responder a la demanda energética, pero al mismo tiempo genere poco impacto sobre el medio ambiente?

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo general

- Diseñar, construir y evaluar un aerogenerador de eje vertical teniendo en cuenta la potencia útil y los principios de la mecánica de fluidos, con el fin de abastecer un banco de baterías que dará suministro a aplicaciones de baja potencia.

### 1.2 Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica de aerogeneradores de eje vertical. **Resultado:** Informe de base de datos y artículos científicos. **Indicador:** Revisar al menos 10 artículos que contengan información detallada sobre proyectos de aerogeneradores de eje vertical.

- Diseñar un aerogenerador de eje vertical estimando el potencial eólico disponible en el sitio de instalación, para luego seleccionar el tipo de turbina más adecuado en base a una matriz de decisiones. **Resultado:** Planos y modelo del aerogenerador. **Indicador:** Los cálculos del diseño del aerogenerador se realizarán basados en las ecuaciones de la mecánica de fluidos.

- Construir un aerogenerador de eje vertical, teniendo en cuenta las especificaciones del diseño y los planos del aerogenerador. **Resultado:** Presentar un aerogenerador de eje vertical funcional. **Indicador:** El aerogenerador será construido de acuerdo a los planos y a las condiciones de construcción estimada.

- Evaluar el desempeño del aerogenerador a partir del voltaje generado. **Resultado:** Ficha técnica del aerogenerador. **Indicador:** Comparar las características obtenidas del aerogenerador con relación a otro modelo. Los valores obtenidos del aerogenerador con valores de aerogeneradores convencionales de similares características.

## **2. Marco Teórico**

### **2.1 El viento y su energía**

#### **2.1.1 Energía**

La energía se define como la capacidad que tienen las partículas de realizar un trabajo, movimiento o cambio. Puede presentarse de dos formas, las cuales son: energía potencial (energía almacenada) o como energía cinética (energía en acción), siendo estas dos formas interconvertibles, es decir, la energía potencial liberada se convierte en energía cinética, y esta cuando se acumula se transforma en energía potencial. La energía solo puede ser transformada de una forma a otra (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina [CONICET], 18 de octubre de 2004).

#### **2.1.2 Energía eólica**

La energía eólica es aquella que se obtiene a través del viento o, dicho de otra forma, la energía cinética aprovechada de las corrientes de aire, que es transformada en energía mecánica, y que luego se puede convertir en electricidad por medio de un generador eléctrico con el fin de abastecer las actividades humanas. Así mismo, es un tipo de energía renovable o energía limpia; se considera energía renovable la obtenida de recursos naturales considerados inagotables. En cuanto a su producción, esta se aprovecha por medio de una turbina eólica o aerogenerador, que poseen unas palas o álabes que reciben el flujo de viento provocando su giro; este movimiento es transportado por el eje que soporta las palas o álabes hacia al generador, el cual transforma la energía mecánica producida por ese movimiento y la convierte en electricidad.

#### **2.1.3 Origen de la energía eólica**

Su origen se encuentra en el movimiento de las masas de aire sobre la tierra a diferentes temperaturas, originadas por distintas intensidades de radiación solar, a nivel global o local, las cuales producen corrientes ascendentes y descendentes, formando anillos de circulación del aire. En la Figura 1 se observa que cuando las masas de aire se calientan se elevan por la falta de densidad, luego estas se enfrían. Entonces, las masas de aire que están frías se ponen en movimiento para ocupar su lugar y así sucesivamente (Corporación Eléctrica del Ecuador [CELEC], 2019).

**Figura 1. Recirculación de viento**



**Nota.** Adaptado de *¿Qué es la Energía Eólica?*, por CELEC, 2019, (<https://www.celec.gob.ec/gensur/index.php/contacto/direccion/2-uncategorised/47-que-es-laenergia-eolica>)

#### 2.1.4 Potencia del viento

La potencia del viento es un ítem muy importante para obtener la potencia del aerogenerador, es decir, que a partir de ella se obtiene cuánta energía un aerogenerador puede convertir en electricidad. Para calcularla, se evalúa la energía cinética de la masa de aire que atraviesa la sección barrida de las palas o álabes por unidad de tiempo, la cual se describe de la siguiente forma:

$$P_v = \frac{E_c}{t} = \frac{mv^2}{2t} \quad (1.1)$$

Aplicando derivada en la ecuación 1.1, se reduce a:

$$P_v = \frac{dE}{dt} = \frac{\rho Av^3}{2} \quad (1.2)$$

Donde:

$P_v$ : Potencia del viento [W].

$\rho$ : Densidad del aire [ $kg/m^3$ ].

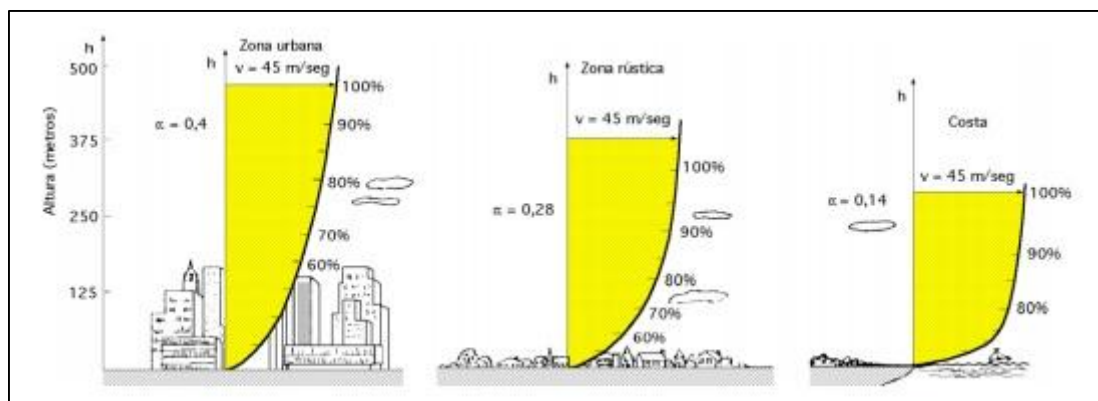
A: Área de barrido [ $m^2$ ].

v: Velocidad del viento [ $m/s$ ].

### 2.1.5 Variación de la velocidad del viento con respecto a la altura

La velocidad del viento varía con respecto a la altura debido a la fricción que presenta por la rugosidad del terreno y/o los obstáculos cercanos. También depende de la estación del año y/o la hora del día. Esto, hasta una altura límite donde la velocidad del viento no es afectada por dicha fricción, llamada altura de gradiente. La Figura 2 ilustra el comportamiento de la velocidad del viento dependiendo del emplazamiento en el que se encuentre y como este es afectado por la rugosidad del emplazamiento.

**Figura 2. Variación de la capa límite con respecto a la altura sobre el emplazamiento**



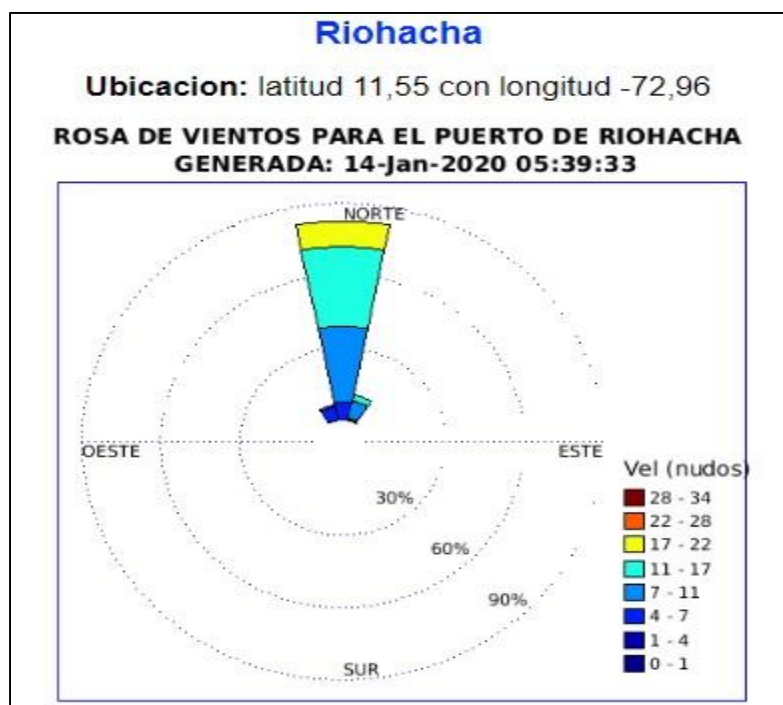
**Nota.** Adaptado de *Caracterización del viento* (p. 18), por Anónimo, sin fecha,  
(<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5116/fichero/Capítulo+2.pdf>)

A partir de la Figura 2 se puede concluir que, a medida que las corrientes de viento estén más cercana a la superficie mayor va a ser la rugosidad, por lo tanto, la velocidad de las corrientes de viento disminuirá por efectos de desaceleración.

### 2.1.6 La rosa de los vientos

La rosa de los vientos permite visualizar las distribuciones de velocidades del viento y la frecuencia en sus diferentes direcciones como se muestra en la Figura 3.

**Figura 3. Rosa de viento de estación meteorológica de Riohacha**



**Nota:** Adaptado de *Climatología del Caribe*, por Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH), 2020, (<https://www.cioh.org.co/meteorologia/Climatologia/ResumenRiohacha4.php>)

### 2.1.7 Vientos en Colombia

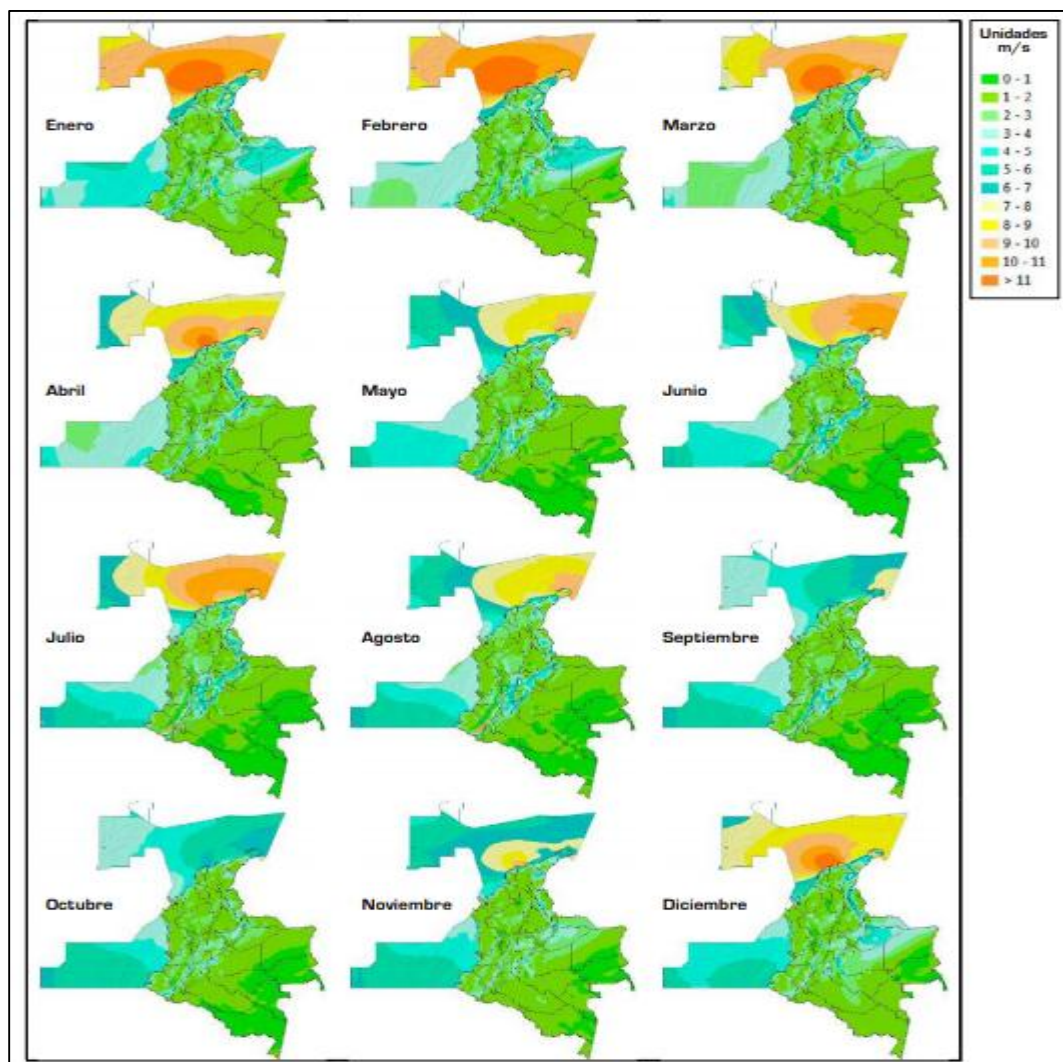
El clima de Colombia es bastante influenciado por sus cordilleras, debido a que estas absorben y emiten la radiación solar, lo que hace que estas actúen como fuentes de calor produciendo su propia circulación atmosférica. A partir de esto, los vientos en el interior del país, por lo general son de baja velocidad independientemente de la estación del año.

Las principales corrientes de viento en el país son cuatro; tres de ellas son vientos alisios, una proveniente del noroeste que son aquellos que llevan la humedad hacia la región colombiana situada más hacia el sur de la línea del Ecuador. La siguiente, son los vientos alisios del sureste que llevan la humedad y el calor hacia el territorio colombiano hacia el hemisferio norte. También,

se encuentran los vientos alisios del noroeste que soplan en la mayor parte del país y que usualmente transportan gran cantidad de lluvia acumulada. Por último, están los vientos del oeste que son aquellos que modifican el clima más hacia la zona Pacífica y que, llegan desde el océano y se estrellan con la cordillera Occidental. Estos hacen que se produzca abundante lluvia en toda la región costera durante todo el año.

Según datos de la IDEAM, el viento tiene mayor movilidad entre las 12:00 pm a 3:00 pm del día y los meses con mayor velocidad media de viento en el año son enero y febrero (Clima 24/7, 21 de abril de 2014, 1m58s). La Figura 4 ilustra el comportamiento de la velocidad del viento durante los meses del año a una altura de 10 metros.

Figura 4. Ciclo anual de la velocidad media del viento en Colombia a 10 m de altura



**Nota:** Adaptado de *Atlas de viento de Colombia* (p. 55), por J. F. Ruíz Murcia, J. Serna Cuenca & H. J. Zapata Lesmes, 2017.

## 2.2 Turbinas Eólicas

Según la Asociación Empresarial Eólica [AEE] se considera como turbina eólica o aerogenerador, a las máquinas que son empleadas para transformar la fuerza del viento en electricidad. En estas máquinas, se aprovecha la energía cinética rotacional del aire que

proporciona energía mecánica a un rotor que, por medio de un sistema de transmisión mecánico, lleva este movimiento hacia un generador, haciendo que este transforme la energía mecánica rotacional en electricidad.

Las turbinas eólicas se pueden clasificar de acuerdo a la manera en que captan la potencia eólica, su geometría y la posición del eje de rotación. Aunque la principal clasificación se debe a la posición del eje de rotación. De acuerdo a esto se dividen en:

### **2.2.1 Aerogenerador de eje horizontal**

Su principal característica es que su rotor gira en dirección perpendicular del viento como se ilustra en la Figura 5. Estas, se clasifican según la velocidad de giro de sus rotores. Por lo tanto, la velocidad de giro es inversamente proporcional al número de alabes que tenga, es decir, que es mayor que la componente de resistencia.

**Figura 5. Aerogenerador de eje horizontal con 3 palas**



**Nota:** Adaptado de *Aerogenerador de eje horizontal Victory 60*, por Tozzi Green, sin fecha,  
(<https://www.archiexpo.es/prod/tozzi-green/product-62400-1822149.html>)

### **2.2.2 Aerogenerador de eje vertical**

Su principal característica es que su rotor gira en dirección perpendicular al suelo, tienen la capacidad de adaptarse a cualquier dirección de la corriente de viento por lo que también se les conoce como “Panemonos” que quiere decir todos los vientos, lo que elimina los mecanismos de orientación. Debido a esto, pueden trabajar de dos formas: por la diferencia de coeficiente de arrastre entre las dos mitades del área barrida por el viento (Savonius) o por la fuerza de

sustentación que presentan los álabes al recibir la corriente del viento (Darrieus). Actualmente existen 2 diseños básicos, los cuales se presentan a continuación:

### 2.2.3 Rotor Savonius

El rotor Savonius es un tipo de aerogenerador de eje vertical más simple en cuanto a su funcionamiento y fue inventado por el ingeniero finlandés Sigurd Savonius en 1922. Su principio se basa en la fuerza de arrastre diferencial sobre dos superficies, es decir, consiste en un cilindro cortado por la mitad, en el cual sus dos mitades se colocan en forma de “S” con el fin de que las partes cóncavas reciban el viento, y así, poder girar. Para mejorar el rendimiento de este sistema se separan las dos mitades del cilindro, dejando un espacio entre ellas para que exista un flujo de aire y no se presente sobre presión como se ilustra en la Figura 6. Este sistema es utilizado para aplicaciones de velocidades de viento bajas.

**Figura 6. Rotor Savonius**



**Nota:** Adaptado de *Energía Eólica*, por Anónimo, 2016, (<http://energiaeolica1101-2016.blogspot.com/2016/05/1.html>)

#### **2.2.4 Rotor Darrieus**

El rotor Darrieus es un tipo de aerogenerador de eje vertical muy popular, debido a los diferentes diseños que se han desarrollado a partir de la geometría de sus alabes, fue inventado por el ingeniero francés George Darrieus en 1931. Este modelo, consta de alabes bien definidos con forma de ala de avión, que son unidos a los extremos del eje con una curva especialmente diseñada para un rendimiento específico como se ilustra en la Figura 7. Para su funcionamiento se requiere la presencia de vientos a velocidades de 4 m/s en adelante, lo que hace que este tenga un buen rendimiento ya que una vez en marcha puede mantenerse gracias a la aerodinámica de sus aletas. En algunos casos, se necesita de un sistema de arranque secundario por lo que no puede arrancar por sí solo.

**Figura 7. Aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus**



**Nota:** Adaptado de *Dornier Darrieus 55*, por Dornier, sin fecha, (<https://es.wind-turbine-models.com/turbines/93-dornier-darrieus-55>)

### **2.2.5 Rotor Darrieus de alabe recto o tipo H**

El rotor Darrieus de alabe recto o tipo H es un modelo donde los álabes son rectos a lo largo del área de barrido y están directamente sostenidos al eje de rotación como se ilustra en la Figura 8. Debido a su diseño este prototipo requiere de una mayor rigidez estructural, lo cual lo hace más compacto y su construcción no es compleja. Por lo general, este rotor presenta de 3 a 4 álabes en su estructura.

**Figura 8. Rotor Darrieus tipo H**



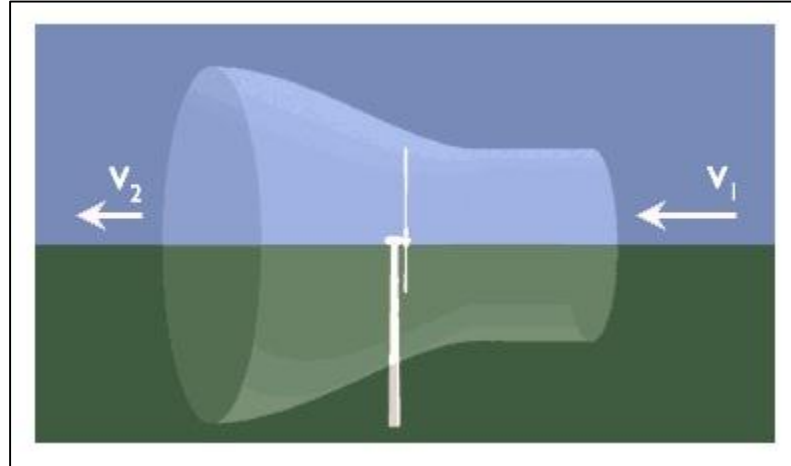
**Nota:** Adaptado de *Best how to build a wind turbine generator*, por KIJ, 2016,

(<https://insafeenergy.blogspot.com/2016/05/best-how-to-build-wind-turbine-generator.html>)

### **2.2.6 Ley de Betz**

Por las leyes de la física, no es posible extraer toda la potencia de viento que pasa por el rotor de un aerogenerador, debido a que el viento a medida que pasa por un obstáculo presenta una desaceleración por la parte de atrás, es decir, este sale con una velocidad menor a la que ha entrado como se ilustra en la Figura 9. Por esto, la potencia máxima eólica aprovechada la define la ley de Betz o límite de Betz.

**Figura 9. Comportamiento flujo del viento antes y después de pasar por aerogenerador**



**Nota:** Adaptado de *¿Cuánta energía se puede sacar del viento? Límite de Betz*, por Energética Futura, 2010, (<https://energeticafutura.com/blog/cuanta-energia-se-puede-sacar-del-viento-limite-de-betz/>)

La ley de Betz fue formulada por el físico alemán Albert Betz en 1919. Esta define la diferencia de velocidad y energía cinética que pasa antes y después de un obstáculo (aerogenerador) en un determinado tiempo, ya que se perturba el movimiento libre del viento. Lo anterior, se relaciona de la siguiente forma:

$$Ec_1 = \frac{mv_1^2}{2} \quad (1.3)$$

$$Ec_2 = \frac{mv_2^2}{2} \quad (1.4)$$

$$Ec_T = Ec_1 - Ec_2 \quad (1.5)$$

Reemplazamos las ecuaciones 1.3 y 1.4 en la ecuación 1.5, y se expresa de la siguiente forma:

$$Ec_T = \frac{m(v_1^2 - v_2^2)}{2} \quad (1.6)$$

Donde:

$Ec_{1,2}$ : Energía cinética antes y después del aerogenerador.

$Ec_T$ : Energía cinética total del sistema.

$m$ : Masa de aire captada por el aerogenerador.

$v_{1,2}$ : Velocidad antes y después del aerogenerador.

El flujo de viento que incide sobre las palas del aerogenerador se describe de la siguiente forma:

$$Q = vA \quad (1.7)$$

Multiplicando la densidad del aire en ambos lados de la ecuación 1.7 se expresa de la siguiente forma:

$$\rho Q = \rho Av = m' \quad (1.8)$$

Despejando  $m'$  de la ecuación 4.8, se expresa de la siguiente forma:

$$m' = \frac{\rho A(v_1 + v_2)}{2} \quad (1.9)$$

Donde,

$A$ : Área barrida por el aerogenerador.

$m'$ : Masa de aire por unidad de tiempo.

$\rho$ : Densidad del aire.

$Q$ : Flujo del aire.

$v_{1,2}$ : Velocidad del viento antes y después del aerogenerador.

Entonces, la potencia captada se describe de la siguiente forma:

$$P_c = m'Ec_T \quad (1.10)$$

Sustituyendo la ecuación 1.9 en la ecuación 1.10, se obtiene:

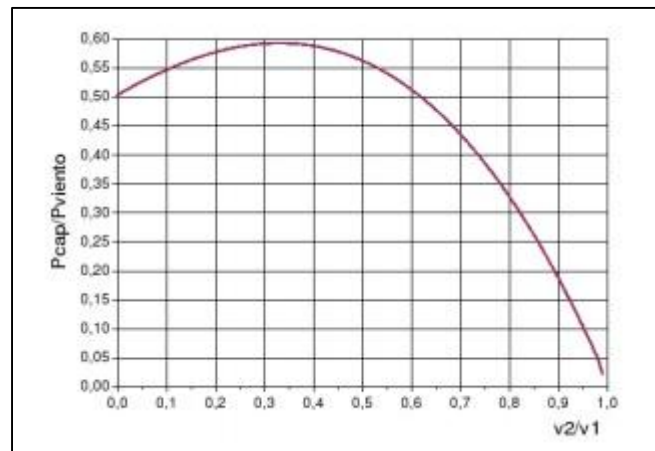
$$P_c = \frac{\rho A(v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2)}{4} \quad (1.11)$$

Luego se relaciona la potencia captada sobre la potencia del viento, obteniendo la siguiente ecuación:

$$\frac{P_c}{P_v} = \frac{(1 - (\frac{v_2}{v_1})^2)(1 + \frac{v_2}{v_1})}{2} \quad (1.12)$$

De la ecuación 1.12, se puede representar  $P_c/P_v$  en función de la  $v_2/v_1$  como se muestra en la Figura 10:

**Figura 10. Curva de eficiencia de Betz**



**Nota:** Adoptado de *Curva de Eficiencia de Betz* (p. 20), por A. Ávila Segura, 2013.

A partir de la curva obtenida, se observa que la máxima potencia que se puede obtener según el límite de Betz es la equivalente a 0,33 de la relación  $v_2/v_1$  quedando de la siguiente forma:

$$P_c = 0,59P_v \quad (1.13)$$

Esta ecuación representa la máxima cantidad de energía del viento que se puede convertir en energía mecánica. Teniendo en cuenta, que no se han considerado algunos factores de operación tales como: la fuerza producida en los álabes debido a la rotación y la presión ejercida por el viento.

### 2.2.7 Rendimiento de los aerogeneradores

Por la descripción de la sección anterior, se sabe que no es posible aprovechar toda la energía del viento para convertirla en energía mecánica. También, dicho límite se disminuye por otros factores los cuales son las pérdidas que se obtienen en el proceso de conversión de la energía eólica en energía eléctrica y las pérdidas que se obtienen por elementos mecánicos tales como la transmisión y rozamientos de los rodamientos y balineras. Esto se puede expresar de la siguiente manera:

$$n_t = n_e n_m C_p \quad (1.14)$$

$$P_n = \frac{P_u}{n_t} \quad (1.15)$$

$$P_n = \frac{n_t \rho A v^3}{2} \quad (1.16)$$

Donde:

$A$ : Área barrida por el aerogenerador.

$C_p$ : Coeficiente de potencia o rendimiento aerodinámico del aerogenerador.

$n_e$ : Rendimiento eléctrico del aerogenerador.

$n_m$ : Rendimiento mecánico del aerogenerador.

$n_t$ : Rendimiento total del aerogenerador.

$\rho$ : Densidad del aire.

$P_n$ : Potencia nominal.

$P_u$ : Potencia útil.

$v$ : Velocidad del viento.

En la Figura 11, se ilustra los  $C_p$  para diferentes tipos de aerogeneradores y otras características de estos.

**Figura 11. Valores de  $C_p$  para diferentes tipos de aerogeneradores**

Wind System	Efficiency, %	
	simple Construction	Optimum Design
Multibladed farm water pump	10	30
Sailwing water pump	10	25
Darrieus water pump	15	30
Savonius windcharger	10	20
Small prop-type windcharger (up to 2kW)	20	30
Medium prop-type windcharger (2 to 10 kW)	20	30
Large prop-type wind generator (over 10 kW)	----	30 to 45
Darrieus wind generator	15	35

**Nota:** Adoptado de *Valores típicos de  $C_p$  para varios tipos de turbinas eólicas* (p. 70), por O. Orduz

Berdugo & J. Suarez Perez, 2011.

### **3. Estudio del recurso eólico disponible**

#### **3.1 Lugar de estudio**

Dado que para el desarrollo de esta investigación se requiere que el lugar de instalación del aerogenerador tenga la presencia de corrientes de vientos constantes, se optó por estudiar el recurso eólico e instalar el aerogenerador en la ciudad de Riohacha (La Guajira). Esto, debido a que esta ciudad se encuentra en la zona costera del país, lo que la hace ideal para el desarrollo del diseño del aerogenerador por la abundancia de vientos que se presentan en este lugar.

#### **3.2 Medición de datos eólicos**

En vista de que esta investigación se realizó en la coyuntura del COVID-19, fue imposible efectuar las mediciones anemométricas en sitios específicos de la zona donde dicho recurso es abundante debido a la limitación impuesta por el Gobierno Nacional colombiano con respecto al desplazamiento de los ciudadanos. Por lo tanto, se consideraron los datos suministrados por las siguientes estaciones meteorológicas de la zona:

Mongui – AUT, ubicado en Mongui corregimiento de Riohacha.

Aeropuerto Almirante Padilla, ubicado en Riohacha.

Comparando los datos suministrado por las dos estaciones meteorológicas, el más favorable en cuanto a la disponibilidad del recurso eólico, fue la estación meteorológica del Aeropuerto Almirante Padilla, ya que por estar un poco alejada de la ciudad el viento no presenta mucha fricción lo que favorece a la captación del flujo de viento proveniente de la zona costera cercana de dicho lugar.

#### **3.3 Procedimiento y cálculos de los datos eólicos**

A continuación, se desarrolla un estudio del potencial eólico en el lugar de instalación, debido a que es necesario evaluar las características del viento en dicho lugar. Esto con el fin de determinar una velocidad promedio para el diseño del aerogenerador por medio del método más utilizado el cual es el análisis estadístico. Para esto, se tomaron los datos eólicos suministrados por la estación meteorológica, la cual, está configurada para registrar datos en intervalos de diez minutos durante todo el día.

En el Anexo I se muestran los datos eólicos suministrados por la estación meteorológica durante dos días.

### 3.4 Distribución de Weibull

También conocida como distribución de las velocidades, fue denunciada por el matemático sueco Waloddi Weibull en el año 1951. Esta se utiliza para describir las características y el comportamiento del viento en movimiento. La función que determina la distribución de las velocidades del viento se describe de la siguiente forma:

$$f(v) = \frac{k}{c} * \frac{v^{k-1}}{c} * e^{-\frac{v^k}{c}} \quad (2.1)$$

Donde:

$c$ : Parámetro de escala [ $m/s$ ].

$k$ : Parámetro de forma.

$v$ : Velocidad del viento registrado [ $m/s$ ].

El parámetro de escala  $c$  determina la velocidad promedio del viento en el lugar de instalación y el parámetro de forma  $k$  indica el grado de dispersión de los datos tomados.

Para empezar el análisis de los datos aplicando la Distribución de Weibull, primero se debe organizar los datos tomados de forma ascendente, como se observa en los Anexos II y III en los

cuales, se tuvieron en cuenta los registros de las 5:30 am hasta las 5:30 pm de los dos días analizados.

Los parámetros de Weibull ( $c, k$ ) se obtienen utilizando el ajuste de mínimos cuadrados, que corresponde a la ecuación de probabilidad de Weibull, que se expresa de la siguiente forma:

$$p(v) = 1 - e^{-\frac{v_i^k}{c}} \quad (2.2)$$

Para ajustar la ecuación 2.2 a la ecuación de la recta  $y = ax + b$ , se hace el siguiente despeje, quedando de la siguiente forma:

$$1 - p(v) = e^{-\frac{v_i^k}{c}} \quad (2.3)$$

Aplicando logaritmo natural en ambos lados de la ecuación 5.3, se obtiene:

$$\ln(1 - p(v)) = -\frac{v_i^k}{c} \quad (2.4)$$

Se pasa el signo negativo al otro lado y se aplica logaritmo natural en ambos lados de la ecuación 2.4, y se obtiene:

$$\ln(-\ln(1 - p(v))) = k \ln(v_i) - k \ln(c) \quad (2.5)$$

Donde:

$v_i$ : Datos registrados de la velocidad del viento de los Anexos II y III.

Ajustado a la ecuación 2.5 a la ecuación de la recta, las variables quedan expresadas de la siguiente forma:

$$y_i = \ln(-\ln(1 - p(v))) \quad (2.6)$$

$$x_i = \ln(v_i) \quad (2.7)$$

$$a = -k \ln(c) \quad (2.8)$$

$$b = k \quad (2.9)$$

Para calcular las variables  $a$  y  $b$ , se hace a partir de las siguientes ecuaciones:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} y_i}{N} - b \frac{\sum_{i=1}^{N_i} x_i}{N} \quad (2.10)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^{N_i} x_i \sum_{i=1}^{N_i} y_i}{N}}{\sum_{i=1}^{N_i} x_i^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{N_i} x_i}{N}\right)^2} \quad (2.11)$$

Donde:

$x_i$ : Velocidad del viento registrada.

$y_i$ : Diferencia numérica.

$N$ : Número de datos.

$N_i$ : Número de orden.

En los Anexos II y III se muestran los datos registrados teniendo en cuenta el procedimiento antes mencionado y con los pasos siguientes para determinar los parámetros  $c$  y  $k$ .

A continuación, en la Tabla 1 se observan los resultados obtenidos luego de aplicarse la Distribución de Weibull del 6 de abril de 2020, se escogió este en la medida en que se compararon los resultados obtenidos de los dos días evaluados y este fue el más conveniente para el desarrollo de la investigación, debido a que la velocidad media fue más alta ya que los vientos fueron constantes durante el rango de análisis y, se espera que su óptima operación se encuentre entre el rango de 9:00 am a 5:30 pm donde los vientos tiene mayor intensidad, lo cual favorece la producción energética.

**Tabla 1. Resultados obtenidos luego de aplicar el método estadístico**

N	Xi	ln(Xi)	P(Xi)	Yi	(ln(Xi))^2	Yi^2	(ln(Xi))(Yi)
73	-	105,096	-	-41,844	165,468	-	-21,574

**Nota:** Elaboración propia.

A partir de estos valores, reemplazamos en las ecuaciones 2.10 y 2.11, y se obtiene:

$$b = \frac{-21,574 - \frac{(105,096)(-41,844)}{73}}{165,468 - \frac{105,096^2}{73}}$$

$$b = 2,73$$

$$a = \frac{-41,844}{73} - (2,73) \left( \frac{105,096}{73} \right)$$

$$a = -4,503$$

Teniendo estos valores, reemplazamos en las ecuaciones 2.8 y 2.9, y se obtiene:

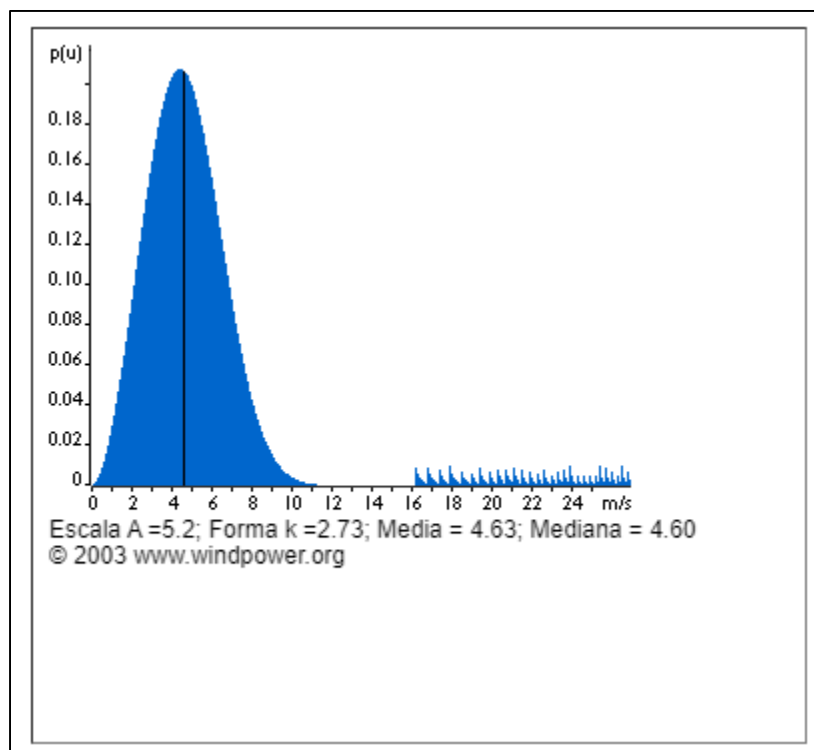
$$c = e^{\frac{4,503}{2,73}}$$

$$c = 5,204$$

$$k = 2,73$$

Una vez obtenidos los parámetros se ingresan los valores en el programa trazador de la Distribución de Weibull, el cual permite establecer con base en los parámetros de escala y forma, el valor de la velocidad media del viento que se usará para el desarrollo del diseño del aerogenerador. Este trazador se encuentra disponible en el sitio web de la Asociación Danesa de la Industria Eólica:

Figura 12. Curva distribución de Weibull



Nota: Elaboración propia.

De acuerdo con la información obtenida de la Figura 12, la velocidad media del viento es:

$$v_m = 4,63 \text{ m/s}$$

## 4. Desarrollo del diseño

### 4.1 Enfoque

El presente proyecto es de tipo experimental, donde se espera diseñar e implementar una herramienta que permite transformar energía eólica en electricidad como una de las fuentes de energía renovable amigable con el medio ambiente.

Lo anterior quiere decir que se pretende desarrollar el diseño con los cálculos pertinentes para que el aerogenerador sea funcional, con el fin de medir la efectividad de la herramienta frente a la producción energética generada hacia un banco de baterías.

La investigación es de tipo cuantitativa, la misma indica que se hace uso de datos numéricos para desarrollar los análisis pertinentes.

En el presente proyecto se diseñará y construirá un aerogenerador de eje vertical denominado tipo Darrieus de álabes rectos, su número de álabes en el rotor serán cuatro. Con base en la revisión bibliográfica realizada se pudo determinar que la mayoría de los aerogeneradores de este tipo normalmente constan de tres álabes en el rotor. Sin embargo, se pretende captar un mayor flujo de viento y así contribuir al rendimiento de todo el sistema, este poseerá cuatro álabes en su rotor. Asimismo, el aerogenerador tendrá un sistema multiplicador de velocidad (sistema de transmisión) con el fin de aumentar las RPM que recibirá el dinamo (generador). Todo ello para que pueda cumplir con la potencia esperada y cuando haya poca intensidad de viento no se dificulte su arranque ni su generación.

Por último, dicho aerogenerador se instalará en Riohacha (La Guajira, Colombia). Al conocimiento del autor, los aerogeneradores de eje vertical, como el que se desarrolla en este trabajo, no han sido de mucha importancia en la zona mencionada, puesto que la mayoría de

aerogeneradores que hay presente son de eje horizontal. De manera que el propósito global de esta investigación es conocer si existe o no una mejoría en cuanto a la generación de electricidad con este tipo de aerogeneradores en dicha zona.

#### **4.2 Velocidad de diseño**

Para dimensionar el rotor es necesario tener conocimiento previo de la velocidad de diseño, factor importante en el diseño del aerogenerador, ya que a partir de este se hacen los respectivos cálculos para determinar las dimensiones del rotor del aerogenerador. La velocidad de diseño es la obtenida en el capítulo anterior, por lo tanto, es:

$$v_d = 4,63 \text{ m/s}$$

#### **4.3 Potencia nominal**

Antes de pasar al cálculo de la potencia nominal, se debe determinar el rendimiento de todo el sistema eólico, teniendo en cuenta el valor del rendimiento aerodinámico del sistema eólico ( $C_p$ ), el cual se selecciona con basado en la posición del rotor y su geometría. En la Figura 13, se indican los valores de  $C_p$  para los diferentes tipos de aerogeneradores:

**Figura 13. Valores de  $C_p$  para diferentes tipos de aerogeneradores**

Wind System	Efficiency, %	
	simple Construction	Optimum Design
Multibladed farm water pump	10	30
Sailwing water pump	10	25
Darrieus water pump	15	30
Savonius windcharger	10	20
Small prop-type windcharger (up to 2kW)	20	30
Medium prop-type windcharger (2 to 10 kW)	20	30
Large prop-type wind generator (over 10 kW)	----	30 to 45
Darrieus wind generator	15	35

**Nota:** Adoptado de *Valores típicos de  $C_p$  para varios tipos de turbinas eólicas* (p. 70), por O. Orduz

Berdugo & J. Suarez Perez, 2011.

Con base en la información de la Figura 13 y al tipo de aerogenerador de eje vertical (Darrieus tipo H) que se seleccionó para diseñar y construir, el rendimiento aerodinámico del sistema eólico es:

$$C_p = 0,35$$

Además del rendimiento aerodinámico, también se debe tener en cuenta el rendimiento mecánico y el eléctrico, según la formula. Se asume un rendimiento mecánico del 90% debido a que se desea conectar el eje a una caja multiplicadora para aumentar los RPM que recibe el dinamo y, este posee piezas que causan perdidas mecánicas como lo son los rodamientos y balineras; y un rendimiento eléctrico del 85% ya que es lo otorgado por el generador. A partir de esto, el rendimiento total del sistema eólico se describe de la siguiente forma:

$$n_t = C_p * n_e * n_m \quad (3.1)$$

Donde:

$C_p$ : Rendimiento aerodinámico o coeficiente de potencia.

$n_e$ : Rendimiento eléctrico.

$n_m$ : Rendimiento mecánico.

Reemplazando los valores en la ecuación se obtiene:

$$n_t = 0,9 * 0,85 * 0,35$$

$$n_t = 0,268$$

Teniendo el valor del rendimiento total, se procede a calcular la potencia nominal. Se estima que el aerogenerador entregue una potencia de:

$$P_u = 20 \text{ W}$$

La potencia nominal se expresa de la siguiente forma:

$$P_n = \frac{P_u}{n_t} \quad (3.2)$$

Reemplazando los valores en la ecuación se obtiene:

$$P_n = \frac{20}{0,268}$$

$$P_n = 74,63 \text{ W}$$

#### 4.4 Dimensiones del rotor

A partir de los valores de la potencia nominal y la velocidad media del viento, se determinan las dimensiones del rotor y de los alabes, también se establecen los criterios para poder operar el aerogenerador. La potencia generada por un rotor eólico se expresa de la siguiente forma:

$$P = \frac{\rho * A * v^3}{2} \quad (3.3)$$

Donde:

$A$ : Área barrida por el rotor [ $m^2$ ].

$\rho$ : Densidad del aire [ $kg/m^3$ ].

$P$ : Potencia generada o nominal [ $W$ ].

$v$ : Velocidad de diseño [ $m/s$ ].

El valor de la densidad se selecciona de acuerdo a la información de la Figura 14 la cual tiene los valores estándar de la densidad del aire a presión atmosférica y también tiene en cuenta la temperatura promedio del lugar de instalación. En este caso, la temperatura promedio suministrada por la estación meteorológica Aeropuerto Almirante Padilla fue de 30°C, por lo tanto, el valor de la densidad es:

$$\rho = 1,165 \text{ kg/m}^3$$

**Figura 14. Valores estándar de la densidad del aire a presión atmosférica**

Temperatura ° Celsius	Temperatura Farenheit	Densidad, es decir, masa de aire seco kg/m <sup>3</sup>	Contenido de agua máx. kg/m <sup>3</sup>
-25	-13	1,423	
-20	-4	1,395	
-15	5	1,368	
-10	14	1,342	
-5	23	1,317	
0	32	1,292	0,005
5	41	1,269	0,007
10	50	1,247	0,009
15	59	1,225 *)	0,013
20	68	1,204	0,017
25	77	1,184	0,023
30	86	1,165	0,030
35	95	1,146	0,039
40	104	1,127	0,051

**Nota:** Adaptado de *Presión del aire a presión atmosférica estándar*, por Asociación Danesa de la Industria Eólica, sin fecha, ([http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-](http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/stat/unitsw.htm#anchor138877)

[content/wind/miller/windpower%20web/es/stat/unitsw.htm#anchor138877](http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/stat/unitsw.htm#anchor138877))

Ahora, de la ecuación 3.3 se despeja el área de barrido y se obtiene:

$$A = \frac{2 * P}{\rho * v^3} \quad (3.4)$$

Reemplazando los valores de cada variable en la ecuación 3.4 se obtiene:

$$A = \frac{2 * 74,63}{1,165 * 4,63^3}$$

$$A = 1,29 \text{ m}^2$$

Se denomina área de barrido al espacio en que gira el rotor el cual hace intersección con cualquier plano que contenga el eje. En un aerogenerador de álabe recto, el área de barrido se define como el diámetro del rotor multiplicado por la longitud del álabe y se expresa de la siguiente forma:

$$A = D * h \quad (3.5)$$

#### 4.5 Solidez del rotor

La solidez del rotor representa el área efectiva de sustentación del rotor, es decir, es la relación entre la superficie de los álabes del rotor con respecto al área de barrido. La solidez se representa de las siguientes formas:

$$\sigma = \frac{N * c * L}{A} \quad (3.6)$$

$$\sigma = \frac{N * c}{D} \quad (3.7)$$

Donde:

A: Área de barrido por el rotor [ $\text{m}^2$ ].

c: Cuerda del perfil [ $\text{m}$ ].

$D$ : Diámetro del rotor [ $m$ ].

$L$ : Longitud de los álabes [ $m$ ].

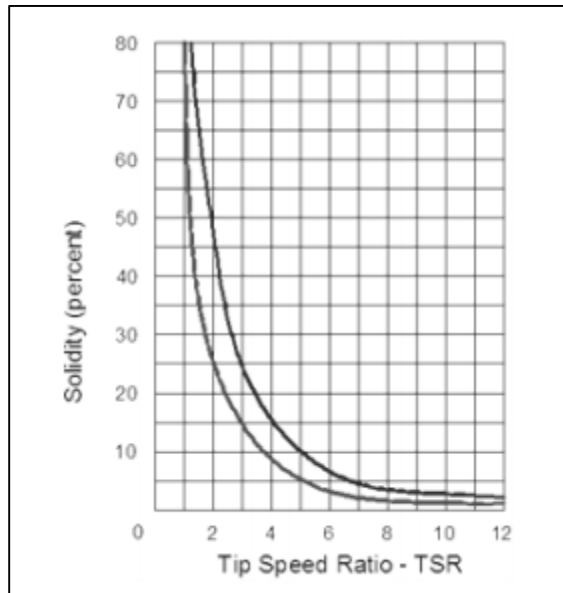
$N$ : Número de álabes.

#### **4.6 Solidez en función del TSR (Tip Speed Ratio)**

El TSR es la relación entre la velocidad tangencial de la punta de un álabe y la velocidad del viento. La solidez con el TSR está relacionada debido a que estos conceptos son cruciales para describir el rendimiento aerodinámico y el comportamiento real del aerogenerador en operación. Se considera que el coeficiente de solidez debe encontrarse entre 0,2 – 0,4, ya que si se tienen valores inferiores a este rango se aumenta la posibilidad de que ocurran fallas en operación tales como dificultad en el arranque, desbalance o desalineamiento.

La Figura 15 relaciona estos dos conceptos y permite seleccionar el valor de la solidez. También, se puede observar que entre mayor sea la solidez los valores de TSR son bajos, lo cual es beneficioso debido a que se tiene un mejor torque de arranque en el aerogenerador lo que permite trabajar con velocidades de viento bajas.

**Figura 15. Solidez en función del TSR**



**Nota:** Adoptado de *Valores típicos de  $C_p$  para varios tipos de turbinas eólicas* (p. 75), por O. Orduz

Berdugo & J. Suarez Perez, 2011.

#### 4.7 BAR (Wing Aspect Ratio)

El BAR define la relación entre la longitud del álabe y la longitud de la cuerda. Esta relación está dada de la siguiente forma:

$$BAR = \frac{L}{c} \quad (3.8)$$

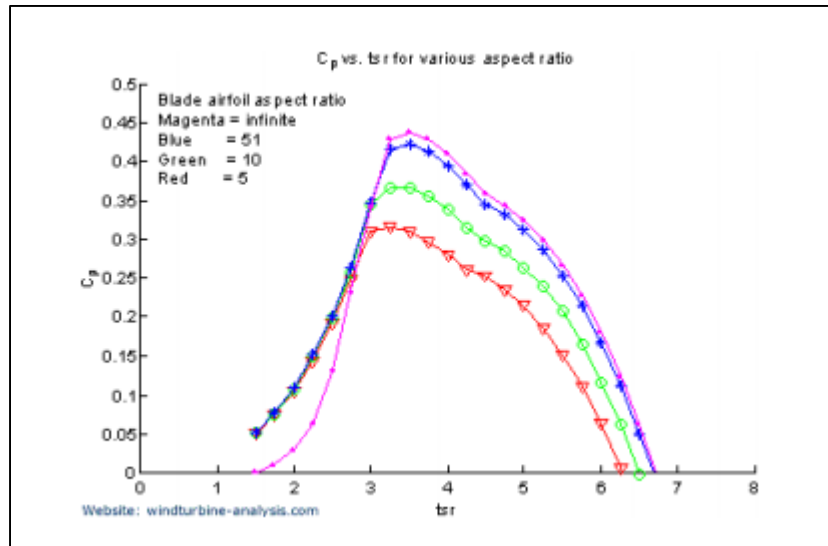
Donde:

$c$ : Cuerda del perfil [ $m$ ].

$L$ : Longitud de los álabes [ $m$ ].

La Figura 16 muestra cómo es el comportamiento del rendimiento aerodinámico con varios valores de BAR.

**Figura 16.  $C_p$  vs TSR para varios valores de BAR**



**Nota:** Adoptado de *Valores típicos de  $C_p$  para varios tipos de turbinas eólicas* (p. 76), por O. Orduz Berdugo & J. Suarez Perez, 2011.

A continuación, se define que el número de álabes para el rotor serán cuatro y se asume los valores de BAR, solidez y TSR los cuales son los siguientes:

$$BAR = 8$$

$$\sigma = 0,32$$

$$TSR = 2,5$$

#### 4.8 Cuerda del perfil

Antes de calcular la cuerda del perfil, se despeja  $L$  de la ecuación 3.8, quedando de la siguiente forma:

$$L = BAR * c \quad (3.9)$$

Reemplazando la ecuación 3.9 en la ecuación 3.6, se obtiene:

$$\sigma = \frac{N * c^2 * BAR}{A} \quad (3.10)$$

Despejando  $c$  de la ecuación 3.10, se obtiene:

$$c = \sqrt{\frac{A * \sigma}{N * BAR}} \quad (3.11)$$

Reemplazando los valores en la ecuación, se obtiene:

$$c = \sqrt{\frac{1,29 * 0,32}{4 * 8}}$$

$$c = 0,11 \text{ m}$$

#### 4.9 Diámetro del rotor

Se despeja  $D$  de la ecuación 3.7, y se obtiene:

$$D = \frac{N * c}{\sigma} \quad (3.12)$$

Reemplazando los valores en la ecuación, se obtiene:

$$D = \frac{4 * 0,11}{0,32}$$

$$D = 1,38 \text{ m}$$

#### 4.10 Altura de los álabes

Se despeja  $h$  de la ecuación 3.5, y se obtiene:

$$h = \frac{A}{D} \quad (3.13)$$

Reemplazando los valores en la ecuación, se obtiene:

$$h = \frac{1,29}{1,38}$$

$$h = 0,94 \text{ m}$$

## **5. Detalle de diseño y construcción**

### **5.1 Rotor**

El rotor es la pieza que se encarga de recibir la energía cinética del viento con el fin de convertirla en energía mecánica en el eje del aerogenerador, esto gracias a la interacción del flujo del viento con los álabes del rotor.

El rotor seleccionado corresponde a la configuración tipo H de álabes rectos (Darrieus) como se ilustra en la Figura 17. El rotor consta de cuatro álabes ubicados hacia los extremos con el propósito de que se originen fuerzas tanto en la parte cóncava y convexa del álabe, para que así, se genere el par necesario que ocasione el giro del rotor. La estructura del rotor se construyó con lámina galvanizada calibre 18, ya que este es un material resistente y por ser galvanizado garantiza poco mantenimiento en cuanto a la corrosión producida por estar a la intemperie y por el alto contenido de sal que hay en el ambiente de la ciudad de Riohacha (La Guajira).

#### **Figura 17. Rotor del aerogenerador**



**Nota:** Elaboración propia.

## 5.2 Eje

El eje es la pieza que une al rotor con el sistema de transmisión, por lo tanto, es el que soporta las cargas transmitidas por todos los elementos del rotor (estructura y álabes). Por lo general, los ejes no transmiten ningún momento de giro, por esto, están sometidos a cargas de flexión.

El eje en la parte superior, se encuentra atornillado a la chumacera que es soportada por la estructura de sujeción y además se apoya al rodamiento que hay dentro de esta. Como está apoyada en dos puntos de la estructura del rotor, el eje funciona de forma similar a una viga empotrada, por lo tanto, se encuentra en voladizo.

Para el diseño del eje, se deben tener en cuenta las propiedades de diseño del material y el factor de diseño. Se pretende usar como eje una varilla roscada de acero 1020 laminado en caliente y se toma un factor de diseño igual a dos ( $N = 2$ ) que es el valor más adecuado para ejes por la

confianza promedio de los datos de diseño. Teniendo en cuenta esto, se halla la resistencia a la fatiga modificada ( $S'_n$ ) que está dada de la siguiente forma:

$$S'_n = S_n * C_s * C_r \quad (4.1)$$

Donde:

$S_n$ : Resistencia a la fatiga [*psi*].

$C_s$ : Factor por tamaño.

$C_r$ : Factor de confiabilidad.

A continuación, en la Figura 18 se observa las propiedades de diseño del acero 1020:

**Figura 18. Propiedades de diseño del acero 1020**

Designación del material (Número AISI)	Condición	Resistencia a la tensión		Resistencia de fluencia		Ductilidad (porcentaje de elongación en 2 pulgadas)	Dureza Brinell (HB)
		(ksi)	(MPa)	(ksi)	(MPa)		
1020	Laminado en caliente	55	379	30	207	25	111
1020	Estirado en frío	61	420	51	352	15	122
1020	Recocido	60	414	43	296	38	121

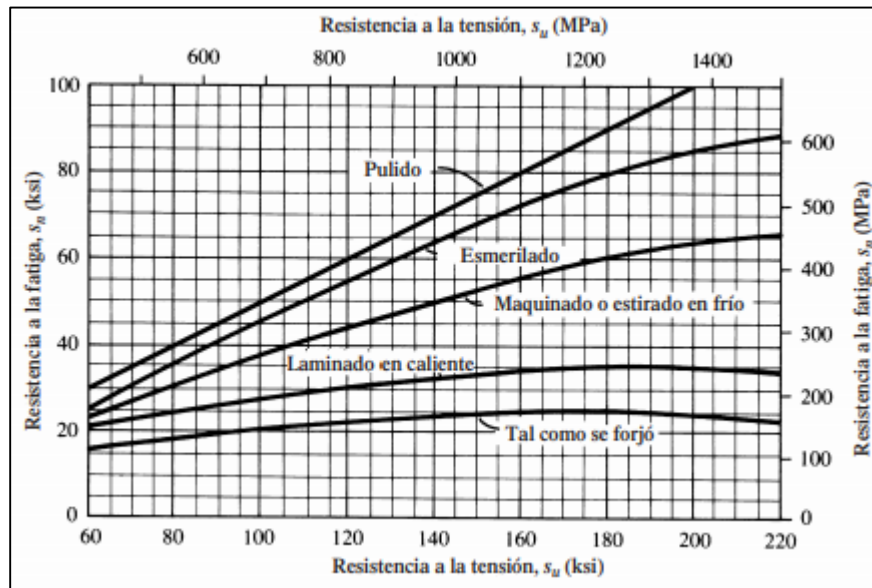
**Nota:** Adaptado de *Diseño de Elementos de Máquinas* (p. 38), por R. L. Mott, 2019.

De acuerdo a lo anterior, el acero 1020 laminado en caliente posee una resistencia a la tensión de:

$$S_u = 55 \text{ ksi}$$

A partir del valor de la resistencia a la tensión, se selecciona el valor de la resistencia a la fatiga de acuerdo a la información de la Figura 19:

**Figura 19. Resistencia a la fatiga en función a la resistencia a la tensión según la condición superficial del acero forjado**



**Nota:** Adaptado de *Diseño de Elementos de Máquinas* (p. 175), por R. L. Mott, 2019.

Según lo anterior, la resistencia a la fatiga es de:

$$S_n = 20 \text{ ksi}$$

En la Figura 20, se observan los distintos valores de confiabilidad:

**Figura 20. Factores de confiabilidad aproximados**

<b>TABLA 5-1</b>	
Factores de confiabilidad aproximados $C_R$	
Confiabilidad deseada $C_R$	
0.50	1.0
0.90	0.90
0.99	0.81
0.999	0.75

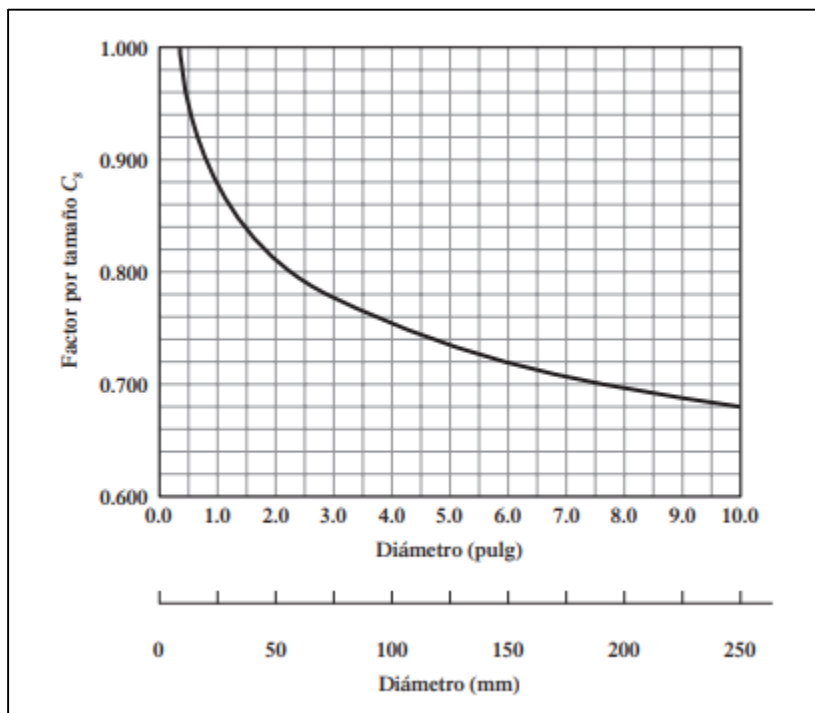
**Nota:** Adaptado de *Diseño de Elementos de Máquinas* (p. 175), por R. L. Mott, 2019.

Para el diseño del eje, se desea una confiabilidad del 99%. Por lo tanto, el valor correspondiente al factor de confiabilidad es de:

$$C_r = 0,81$$

En la Figura 21, se observa la relación del factor por tamaño con respecto al diámetro del eje:

**Figura 21. Factor por tamaño con respecto al diámetro del eje**



**Nota:** Adaptado de *Diseño de Elementos de Máquinas* (p. 175), por R. L. Mott, 2019.

Como se desea que el eje no sea de un diámetro grande, se estima que el valor de factor de tamaño sea de:

$$C_s = 0,9$$

Teniendo estos valores, se reemplaza en la ecuación 4.1 y se obtiene:

$$S'_n = 20000 * 0,81 * 0,9$$

$$S'_n = 14580 \text{ psi}$$

A continuación, se calcula el par torsional ( $T$ ) en el eje que está dada de la siguiente forma:

$$T = \frac{63000 * P}{w} \quad (4.2)$$

Donde:

$P$ : Potencia esperada por el aerogenerador [ $HP$ ].

$w$ : Velocidad angular de diseño [ $rpm$ ].

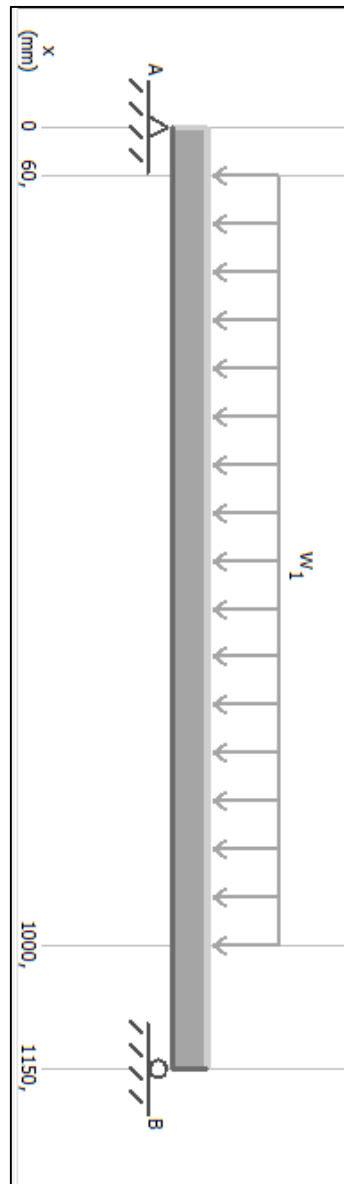
Reemplazando los valores en la ecuación, se obtiene:

$$T = \frac{63000 * 0,0268}{400}$$

$$T = 4.221 \frac{lb}{in}$$

Se estimó que el eje funciona de forma similar a una viga, por lo tanto, está sometida a flexión por consecuencia del flujo del viento. Por esto, se considera que la fuerza del viento actúa como una carga uniforme a lo largo del eje, la cual se representa en la Figura 22:

Figura 22. Diagrama de fuerzas en el eje



**Nota:** Elaboración propia.

Antes de hacer el análisis de fuerza se debe conocer  $w$ , la cual se obtiene de esta forma:

$$F_v = w * d \quad (4.3)$$

$$F_v = P_v * A \quad (4.4)$$

Donde:

$A$ : Área barrida [ $m$ ].

$d$ : Distancia [ $m$ ].

$F_v$ : Fuerza del viento [ $N$ ].

$P_v$ : Potencia del viento [ $W$ ].

$w$ : Carga uniforme [ $N/m$ ].

Reemplazando valores en las ecuaciones 4.3 y 4.4, se obtiene:

$$F_v = 0,98 * w \quad (4.5)$$

$$F_v = 74,63 * 1,29$$

$$F_v = 96,27 \text{ N}$$

Despejando  $w$  de la ecuación 4.5, se obtiene:

$$w = \frac{F_v}{0,94} \quad (4.6)$$

Reemplazando valores en la ecuación 4.6, se obtiene:

$$w = \frac{96,27}{0,94}$$

$$w = 102,41 \frac{N}{m}$$

A continuación, se hace el análisis de fuerzas:

Sumatorias de fuerzas en  $x$ .

$$\sum F_x = 0$$

$$R_{ax} + R_{bx} - (0,94 * w) = 0$$

$$R_{ax} + R_{bx} = 96,27 \quad (4.7)$$

Sumatorias de fuerza en y.

$$\sum F_y = 0$$

$$R_{by} = 0$$

Se aplica momento en el soporte A y se obtiene:

$$\sum M_A = 0$$

$$0,94 * w * \left(0,06 + \frac{0,94}{2}\right) - 1,15 * R_{bx} = 0 \quad (4.8)$$

$$1,15R_{bx} = 51,02$$

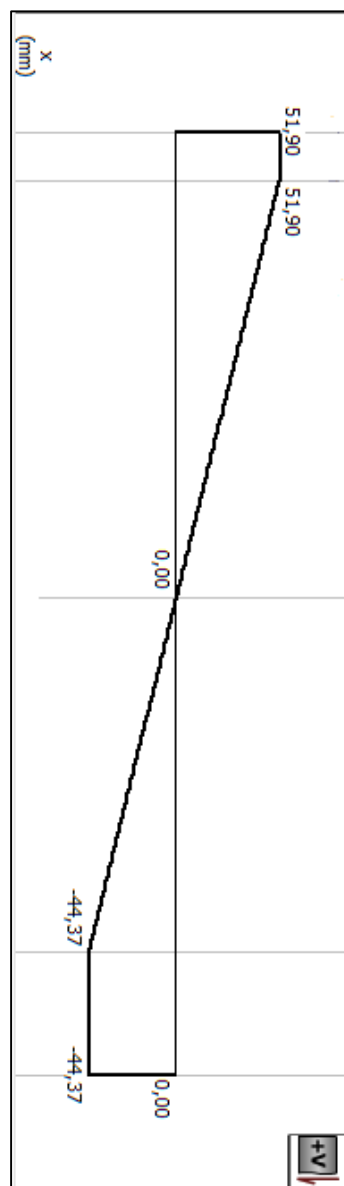
$$R_{bx} = 44,37 \text{ N}$$

Despejando  $R_{bx}$  en la ecuación 4.7, se obtiene:

$$R_{ax} + 44,37 = 96,27$$

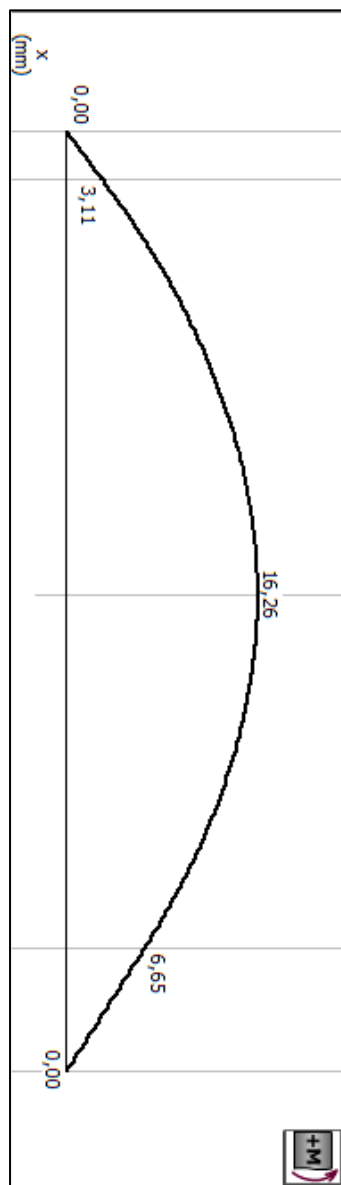
$$R_{ax} = 51,9 \text{ N}$$

Con base en lo obtenido, se desarrolla el diagrama de fuerzas cortantes y momento flector esto por medio del software MDSolids, obteniendo lo siguiente:

**Figura 23. Diagrama de fuerzas cortantes**

**Nota:** Elaboración propia.

Figura 24. Diagrama de momento flector



Nota: Elaboración propia.

De acuerdo a lo anterior, la fuerza cortante máxima es de 51,9 N (11,67 lb) y el momento flector máximo es de 16,26 N\*m (143,91 lb\*in).

Según Mott (p. 548) para el diseño de ejes se utiliza la siguiente ecuación:

$$D = \left( \frac{32 * N}{\pi} * \sqrt{\left( \frac{K * M}{S'_n} \right)^2 + \frac{3}{4} \left( \frac{T}{S_y} \right)^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.9)$$

Donde:

$N$ : Factor de diseño.

$K$ : Factor de chaflán.

$M$ : Momento flector [lb\*in].

$T$ : Par torsional [lb/in].

$S'_n$ : Resistencia a la fatiga modificada [psi].

$S_y$ : Resistencia a la fluencia [psi].

Reemplazando valores en la ecuación 4.9, se obtiene:

$$D = \left( \frac{32 * 2}{\pi} * \sqrt{\left( \frac{1 * 143,91}{14580} \right)^2 + \frac{3}{4} \left( \frac{4,22}{30000} \right)^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$D = 0,59 \text{ in}$$

A partir de lo obtenido, el diámetro mínimo que debe tener el eje es de 0,59 in. Debido a que se requiere una varilla roscada y por la facilidad de encontrarla en el mercado se decide utilizar un eje con diámetro de 0,75 in.

### 5.3 Sistema de transmisión

El sistema de transmisión tiene como función transferir la energía mecánica de un objeto a otro sin alterar su movimiento. Los sistemas de transmisión presentan tres tipos de movimientos:

Movimiento circular o rotatorio que basa su desplazamiento girando en círculos.

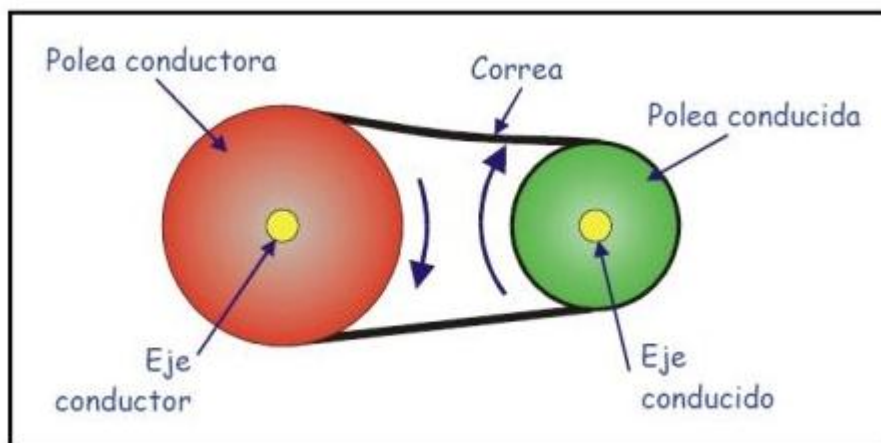
Movimiento lineal que basa su desplazamiento en línea recta y de forma continua.

Movimiento alternativo que basa su desplazamiento en un trayecto de ida y vuelta.

Como sistema de transmisión se pueden utilizar palancas, poleas, poleas con correa, ruedas de fricción y engranajes.

Se escogió un sistema de transmisión de poleas con correa para el aerogenerador, debido a que permite una facilidad de acoplamiento con el eje del aerogenerador y el dinamo, teniendo en cuenta que el diámetro del eje del aerogenerador es mayor con respecto al eje del dinamo. Como se puede observar en la Figura 25, la operación de este sistema se basa en dos poleas que están ubicadas a cierta distancia, las cuales están conectadas por medio de una correa o cadena.

**Figura 25. Sistema de poleas con correa**



**Nota:** Adaptado de *Sistema Polea-Correa*, por Anónimo, sin fecha,

(<https://sites.google.com/site/gabrielmecanismos/Home/parte-iii/transformacion-de-movimiento-giratorio-en-giratorio/1-2---sistema-polea-correa>)

Estas se clasifican por el tamaño de las poleas, y por esto, existen dos tipos: sistema reductor de velocidad y sistema multiplicador de velocidad. Para el aerogenerador se seleccionó un sistema multiplicador de velocidad, ya que se pretende aumentar las RPM que recibe el dinamo por parte del eje para así obtener el voltaje que se desea. Su funcionamiento se basa en que la polea de salida (conducida) realice más giros que la polea de entrada (conductora o motriz). La relación entre las poleas se define de la siguiente forma:

$$i = \frac{n_2}{n_1} = \frac{D_1}{D_2} \quad (4.10)$$

Donde:

$n_1$ : Velocidad de la polea motriz.

$n_2$ : Velocidad de la polea conducida.

$D_1$ : Diámetro de la polea motriz.

$D_2$ : Diámetro de la polea conducida.

$i$ : Relación de transmisión.

Para este sistema de transmisión, se escogió una polea con un diámetro de 3 *cm* para la polea conducida, una polea con un diámetro de 12 *cm* para la polea conductora y una correa en V tipo A. Esta última porque permite trabajar en rangos de velocidades altas y por su resistencia al giro en cambios de velocidades.

A partir de lo anterior, se reemplaza los valores en la ecuación 4.10 y se obtiene:

$$i = \frac{12}{3}$$

$$i = 4$$

Por lo tanto, la relación del sistema de transmisión es de 4.

**Figura 26. Sistema de transmisión del aerogenerador**



**Nota:** Elaboración propia

#### **5.4 Sujeción**

En esta parte, se describe la forma en que está sostenido el eje a la estructura de soporte. Su función es sujetar el eje tanto en la parte superior como inferior de la estructura de soporte (fijar el eje) pero que a la vez permita que el eje siga girando, por esto, se elige usar dos chumaceras que cumplen con las funciones mencionadas y además soportan las cargas que interactúan con estas. Para la parte superior, la chumacera es de rodamiento radial por lo que son adecuados para soportar las cargas perpendiculares al eje (fuerza del viento) y para la parte inferior, la chumacera es de rodamiento axial por lo que son ideales para soportar las cargas en la dirección al eje (peso del eje, rotor y sistema de transmisión). Las chumaceras estarán dentro de una caja ubicada en el punto medio de la estructura de soporte como se observa en la Figura 27.

**Figura 27. Caja de chumacera**



**Nota:** Elaboración propia.

El tipo de chumacera que se selecciona es de brida romboidal correspondiente a la nomenclatura UCFL 204-12. Este cumple con el diámetro del eje, la carga que deben soportar los rodamientos y, sumando a ello, no es tan pesada.

### **5.5 Álabes**

Es la parte donde se genera la sustentación, es decir, es donde se recibe la fuerza que produce el desplazamiento del rotor por consecuencia del fluido de viento que incide con estas. La geometría de los álabes constará de un perfil semicircular el cual se obtendrá a partir de una lámina galvanizada de calibre 18 como se puede observar en la Figura 28.

**Figura 28. Álabes del rotor**



**Nota:** Elaboración propia.

### **5.6 Estructura del aerogenerador**

Es la que se encarga de soportar las cargas generadas por todos los elementos que componen el rotor, eje, chumaceras y sistema de transmisión. La geometría que se propone para la estructura es en forma de cilindro apoyada a una base en forma de trapecio (como se observa en la Figura 29), esto con el fin de tener una estructura estable y resistente para contrarrestar las cargas

y vibraciones transmitidas por los elementos mencionados. Para la construcción de la estructura se usó lámina galvanizada de calibre 18.

**Figura 29. Estructura del aerogenerador**



**Nota:** Elaboración propia

## **5.7 Sistema de generación eléctrica**

**Figura 30. Sistema de generación eléctrica**



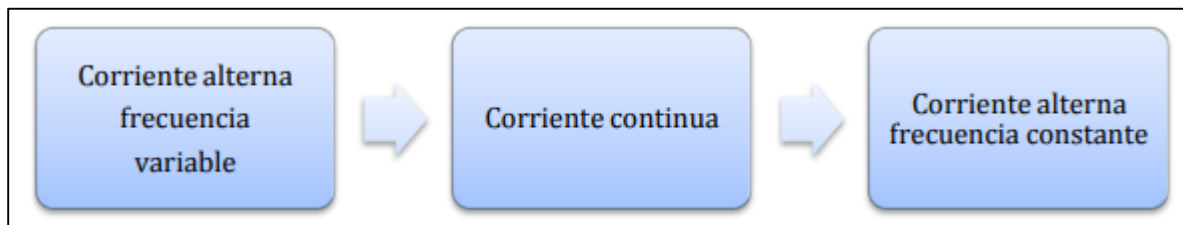
**Nota:** Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 30, el sistema de generación eléctrica del aerogenerador está conformado por: el dínamo, el rectificador de corriente, las baterías y el inversor. Por su parte, el dínamo es un generador eléctrico que transforma el flujo magnético en energía eléctrica. El rectificador de corriente se define como un dispositivo electrónico que permite convertir una señal eléctrica alterna en una continua y además regula la corriente. En cuanto a las baterías, estas son las encargadas de almacenar la energía. Por último, el inversor es aquel que cambia una señal eléctrica continua en una alterna.

Como el dínamo genera corriente alterna variable AC y va conectado a las baterías que están en serie y funcionan a 12 V en corriente continua DC, la corriente debe ser transformada de AC a DC para que pueda ser almacenada en las baterías y además debe ser regulada para que no exceda el voltaje de estas, lo que hace necesario usar un rectificador de corriente. En tanto se desea abastecer una aplicación doméstica que demanda corriente alterna AC, la corriente que proporciona la batería debe ser transformada de DC a AC y ante esto es necesario un inversor que

la cambiaria de 12 V DC a 120 V AC. De acuerdo a lo anterior, el funcionamiento del sistema se basa en tres fases que se representan de la siguiente forma:

**Figura 31. Funcionamiento del sistema de generación eléctrica**



**Nota:** Elaboración propia.

## 6. Análisis de Resultados

Teniendo en cuenta los capítulos anteriores donde se presentó el estudio del recurso eólico en el sitio de instalación, el desarrollo del diseño y la selección de los elementos para la construcción del aerogenerador, se dio paso al ensamble y construcción final del prototipo como se puede observar en la Figura 32. Posterior a lo anterior, se procedió a la evaluación del aerogenerador.

**Figura 32. Aerogenerador construido**



**Nota:** Elaboración propia.

### 6.1 Evaluación experimental del aerogenerador

Inicialmente se había planteado evaluar el prototipo en el sitio donde se realizó el estudio del recurso eólico (Aeropuerto Almirante Padilla Riohacha, La Guajira), pero debido a la

coyuntura del Covid-19 complico la realización de las pruebas en dicho lugar. Por esto, se decidió realizar las pruebas en el patio de una residencia de la ciudad de Riohacha, La Guajira.

Por lo mencionado anteriormente, no se operó el prototipo con viento natural, sino que se sometió el aerogenerador a un flujo de viento constante para que este pudiera ser evaluado. El procedimiento para el desarrollo de las pruebas planteadas consistió en utilizar un ventilador para generar el viento hacia el aerogenerador a una distancia de 50 cm de este en dos pruebas.

En las pruebas se tomaron datos de las revoluciones por minuto (RPM) que el rotor del aerogenerador realizaba, datos tomados con un tacómetro digital; el voltaje generado en el dinamo se midió con un voltiamperímetro digital. El ventilador que se escogió para generar el flujo de viento se seleccionó teniendo en cuenta que el flujo de viento de salida tuviera una velocidad similar a la velocidad de diseño del aerogenerador propuesto, haciendo la medición con un anemómetro digital.

Las pruebas realizadas se hicieron con el rotor en movimiento, es decir, que el ventilador ya estaba incidiendo en este. La diferencia entre ambas pruebas fue la posición del ventilador donde en la primera prueba el ventilador estuvo posicionado en la parte inferior del aerogenerador y la segunda prueba el ventilador estuvo posicionado en la parte superior del aerogenerador. La diferencia que hubo en las pruebas fue la posición de la corriente del viento incidente en el modelo.

En la primera prueba el rotor realizo 55 RPM lo cual ocasiono 220 RPM en el dinamo generando datos de voltaje entre 6 a 8 voltios a una velocidad de viento de 4,26 m/s. En las Figuras 33, 34, 35 y 36 se pueden apreciar la posición del ventilador y los datos registrados.

### **Figura 33. Posición del ventilador primera prueba**



Nota. Elaboración propia.

**Figura 34. Toma de dato de 6V**



Nota. Elaboración propia.

**Figura 35. Toma de dato de 7V**



Nota. Elaboración propia.

**Figura 36. Toma de dato de 8V**



**Nota.** Elaboración propia.

En la segunda prueba el rotor realizó 88 RPM lo cual ocasionó 352 RPM en el dinamo generando datos de voltaje entre 10 a 12 voltios a una velocidad de viento de 4,26 m/s. En las Figuras 37, 38, 39 y 40 se pueden apreciar la posición del ventilador y los datos registrados.

**Figura 37. Posición del ventilador segunda prueba**



Nota. Elaboración propia.

**Figura 38. Toma de dato de 10V**



Nota. Elaboración propia.

**Figura 39. Toma de dato de 11V**



**Nota.** Elaboración propia.

**Figura 40.** Toma de dato de 12V



**Nota.** Elaboración propia.

Revisado los resultados de las pruebas se tienen los siguientes resultados:

En la parte mecánica del modelo propuesto, el prototipo opero de forma eficiente como se esperaba que funcionara, el rotor no tuvo inconvenientes al momento de realizar su movimiento circular, debido a que no presento desbalance en el eje. Por lo tanto, el diseño del eje propuesto cumple con soportar las cargas del sistema lo que indica que hay pocas perdidas mecánicas.

El sistema multiplicador con la relación propuesta de 1:4 funciono de acuerdo a lo esperado, es decir, que con las RPM que se generaron el dinamo pudo generar el voltaje deseado.

Las chumaceras que unen al eje con el soporte del rotor presentaron poca fricción lo que hizo que el eje mantuviera su movimiento de forma correcta.

Estos tres elementos evaluados en el prototipo con relación a la parte mecánica, presentan como resultado final un buen desempeño cumpliendo con el objetivo propuesto.

En la parte eléctrica o caracterización del dinamo se obtuvo lo siguiente: en la primera prueba no se alcanzó el voltaje esperado para la carga del banco de baterías porque la posición del ventilador en la parte inferior del aerogenerador no favoreció, ya que no pudo generar las RPM necesarias para obtener el voltaje deseado.

En la segunda prueba si se alcanzó el voltaje esperado para la carga del banco de baterías porque la ubicación del ventilador en la parte media del prototipo si favoreció, ya que si se generó las RPM necesarias para obtener el voltaje deseado.

## **6.2 Evaluación técnica del aerogenerador**

A continuación, se da paso a la elaboración de una caracterización del prototipo de acuerdo a los resultados obtenidos tanto de las pruebas experimentales como los obtenidos de los cálculos teóricos. Seguido a esto, se realiza una comparación con otro aerogenerador comercial teniendo en cuenta sus características técnicas. Por último, se presenta el presupuesto del proyecto.

**Tabla 2. Ficha técnica aerogenerador**

FICHA TÉCNICA AEROGENERADOR	
Posición del rotor	Vertical
Tipo de rotor	Darrieus de alabes rectos
Altura de rotor	94 cm
Ancho de rotor	138 cm
Peso	21,4 kg
Número de álabes	4
Relación sistema de transmisión	1:4
Potencia nominal	20 W
Voltaje nominal	12 V
Velocidad nominal	4,63 m/s
Velocidad de arranque	> 3 m/s
Tipo de generador	Dinamo

**Nota:** Elaboración propia

### 6.3 Especificaciones ENAIR E200

**Figura 41. Ficha técnica ENAIR E200**

GENERADOR	Potencia	20kW - Max.
	Configuración	3 fases - 500V - transmisión directa
AEROGENERADOR	Configuración	3 palas, eje horizontal sotavento
	Potencia nominal	18kW - IEC 61400
	Aplicaciones	Conexión a red - Micro red
	Velocidad rotación	120rpm
	Inicio de rotación	1.85m/s
	Corte producción	30m/s
	Protección	Ip-65/alta protección ambiental
	Peso	1000kg
	Orientación	Orientación aerodinámica
ROTOR	Diámetro	9.8m
	Área de barrido	75.4m <sup>2</sup>
	Longitud de pala	4.5m
	Material de pala	Fibra de vidrio, resina flex con poliuretano
	Tipo de control	Paso variable activo, regul. electrónica y freno
SISTEMA DE SEGURIDAD DE FRENADO	Paso	Paso variable con control activo Por viento y potencia
	Freno	Freno electromecánico de seguridad
	Control electrónico de:	- Velocidad de viento - Temperatura (opc.) - Voltaje - Fallos en la red - Fallo de sensores
CONTROL DE LA TURBINA	Sistema electrónico	Sistema programable para adaptar la turbina Registro de alarmas
	Software	Software personalizado. Pantalla datos (opc.)
INVERSORES	Inversor	Compatible con los inversores solares de tensión constante a 500V

**Nota:** Adaptado de *Ficha técnica E200*, por Enair, sin fecha,

([https://www.enair.es/descargas/Ficha\\_Tecnica/Ficha\\_Tecnica\\_E200\\_es.pdf](https://www.enair.es/descargas/Ficha_Tecnica/Ficha_Tecnica_E200_es.pdf))

Comparando el ENAIR E200 con respecto al modelo construido se evidencia que hay una gran diferencia en cuanto al tamaño. Esto, se debe a que el ENAIR E200 está diseñado para generar una gran cantidad de energía lo que implica que el diseño de su geometría sea de una escala grande y su rotor debe estar posicionado a una altura considerable para captar más flujo de viento y poder cumplir con la generación de energía mencionada en la Figura 41. Sin embargo, la eficiencia de

ambos no se puede comparar ya que no se tienen los datos sobre ello, pero el modelo construido a pesar de ser de una escala muy pequeña pudo lograr la generación del voltaje deseado para el banco de baterías y a un flujo de viento menor de la velocidad de diseño. Por esto, se concluye que el modelo construido es igual de eficiente al ENAIR E200 ya que ambos cumplen con la especificación de generación correspondiente a su ficha técnica.

Lo que diferencia a estos dos prototipos es la facilidad de desplazamiento e instalación a sitios tanto de acceso fácil como de acceso difícil y esto se debe al peso y tamaño, puesto que mi modelo es más pequeño y menos pesado lo que facilita su desplazamiento e instalación.

### 6.3 Presupuesto.

**Tabla 3. Presupuesto aerogenerador**

ROTOR		
Ítem	Cantidad	Costo
Álabe	4	\$42.000
Eje	1	\$60.000
Chumacera	2	\$50.000
Grapa	4	\$2.800
Cuerpo	-	\$35.000
Soldadura	-	\$8.000
Tornillería	-	\$6.000
Subtotal	-	\$203.800
ESTRUCTURA DE SOPORTE		
Ítem	Cantidad	Costo
Cuerpo	-	\$42.000
Base	-	\$56.000
Flanche	2	\$18.000
Columna	1	\$150.000
Grapa	1	\$1.200
Soldadura	-	\$12.000

Tornillería	-	\$8.400
Subtotal	-	\$287.600
<b>SISTEMA DE TRANSMISIÓN</b>		
Ítem	Cantidad	Costo
Polea conducida	1	\$8.500
Polea Motriz	1	\$3.000
Correa	1	\$11.200
Tornillería	-	\$1.800
Subtotal	-	\$24.500
<b>SISTEMA DE GENERACIÓN</b>		
Ítem	Cantidad	Costo
Dinamo	1	\$180.000
Rectificador	1	\$80.000
Batería	2	\$210.000
Inversor	1	\$140.000
Cableado	-	\$45.000
Subtotal	-	\$655.000
<b>OTROS</b>		
Ítem	Cantidad	Costo
Transporte	-	\$50.000
Papelería	-	\$10.000
CD	2	\$2.000
Imprevistos	-	\$100.000
Subtotal	-	\$162.000
<b>TOTAL AEROGENERADOR</b>		<b>\$1.332.900</b>

**Nota:** Elaboración propia.

## Conclusiones

La construcción del aerogenerador obedeció al modelo tipo Darrieus de alabes rectos con cuatro alabes en su rotor. También, basando su construcción en materiales livianos, adecuados para la geometría del modelo y facilidad en su obtención. De esta forma, el prototipo tiene un diámetro de 1,38 *m* y una altura de 0,94 *m* en su rotor y, así, el área barrida por el viento es de 1,29 *m*<sup>2</sup>.

Es claro, que durante la realización del proyecto se presentó la coyuntura del covid-19 lo cual generó inconvenientes en el desarrollo del proyecto. Sin embargo, los objetivos propuestos para dicho proyecto fueron realizados y cumplidos en su totalidad.

Teniendo en cuenta la investigación realizada y las pruebas experimentales, se deduce que a medida que se posiciona el rotor a una mayor altura, las corrientes de viento van a ser más fuerte sobre este, por lo tanto, el rendimiento del aerogenerador aumentará.

El rotor al momento de operar no presentó ni desbalanceo ni desalineamiento, lo que indica un buen acople entre el eje y las chumaceras, por lo tanto, el sistema presenta pocas pérdidas mecánicas.

La implementación de un sistema multiplicador fue de mucha ayuda ya que el rotor en la segunda prueba realizada obtuvo 88 rpm. Por consiguiente, en el dinamo se realizó 352 rpm alcanzando a generar los 12 voltios necesarios para la carga del banco de baterías.

El desempeño del aerogenerador fue eficiente, ya que cumplió con la generación del voltaje deseado para la carga del banco de baterías a pesar de que este operó a una velocidad de viento por debajo de la velocidad de diseño.

A partir de las pruebas realizadas, se demostró un buen funcionamiento tanto en la parte mecánica como en la eléctrica por parte del aerogenerador.

Teniendo en cuenta el desempeño del prototipo, se concluye que es adecuado el desarrollo de aerogeneradores de eje vertical en la región ya que se demostró que son eficientes y de fácil instalación.

Se demostró que es importante colocar un alabe más en el modelo Darrieus de alabes rectos por los resultados obtenidos en las pruebas experimentales con el aerogenerador.

### Recomendaciones

Se recomienda la construcción de una torre de altura mayor o igual a 10 *m* para que este aproveche altas corrientes de vientos y, así, poder obtener una mejor sustentación y un mejor rendimiento.

El arranque del aerogenerador se hace más eficiente si se mantiene una altura del rotor superior o igual a 10 *m*.

Se sugiere agregar un alabe o más en el rotor del modelo Darrieus de alabes recto ya que se obtuvieron los resultados esperados.

Para la construcción de los alabes del rotor se recomienda utilizar lámina galvanizada de calibre 18 ya que resultó ser un material liviano y fácil de conseguir en el mercado.

Es fundamental tener en cuenta en el diseño del aerogenerador un sistema multiplicador que ayude a aumentar las rpm en el dinamo o alternador para obtener una mejor generación de energía.

Durante el desarrollo de las pruebas, es recomendable tener todos los equipos adecuados para la medición y toma de datos para la velocidad del viento, rpm, voltaje y corriente, ya que esto facilita la ejecución de las pruebas experimentales.

El eje del aerogenerador se debe construir con acero 1020 laminado al caliente, esto garantiza que el rotor no presente problemas de desbalanceo y desalineamiento.

Para la construcción de los alabes se debe utilizar lámina galvanizada calibre 18 o PVC por ser materiales livianos y adecuados para soportar las adversidades ambientales.

Para un buen rendimiento del aerogenerador es preferible instalarlo en un lugar donde el viento no presente mucha fricción, es decir, que no sea tan cercano a edificios o casas las cuales interfieren con la circulación del viento.

Realizar un mantenimiento periódico de 6 meses al aerogenerador donde se tenga en cuenta la limpieza, lubricación o cambio de rodamientos en la chumacera y correa en el sistema de transmisión, inspección del sistema eléctrico y recubrimiento en todo el aerogenerador.

Instalar rectificador de energía continua para regular la energía generada tanto en situaciones de alta y baja intensidad de viento para evitar fallas en la generación o inclusive un corto circuito en el sistema.

### Bibliografías

- CONICET. (18 de octubre de 2004). *Energía*.  
<https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal/enciclopedia/terminos/Energ>.
- CIOH. (2020). *Climatología del Caribe*.  
<https://www.cioh.org.co/meteorologia/Climatologia/ResumenRiohacha4>.
- Canal Clima 24/7. (14 de abril de 2014). *Comportamiento de los vientos en Colombia* [Archivo de video]. Youtube. <http://www.youtube.com/watch?v=28DDPzrnJ6Q>
- Anónimo. (Sin fecha). *Caracterización del viento* [Archivo PDF].  
<https://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5116/fichero/Capítulo+2.pdf>
- CELEC. (2019). *¿Qué es la Energía Eólica?*  
<https://www.celec.gob.ec/gensur/index.php/contacto/direccion/2-uncategorised/47-que-es-laenergia-eolica>
- AEE. (Sin fecha). *¿Qué es una turbina eólica?*  
[https://www.aeelica.org/uploads/BAJACuadrptico\\_ACERCATE\\_AEE\\_2.pdf](https://www.aeelica.org/uploads/BAJACuadrptico_ACERCATE_AEE_2.pdf)
- Energética Futura. (2010). *¿Cuánta energía se puede sacar del viento? Límite de Betz*.  
<http://energeticafutura.com/blog/cuanta-energia-se-puede-sacar-del-viento-limite-de-betz/>
- Ávila Segura, A. (2013). *Diseño de un convertidor estático DC-DC tipo Buck.Boost empleado como regulador del generador eólico AIR-X 400W*[Proyecto de Pregrado, Pontificia Universidad Javeriana]. <https://1library.co/document/1y96v5ry-diseno-convertidor-estatico-boost-empleado-regulador-generator-eolico.html>

ICONTEC. (2008). *Energía Eólica. Guía para Generación de Energía Eléctrica*. Bogotá.

Obtenido de <https://tienda.icontec.org/gp-energia-eolica-guia-para-generacion-de-energia-electrica-gtc172-2008.html>

Asociación Danesa de la Industria Eólica. (Sin fecha). *Valores estándar de la densidad del aire a presión atmosférica*. [http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-](http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/stat/unitsw.htm#anchor138877)

[content/wind/miller/windpower%20web/es/stat/unitsw.htm#anchor138877](http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/stat/unitsw.htm#anchor138877)

Orduz Berdugo, O., & Suarez Perez, J. (2011). *Diseño y construcción de un prototipo turbina eólica de eje vertical para generación a baja potencia*[Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander]. <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2011/137798.pdf>

Torres Morimitsu, D. (2015). *Diseño de un generador eólico de eje vertical de baja potencia*[Tesis de Pregrado, Universidad Tecnológica de Pereira]. <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/5145>

## Anexos

## Anexo 1. Registro de datos de estación meteorológica aeropuerto almirante padilla

Registro de datos					
6 de abril de 2020			7 de abril de 2020		
Hora	[m/s]	Velocidad	Hora	[m/s]	Velocidad
0:00		0,9	0:00		1
0:10		0,8	0:10		1,5
0:20		0,7	0:20		1,4
0:30		0,5	0:30		0,9
0:40		0,7	0:40		1,3
0:50		0,5	0:50		1,1
1:00		0,4	1:00		1,3
1:10		1	1:10		0,8
1:20		0,9	1:20		0,4
1:30		1,3	1:30		0,7
1:40		1,1	1:40		1
1:50		1,2	1:50		0,9
2:00		1,2	2:00		1,6
2:10		0,9	2:10		1,6
2:20		0,9	2:20		1,2
2:30		1,5	2:30		1,6
2:40		1,1	2:40		1,3
2:50		1,1	2:50		1,1
3:00		1,3	3:00		0,9
3:10		1	3:10		1,1
3:20		0,7	3:20		1
3:30		0,3	3:30		1,4
3:40		0,2	3:40		1,2
3:50		0,3	3:50		1
4:00		0,6	4:00		1,5
4:10		0,7	4:10		1,6
4:20		0,9	4:20		1,1
4:30		1,1	4:30		1
4:40		1	4:40		1,8
4:50		1,1	4:50		2,1
5:00		1,3	5:00		2,5
5:10		1	5:10		2,3
5:20		1	5:20		2,7

---

5:30	1,1	5:30	2,3
5:40	1,1	5:40	1,9
5:50	1,5	5:50	1,9
6:00	1,4	6:00	2
6:10	1,3	6:10	1,7
6:20	1,3	6:20	2
6:30	2,2	6:30	2
6:40	2,8	6:40	2,4
6:50	2,7	6:50	2,5
7:00	2,8	7:00	2,1
7:10	2	7:10	2,1
7:20	3,3	7:20	2,5
7:30	3,1	7:30	3,4
7:40	3,5	7:40	3,6
7:50	3,2	7:50	2,8
8:00	3,6	8:00	3
8:10	3,3	8:10	3,1
8:20	3,3	8:20	2,7
8:30	3,8	8:30	2,5
8:40	3,6	8:40	2,5
8:50	5,7	8:50	4
9:00	4,4	9:00	3,3
9:10	4,7	9:10	3,7
9:20	5,3	9:20	4,3
9:30	4,6	9:30	3,7
9:40	4,6	9:40	3
9:50	4,4	9:50	3,5
10:00	4,4	10:00	3,3
10:10	4,3	10:10	3,4
10:20	4,8	10:20	3,4
10:30	4,7	10:30	4
10:40	6,9	10:40	4,8
10:50	5	10:50	3,8
11:00	5,6	11:00	3,4
11:10	5,9	11:10	2,9
11:20	5,3	11:20	3,7
11:30	5,3	11:30	3,7
11:40	5	11:40	3,7
11:50	5,4	11:50	4,2
12:00	5,4	12:00	4,4

---

---

12:10	5,5	12:10	4,5
12:20	5,1	12:20	4,4
12:30	5,8	12:30	4,4
12:40	5,7	12:40	4,5
12:50	5,8	12:50	4,2
13:00	5,4	13:00	4,4
13:10	5,2	13:10	4,5
13:20	4,9	13:20	4
13:30	5,5	13:30	5
13:40	4,6	13:40	5,6
13:50	3,3	13:50	5,6
14:00	4,5	14:00	5,1
14:10	5,4	14:10	5,5
14:20	4,5	14:20	5,6
14:30	5,1	14:30	5,1
14:40	5,1	14:40	5,5
14:50	5	14:50	6,6
15:00	5,9	15:00	5,2
15:10	4,8	15:10	5,1
15:20	5,9	15:20	5,2
15:30	5,5	15:30	5,6
15:40	5,4	15:40	5,5
15:50	6,1	15:50	5,8
16:00	6,6	16:00	6,4
16:10	6,2	16:10	7,2
16:20	5,9	16:20	6,2
16:30	5,3	16:30	5,4
16:40	5,4	16:40	5,8
16:50	5,6	16:50	6
17:00	6,1	17:00	6,9
17:10	6,6	17:10	6,3
17:20	6,2	17:20	5,9
17:30	6	17:30	6,8
17:40	5,2	17:40	6,5
17:50	6,2	17:50	6,9
18:00	5,6	18:00	6,2
18:10	4,2	18:10	6,9
18:20	4,7	18:20	5,8
18:30	4,9	18:30	5,7
18:40	4,5	18:40	6,7

---

---

18:50	4,1	18:50	5,3
19:00	4,8	19:00	5,5
19:10	6	19:10	5
19:20	3,9	19:20	5,1
19:30	3,1	19:30	4,4
19:40	3,6	19:40	3,8
19:50	2,9	19:50	3,5
20:00	3,5	20:00	3,9
20:10	3,4	20:10	3,7
20:20	3,3	20:20	3
20:30	2,4	20:30	2,5
20:40	2,8	20:40	2
20:50	3,4	20:50	2,5
21:00	3,9	21:00	2,3
21:10	4	21:10	2,9
21:20	4,1	21:20	2,8
21:30	4,5	21:30	2,7
21:40	3,2	21:40	2,4
21:50	2,7	21:50	3,4
22:00	3,3	22:00	3,8
22:10	2,7	22:10	2,9
22:20	2,3	22:20	2,9
22:30	2,2	22:30	2,5
22:40	1,6	22:40	1,8
22:50	1,7	22:50	2,1
23:00	1,8	23:00	1,7
23:10	1,2	23:10	2,1
23:20	0,7	23:20	2,1
23:30	0,3	23:30	2,4
23:40	0,4	23:40	1,8
23:50	1	23:50	1,8

---

**Anexo 2. Cálculo de la aplicación del método de la distribución de Weibull a datos del  
6 de abril de 2020.**

<b>Aplicación del método de la distribución de Weibull a datos del 6 de abril de 2020</b>							
N	$X_i$	$\ln(X_i)$	$F(X_i)$	$Y_i$	$(\ln(X_i))^2$	$Y_i^2$	$\ln(X_i) \cdot Y_i$
1	1,1	0,09531018	0,006849315	-4,98017215	0,00908403	24,80211465	-0,474661103
2	1,1	0,09531018	0,020547945	-3,874631298	0,00908403	15,0127677	-0,369291806
3	1,3	0,262364264	0,034246575	-3,356795939	0,068835007	11,26807897	-0,880703297
4	1,3	0,262364264	0,047945205	-3,013230711	0,068835007	9,079559315	-0,790564059
5	1,4	0,336472237	0,061643836	-2,754737867	0,113213566	7,588580716	-0,926892811
6	1,5	0,405465108	0,075342466	-2,546801076	0,164401954	6,48619572	-1,032638974
7	2	0,693147181	0,089041096	-2,372390865	0,480453014	5,628238414	-1,644416039
8	2,2	0,78845736	0,102739726	-2,221841414	0,621665009	4,936579269	-1,751827216
9	2,7	0,993251773	0,116438356	-2,089134629	0,986549085	4,3644835	-2,075036675
10	2,8	1,029619417	0,130136986	-1,970267652	1,060116144	3,881954622	-2,028625832
11	2,8	1,029619417	0,143835616	-1,862442368	1,060116144	3,468691575	-1,917606826
12	3,1	1,131402111	0,157534247	-1,763625373	1,280070738	3,110374455	-1,99536947
13	3,2	1,16315081	0,171232877	-1,672292114	1,352919806	2,796560913	-1,945127926
14	3,3	1,193922468	0,184931507	-1,587269808	1,425450861	2,519425442	-1,895077087
15	3,3	1,193922468	0,198630137	-1,507636632	1,425450861	2,272968215	-1,80000125
16	3,3	1,193922468	0,212328767	-1,432654608	1,425450861	2,052499225	-1,710478526
17	3,3	1,193922468	0,226027397	-1,3617235	1,425450861	1,854290891	-1,625792283
18	3,5	1,252762968	0,239726027	-1,294348305	1,569415055	1,675337534	-1,621511625
19	3,6	1,280933845	0,253424658	-1,230115775	1,640791516	1,51318482	-1,57569693
20	3,6	1,280933845	0,267123288	-1,168677133	1,640791516	1,36580624	-1,496998094
21	3,8	1,335001067	0,280821918	-1,109735104	1,782227848	1,231512001	-1,481497547
22	4,3	1,458615023	0,294520548	-1,053034039	2,127557784	1,108880687	-1,535971268
23	4,4	1,481604541	0,308219178	-0,998352275	2,195152016	0,996707266	-1,479163265
24	4,4	1,481604541	0,321917808	-0,94549616	2,195152016	0,893962988	-1,400851404
25	4,4	1,481604541	0,335616438	-0,894295307	2,195152016	0,799764095	-1,324991987
26	4,5	1,504077397	0,349315068	-0,844598803	2,262248815	0,713347137	-1,270341968
27	4,5	1,504077397	0,363013699	-0,796272133	2,262248815	0,634049311	-1,197654918
28	4,6	1,526056303	0,376712329	-0,749194674	2,328847841	0,561292659	-1,143313254
29	4,6	1,526056303	0,390410959	-0,703257615	2,328847841	0,494571273	-1,073210717
30	4,6	1,526056303	0,404109589	-0,658362247	2,328847841	0,433440848	-1,004697856
31	4,7	1,547562509	0,417808219	-0,614418508	2,394949718	0,377510103	-0,950851047
32	4,7	1,547562509	0,431506849	-0,571343768	2,394949718	0,326433702	-0,884190195
33	4,8	1,568615918	0,445205479	-0,529061785	2,460555898	0,279906372	-0,829894737

Aplicación del método de la distribución de Weibull a datos del 6 de abril de 2020							
34	4,8	1,568615918	0,45890411	-0,487501802	2,460555898	0,237658007	-0,764703087
35	4,9	1,589235205	0,47260274	-0,446597776	2,525668537	0,199449574	-0,709748908
36	5	1,609437912	0,48630137	-0,406287684	2,590290394	0,165069682	-0,653894802
37	5	1,609437912	0,5	-0,366512921	2,590290394	0,134331721	-0,58987979
38	5	1,609437912	0,51369863	-0,327217749	2,590290394	0,107071455	-0,526636651
39	5,1	1,62924054	0,52739726	-0,288348805	2,654424736	0,083145033	-0,469789563
40	5,1	1,62924054	0,54109589	-0,249854634	2,654424736	0,062427338	-0,407073299
41	5,1	1,62924054	0,554794521	-0,211685259	2,654424736	0,044810649	-0,344886206
42	5,2	1,648658626	0,568493151	-0,173791765	2,718075264	0,030203577	-0,286523292
43	5,3	1,667706821	0,582191781	-0,13612589	2,781246039	0,018530258	-0,227018075
44	5,3	1,667706821	0,595890411	-0,098639621	2,781246039	0,009729775	-0,164501968
45	5,3	1,667706821	0,609589041	-0,061284776	2,781246039	0,003755824	-0,102205039
46	5,3	1,667706821	0,623287671	-0,024012571	2,781246039	0,000576604	-0,040045929
47	5,4	1,686398954	0,636986301	0,013226846	2,843941431	0,000174949	0,02230574
48	5,4	1,686398954	0,650684932	0,050484907	2,843941431	0,002548726	0,085137695
49	5,4	1,686398954	0,664383562	0,087815184	2,843941431	0,007711507	0,148091434
50	5,4	1,686398954	0,678082192	0,125274037	2,843941431	0,015693584	0,211262005
51	5,4	1,686398954	0,691780822	0,162921361	2,843941431	0,02654337	0,274750412
52	5,4	1,686398954	0,705479452	0,200821462	2,843941431	0,040329259	0,338665103
53	5,5	1,704748092	0,719178082	0,239044109	2,906166058	0,057142086	0,407509988
54	5,5	1,704748092	0,732876712	0,277665808	2,906166058	0,077098301	0,473350257
55	5,5	1,704748092	0,746575342	0,316771378	2,906166058	0,100344106	0,540015402
56	5,6	1,722766598	0,760273973	0,356455912	2,96792475	0,127060817	0,614090339
57	5,6	1,722766598	0,773972603	0,396827283	2,96792475	0,157471892	0,683640788
58	5,7	1,740466175	0,787671233	0,438009364	3,029222506	0,191852203	0,762340481
59	5,7	1,740466175	0,801369863	0,480146263	3,029222506	0,230540434	0,83567833
60	5,8	1,757857918	0,815068493	0,523407986	3,090064458	0,27395592	0,920076873
61	5,8	1,757857918	0,828767123	0,567998156	3,090064458	0,322621905	0,998460055
62	5,9	1,774952351	0,842465753	0,614164797	3,150455848	0,377198398	1,09011325
63	5,9	1,774952351	0,856164384	0,662215792	3,150455848	0,438529755	1,175401476
64	5,9	1,774952351	0,869863014	0,712541706	3,150455848	0,507715683	1,264727577
65	5,9	1,774952351	0,883561644	0,765650745	3,150455848	0,586221064	1,35899359
66	6	1,791759469	0,897260274	0,822224603	3,210401996	0,676053298	1,473228718
67	6,1	1,808288771	0,910958904	0,883212537	3,26990828	0,780064385	1,597103313
68	6,1	1,808288771	0,924657534	0,950000653	3,26990828	0,902501242	1,717875514
69	6,2	1,824549292	0,938356164	1,024743996	3,328980119	1,050100257	1,869695932
70	6,2	1,824549292	0,952054795	1,111099489	3,328980119	1,234542074	2,027255786

<b>Aplicación del método de la distribución de Weibull a datos del 6 de abril de 2020</b>							
71	6,6	1,887069649	0,965753425	1,216148986	3,56103186	1,479018355	2,294957839
72	6,6	1,887069649	0,979452055	1,357121525	3,56103186	1,841778834	2,56098284
73	6,9	1,931521412	0,993150685	1,60615385	3,730774963	2,57973019	3,102320552
Sumatoria		105,0958467	-	-41,84392415	165,4677235	-	-21,57382331

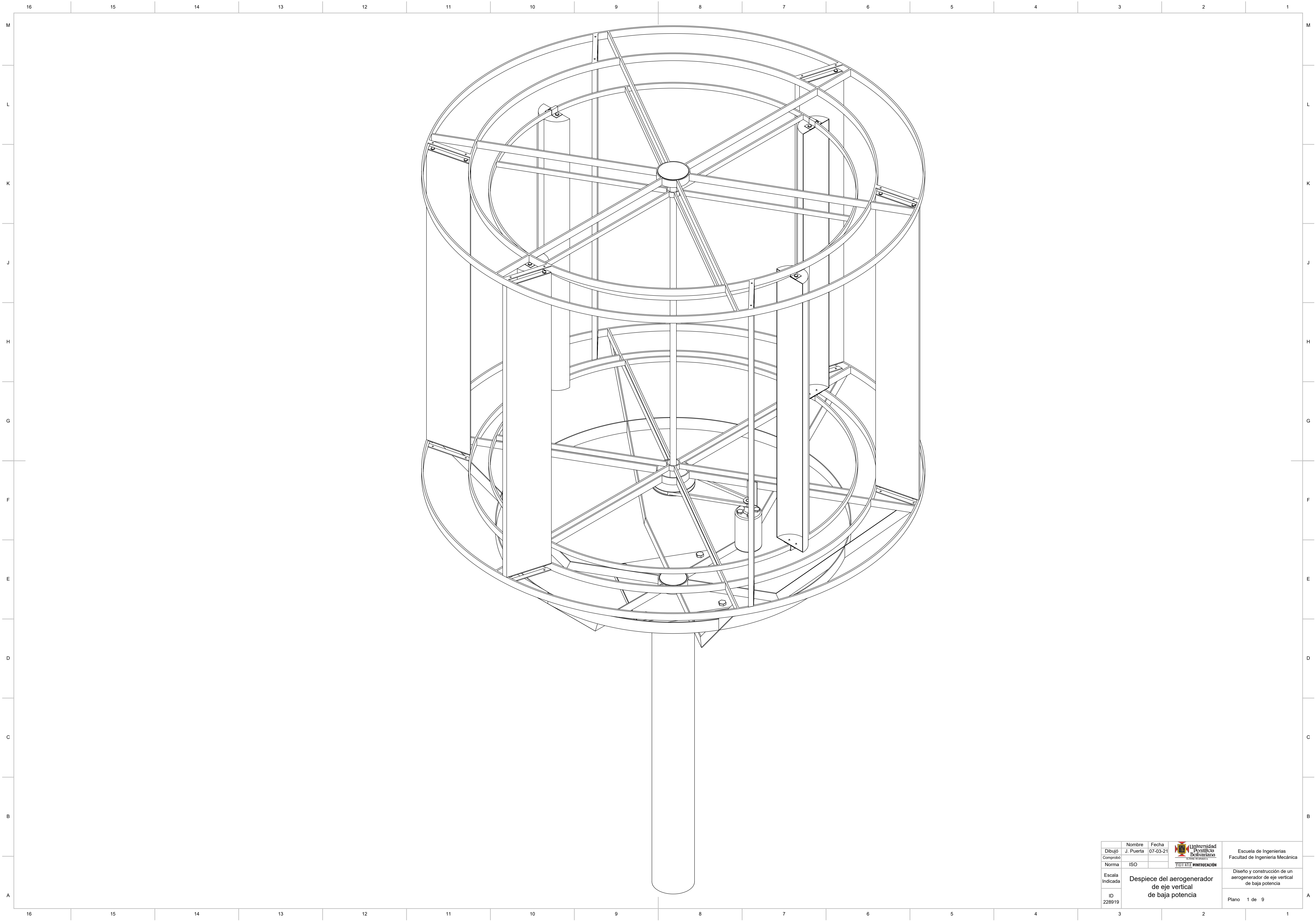
### Anexo 3. Cálculo de la aplicación del método de la distribución de Weibull a datos del

7 de abril de 2020.

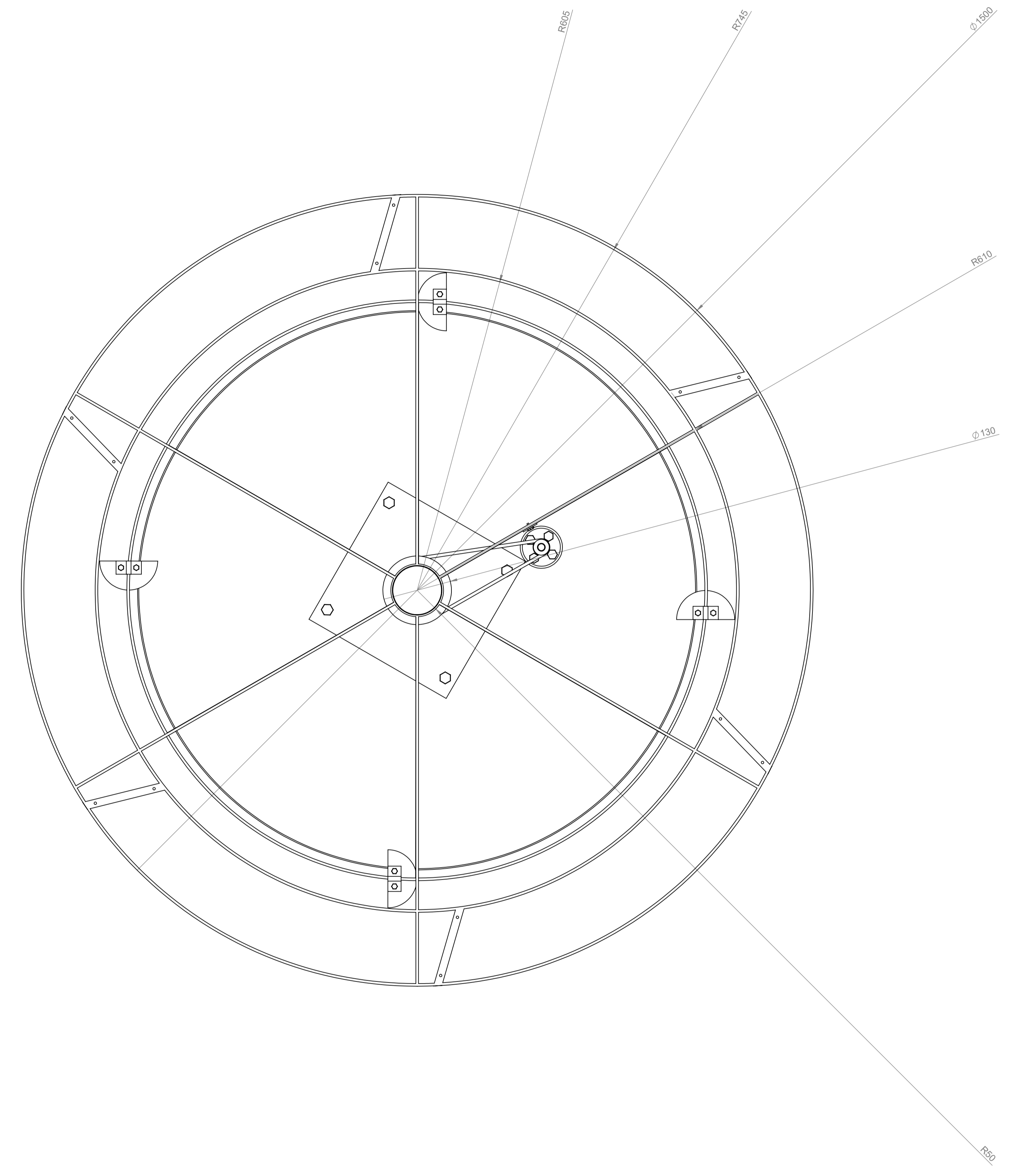
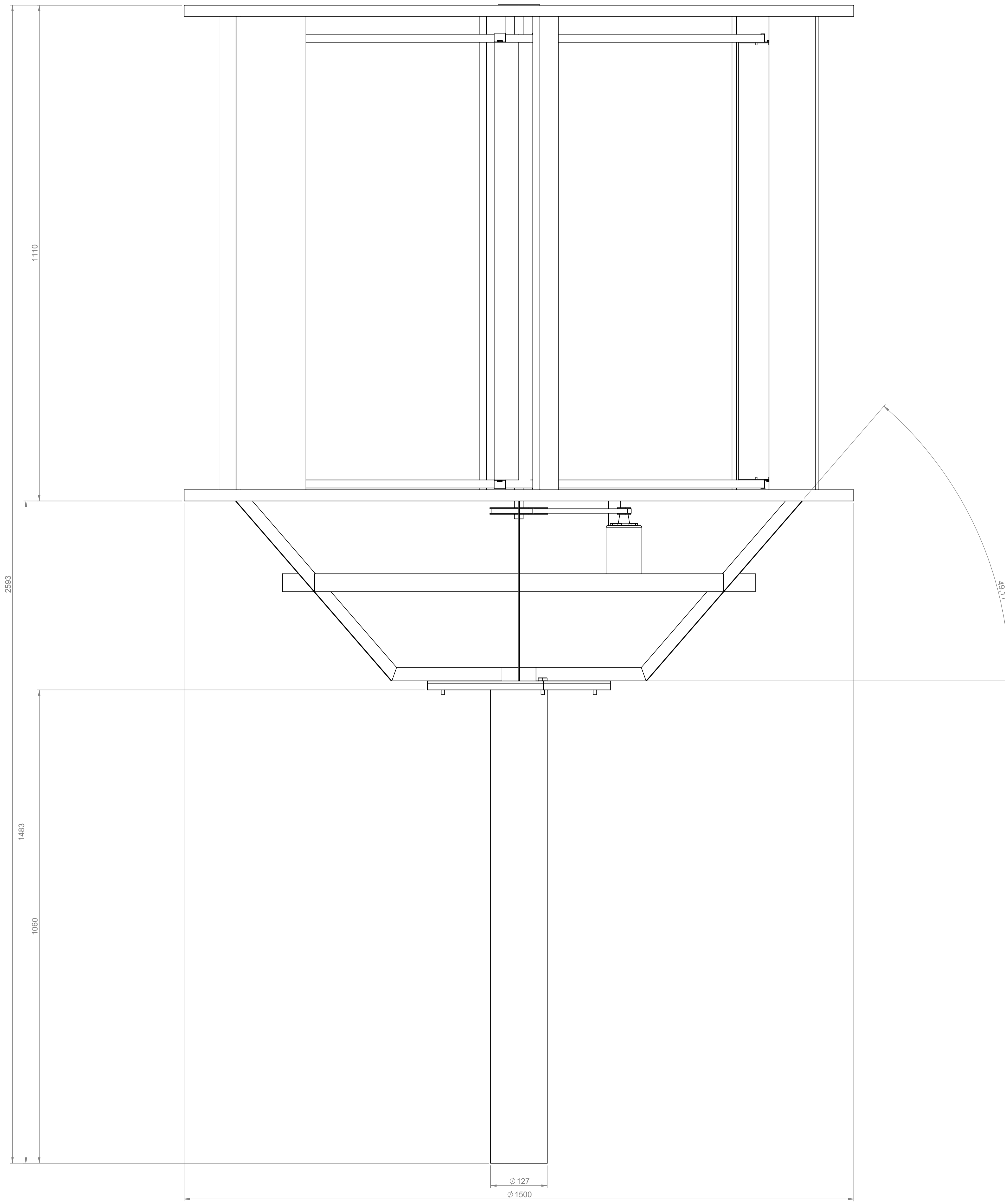
Aplicación del método de la distribución de Weibull a datos del 6 de abril de 2020							
N	$X_i$	$\ln(X_i)$	$F(X_i)$	$Y_i$	$(\ln(X_i))^2$	$Y_i^2$	$\ln(X_i) \cdot Y_i$
1	1,7	0,530628251	0,006849315	-4,98017215	0,281566341	24,80211465	-2,642620038
2	1,9	0,641853886	0,020547945	-3,874631298	0,411976411	15,0127677	-2,486947156
3	1,9	0,641853886	0,034246575	-3,356795939	0,411976411	11,26807897	-2,154572518
4	2	0,693147181	0,047945205	-3,013230711	0,480453014	9,079559315	-2,088612371
5	2	0,693147181	0,061643836	-2,754737867	0,480453014	7,588580716	-1,909438786
6	2	0,693147181	0,075342466	-2,546801076	0,480453014	6,48619572	-1,765307985
7	2,1	0,741937345	0,089041096	-2,372390865	0,550471024	5,628238414	-1,760165379
8	2,1	0,741937345	0,102739726	-2,221841414	0,550471024	4,936579269	-1,648467119
9	2,3	0,832909123	0,116438356	-2,089134629	0,693737607	4,3644835	-1,740059292
10	2,4	0,875468737	0,130136986	-1,970267652	0,76644551	3,881954622	-1,724907734
11	2,5	0,916290732	0,143835616	-1,862442368	0,839588705	3,468691575	-1,706538681
12	2,5	0,916290732	0,157534247	-1,763625373	0,839588705	3,110374455	-1,615993583
13	2,5	0,916290732	0,171232877	-1,672292114	0,839588705	2,796560913	-1,532305765
14	2,5	0,916290732	0,184931507	-1,587269808	0,839588705	2,519425442	-1,454400614
15	2,7	0,993251773	0,198630137	-1,507636632	0,986549085	2,272968215	-1,497462758
16	2,8	1,029619417	0,212328767	-1,432654608	1,060116144	2,052499225	-1,475089002
17	2,9	1,064710737	0,226027397	-1,3617235	1,133608953	1,854290891	-1,449841632
18	3	1,098612289	0,239726027	-1,294348305	1,206948961	1,675337534	-1,421986954
19	3	1,098612289	0,253424658	-1,230115775	1,206948961	1,51318482	-1,351420307
20	3,1	1,131402111	0,267123288	-1,168677133	1,280070738	1,36580624	-1,322243776
21	3,3	1,193922468	0,280821918	-1,109735104	1,425450861	1,231512001	-1,324937674
22	3,3	1,193922468	0,294520548	-1,053034039	1,425450861	1,108880687	-1,257240999
23	3,4	1,223775432	0,308219178	-0,998352275	1,497626307	0,996707266	-1,221758987
24	3,4	1,223775432	0,321917808	-0,94549616	1,497626307	0,893962988	-1,157074971
25	3,4	1,223775432	0,335616438	-0,894295307	1,497626307	0,799764095	-1,094416625
26	3,4	1,223775432	0,349315068	-0,844598803	1,497626307	0,713347137	-1,033599264
27	3,5	1,252762968	0,363013699	-0,796272133	1,569415055	0,634049311	-0,997540242
28	3,6	1,280933845	0,376712329	-0,749194674	1,640791516	0,561292659	-0,959668814
29	3,7	1,30833282	0,390410959	-0,703257615	1,711734767	0,494571273	-0,920095019
30	3,7	1,30833282	0,404109589	-0,658362247	1,711734767	0,433440848	-0,861356934
31	3,7	1,30833282	0,417808219	-0,614418508	1,711734767	0,377510103	-0,803863899
32	3,7	1,30833282	0,431506849	-0,571343768	1,711734767	0,326433702	-0,747507803
33	3,7	1,30833282	0,445205479	-0,529061785	1,711734767	0,279906372	-0,692188896

Aplicación del método de la distribución de Weibull a datos del 6 de abril de 2020							
34	3,8	1,335001067	0,45890411	-0,487501802	1,782227848	0,237658007	-0,650815426
35	4	1,386294361	0,47260274	-0,446597776	1,921812056	0,199449574	-0,619115979
36	4	1,386294361	0,48630137	-0,406287684	1,921812056	0,165069682	-0,563234325
37	4	1,386294361	0,5	-0,366512921	1,921812056	0,134331721	-0,508094795
38	4,2	1,435084525	0,51369863	-0,327217749	2,059467595	0,107071455	-0,469585128
39	4,2	1,435084525	0,52739726	-0,288348805	2,059467595	0,083145033	-0,413804908
40	4,3	1,458615023	0,54109589	-0,249854634	2,127557784	0,062427338	-0,364441723
41	4,4	1,481604541	0,554794521	-0,211685259	2,195152016	0,044810649	-0,313633841
42	4,4	1,481604541	0,568493151	-0,173791765	2,195152016	0,030203577	-0,257490668
43	4,4	1,481604541	0,582191781	-0,13612589	2,195152016	0,018530258	-0,201684736
44	4,4	1,481604541	0,595890411	-0,098639621	2,195152016	0,009729775	-0,14614491
45	4,5	1,504077397	0,609589041	-0,061284776	2,262248815	0,003755824	-0,092177047
46	4,5	1,504077397	0,623287671	-0,024012571	2,262248815	0,000576604	-0,036116766
47	4,5	1,504077397	0,636986301	0,013226846	2,262248815	0,000174949	0,019894201
48	4,8	1,568615918	0,650684932	0,050484907	2,460555898	0,002548726	0,079191429
49	5	1,609437912	0,664383562	0,087815184	2,590290394	0,007711507	0,141333086
50	5,1	1,62924054	0,678082192	0,125274037	2,654424736	0,015693584	0,204101539
51	5,1	1,62924054	0,691780822	0,162921361	2,654424736	0,02654337	0,265438086
52	5,1	1,62924054	0,705479452	0,200821462	2,654424736	0,040329259	0,327186467
53	5,2	1,648658626	0,719178082	0,239044109	2,718075264	0,057142086	0,394102132
54	5,2	1,648658626	0,732876712	0,277665808	2,718075264	0,077098301	0,45777613
55	5,4	1,686398954	0,746575342	0,316771378	2,843941431	0,100344106	0,53420292
56	5,5	1,704748092	0,760273973	0,356455912	2,906166058	0,127060817	0,607667536
57	5,5	1,704748092	0,773972603	0,396827283	2,906166058	0,157471892	0,676490553
58	5,5	1,704748092	0,787671233	0,438009364	2,906166058	0,191852203	0,746695627
59	5,6	1,722766598	0,801369863	0,480146263	2,96792475	0,230540434	0,827179944
60	5,6	1,722766598	0,815068493	0,523407986	2,96792475	0,27395592	0,901709796
61	5,6	1,722766598	0,828767123	0,567998156	2,96792475	0,322621905	0,97852825
62	5,6	1,722766598	0,842465753	0,614164797	2,96792475	0,377198398	1,058062598
63	5,8	1,757857918	0,856164384	0,662215792	3,090064458	0,438529755	1,164081272
64	5,8	1,757857918	0,869863014	0,712541706	3,090064458	0,507715683	1,25254708
65	5,9	1,774952351	0,883561644	0,765650745	3,150455848	0,586221064	1,35899359
66	6	1,791759469	0,897260274	0,822224603	3,210401996	0,676053298	1,473228718
67	6,2	1,824549292	0,910958904	0,883212537	3,328980119	0,780064385	1,611464809
68	6,3	1,840549633	0,924657534	0,950000653	3,387622953	0,902501242	1,748523354
69	6,4	1,85629799	0,938356164	1,024743996	3,445842229	1,050100257	1,90223022
70	6,6	1,887069649	0,952054795	1,111099489	3,56103186	1,234542074	2,096722123

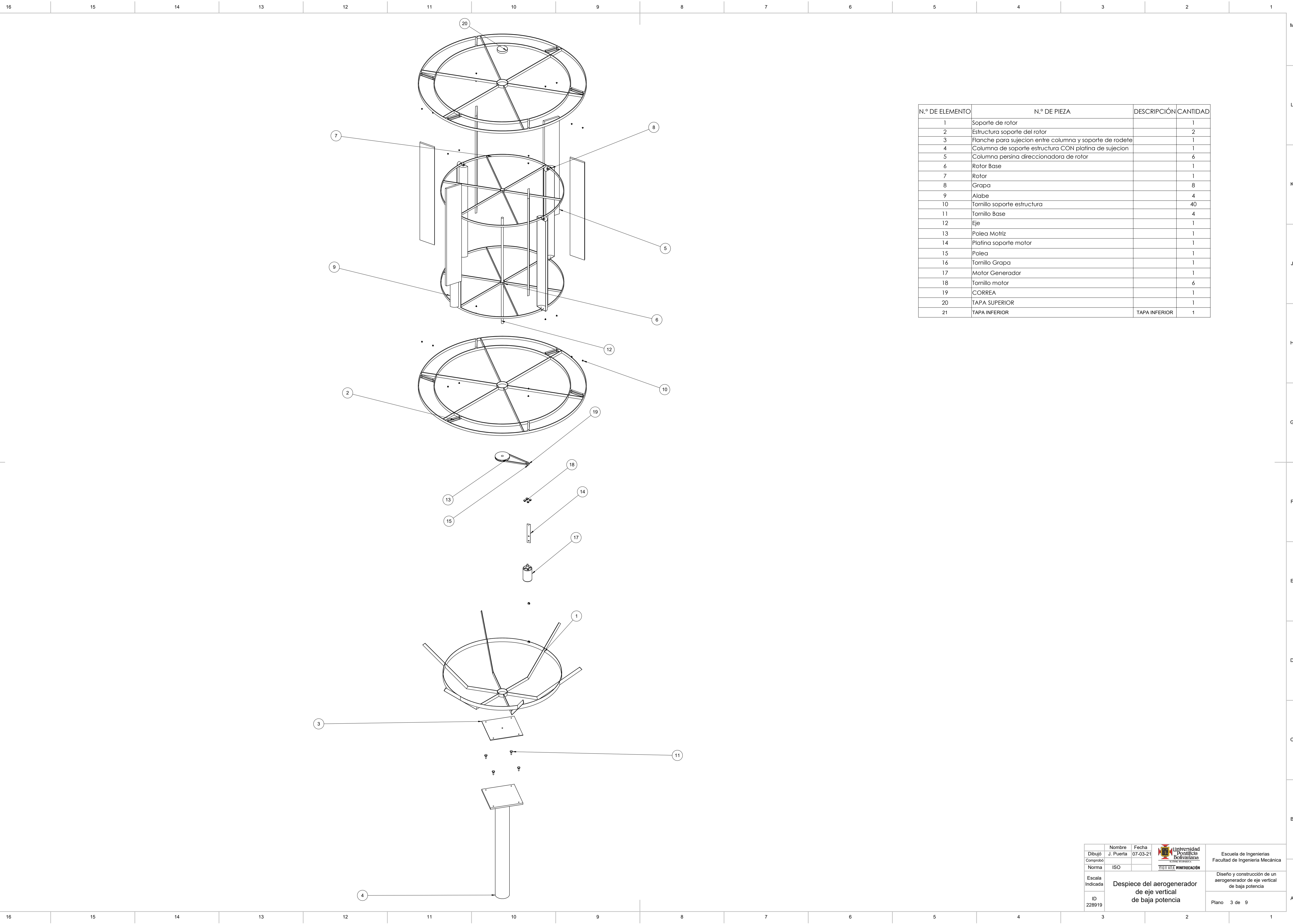
<b>Aplicación del método de la distribución de Weibull a datos del 6 de abril de 2020</b>							
71	6,8	1,916922612	0,965753425	1,216148986	3,674592301	1,479018355	2,33126349
72	6,9	1,931521412	0,979452055	1,357121525	3,730774963	1,841778834	2,621309284
73	7,2	1,974081026	0,993150685	1,60615385	3,896995897	2,57973019	3,17067784
Sumatoria		99,1552494	-	-41,84392415	144,7636366	-	-23,50536975



Nombre	Fecha		Escuela de Ingenierías Facultad de Ingeniería Mecánica
Dibujó Comprobó	J. Puerta 07-03-21		
Norma	ISO	INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA MECÁNICA	Diseño y construcción de un aerogenerador de eje vertical de baja potencia
Escala Indicada	Despiece del aerogenerador de eje vertical de baja potencia		
ID 228919			Piano 1 de 9

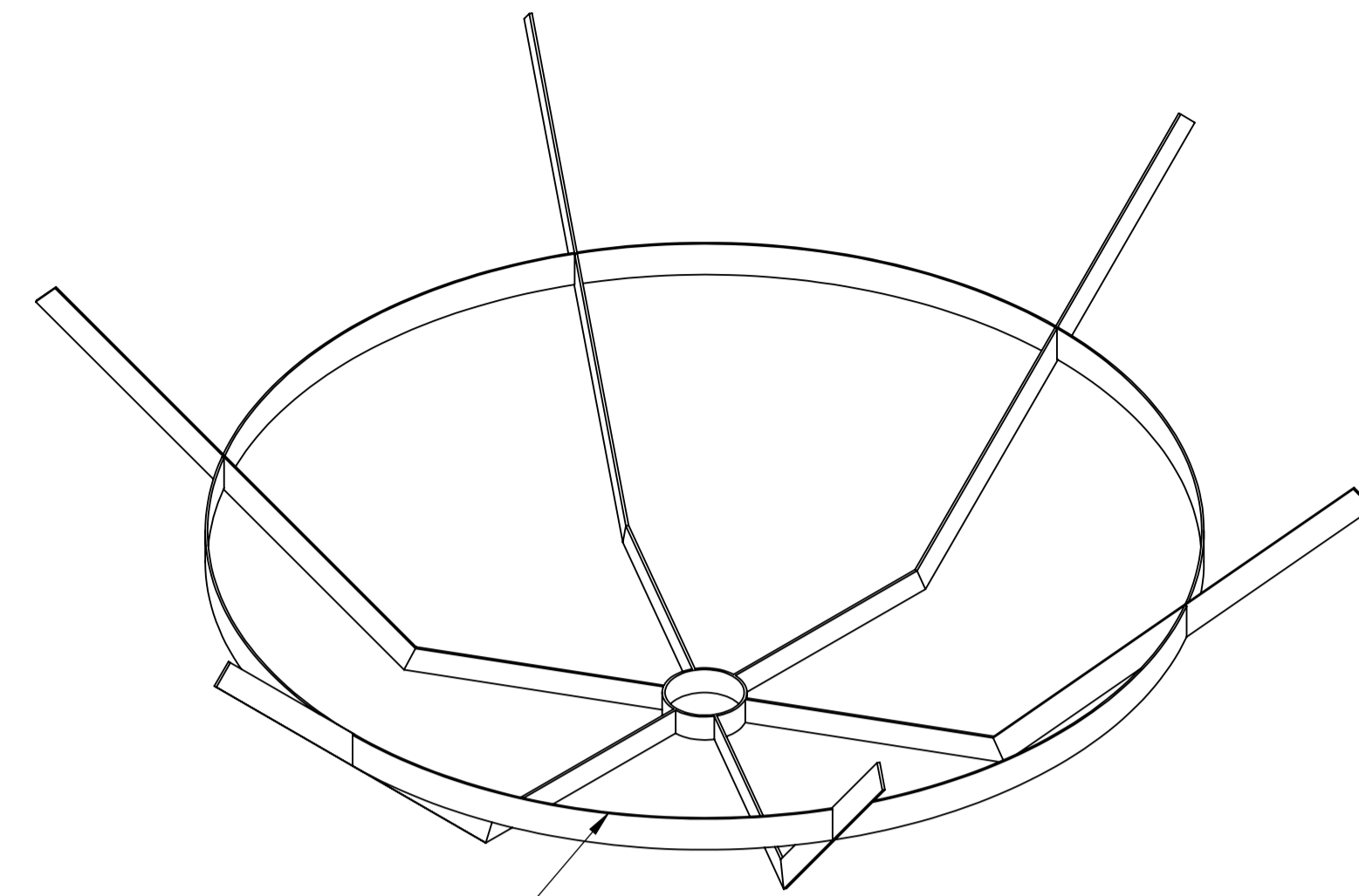
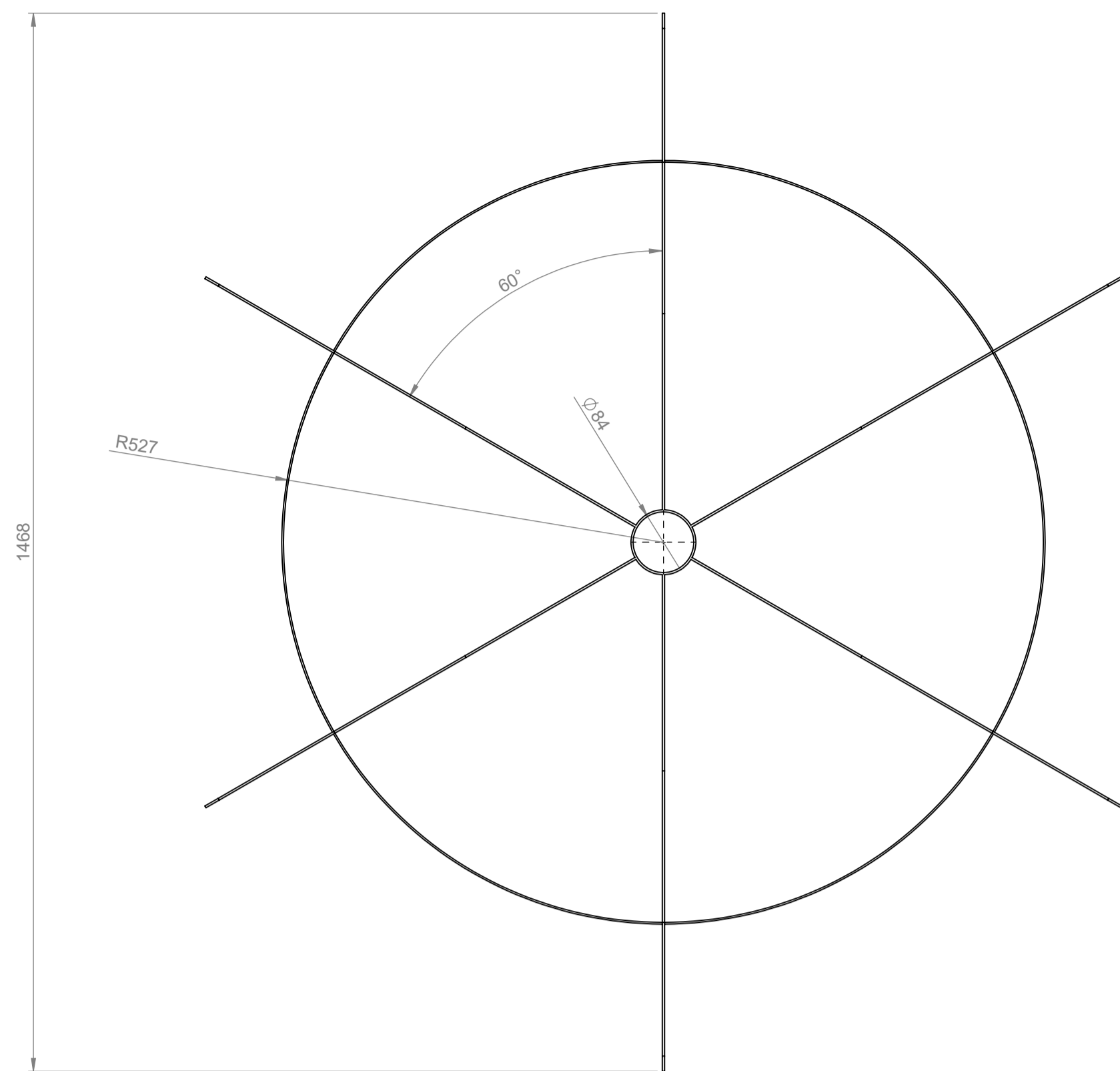


Nombre	J. Puerta	Fecha	07-03-21	 Universidad Politécnica de Valencia <small>Escuela de Ingenierías</small> <small>Facultad de Ingeniería Mecánica</small>
Comprobó				
Norma	ISO			 TITULO A.D.A. INSTRUCCIÓN
Escala Indicada	Despiece del aerogenerador de eje vertical de baja potencia			
ID	228919			Plano 2 de 9

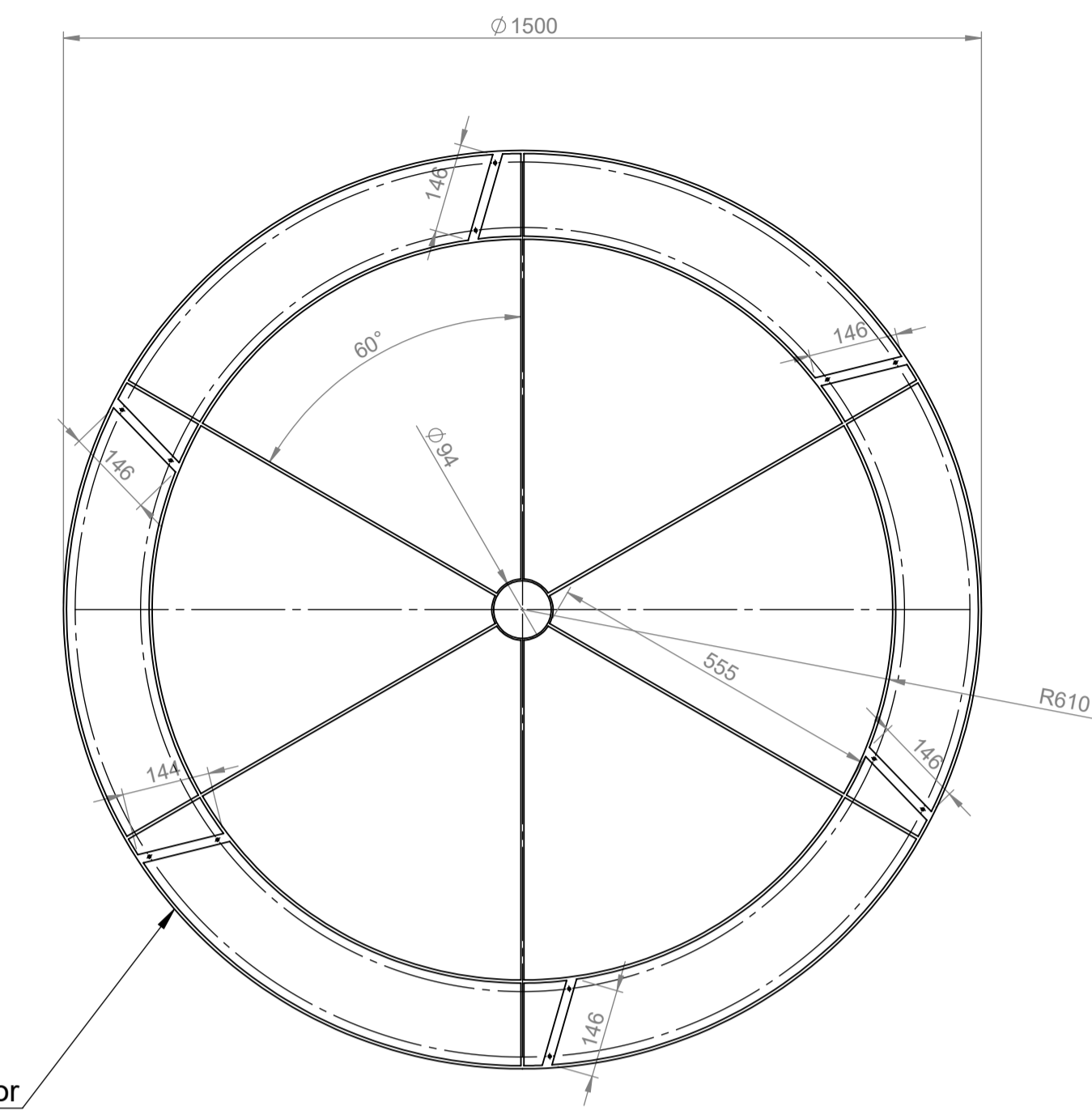


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Soporte de rotor		1
2	Estructura soporte del rotor		2
3	Flanche para sujecion entre columna y soporte de rodete		1
4	Columna de soporte estructura CON platina de sujecion		1
5	Columna persina direccionadora de rotor		6
6	Rotor Base		1
7	Rotor		1
8	Grapa		8
9	Alabe		4
10	Tornillo soporte estructura		40
11	Tornillo Base		4
12	Eje		1
13	Polea Motriz		1
14	Platina soporte motor		1
15	Polea		1
16	Tornillo Grapa		1
17	Motor Generador		1
18	Tornillo motor		6
19	CORREA		1
20	TAPA SUPERIOR		1
21	TAPA INFERIOR	TAPA INFERIOR	1

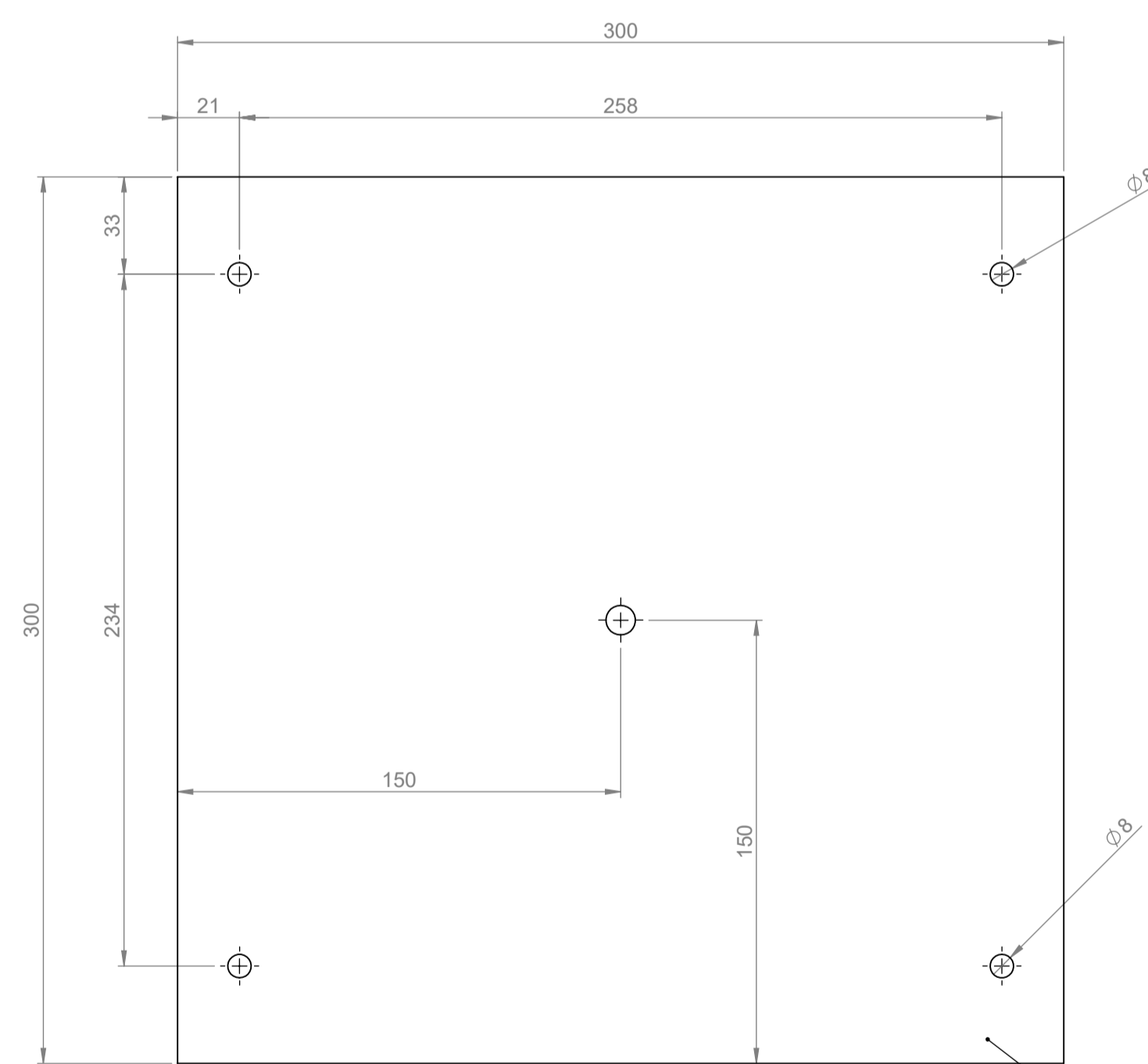
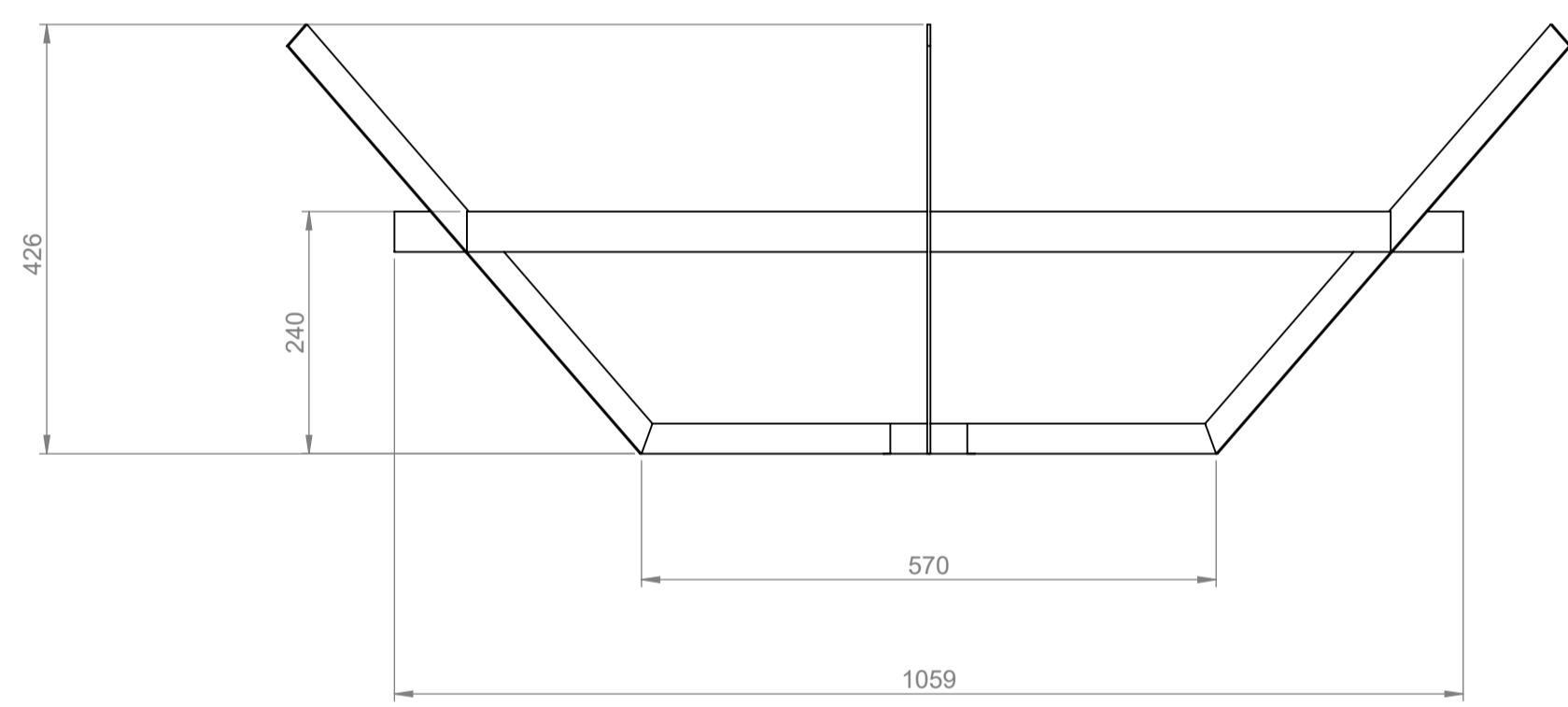
Nombre	J. Puerta	Fecha	07-03-21	 Universidad Politécnica de Valencia TITULO A.D.A. INGENIERÍA	Escuela de Ingenierías Facultad de Ingeniería Mecánica
Dibujó	J. Puerta	Comprobó			
Norma	ISO				Diseño y construcción de un aerogenerador de eje vertical de baja potencia
Escala Indicada	Despiece del aerogenerador de eje vertical de baja potencia				Piano 3 de 9
ID	228919				




Soporte de rotor

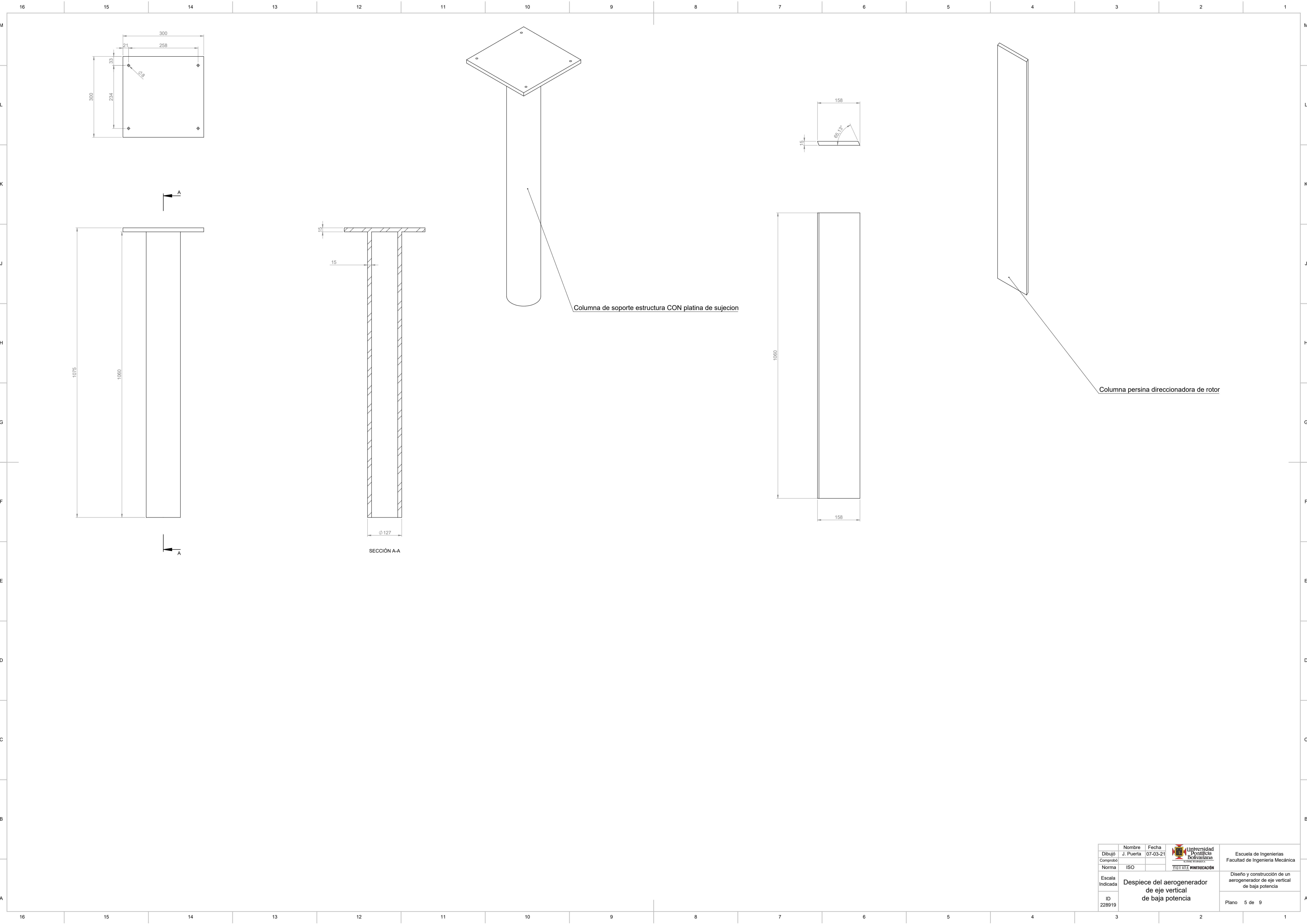


Estructura soporte del rotor

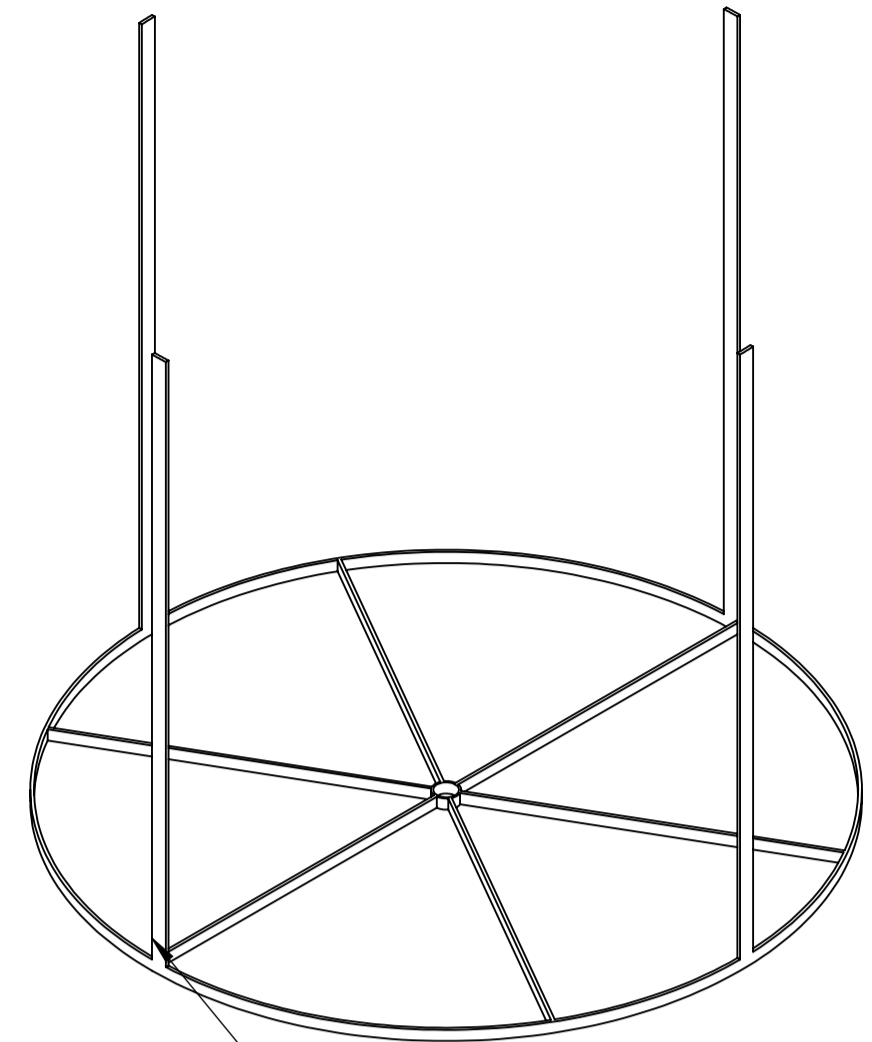
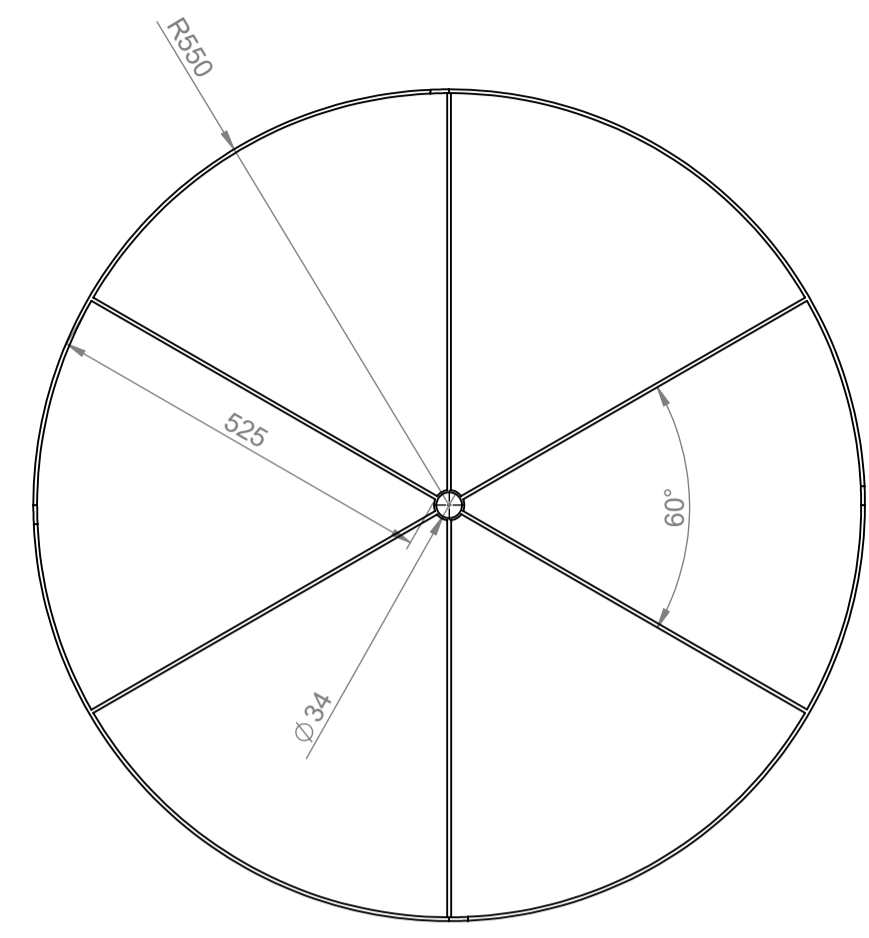


Flanche para sujecion entre columna y soporte de rodete

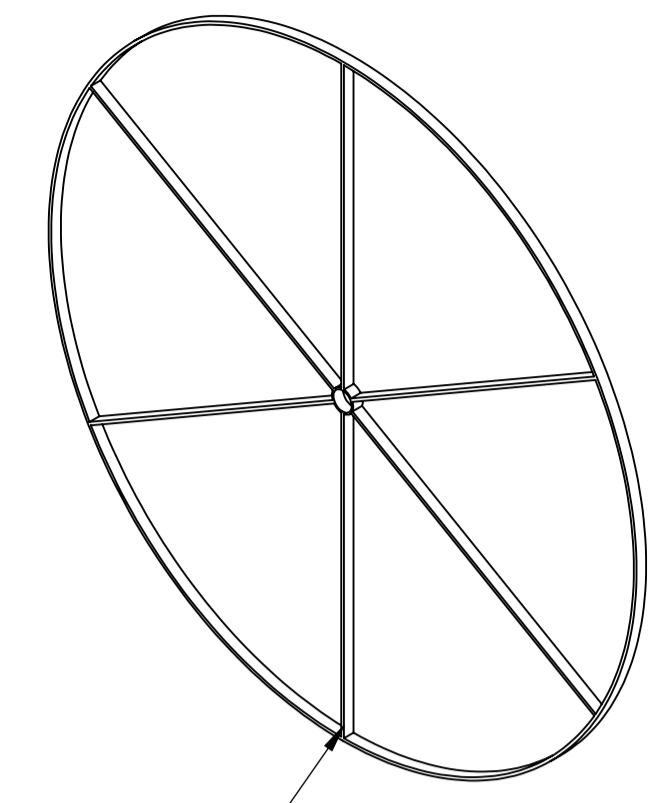
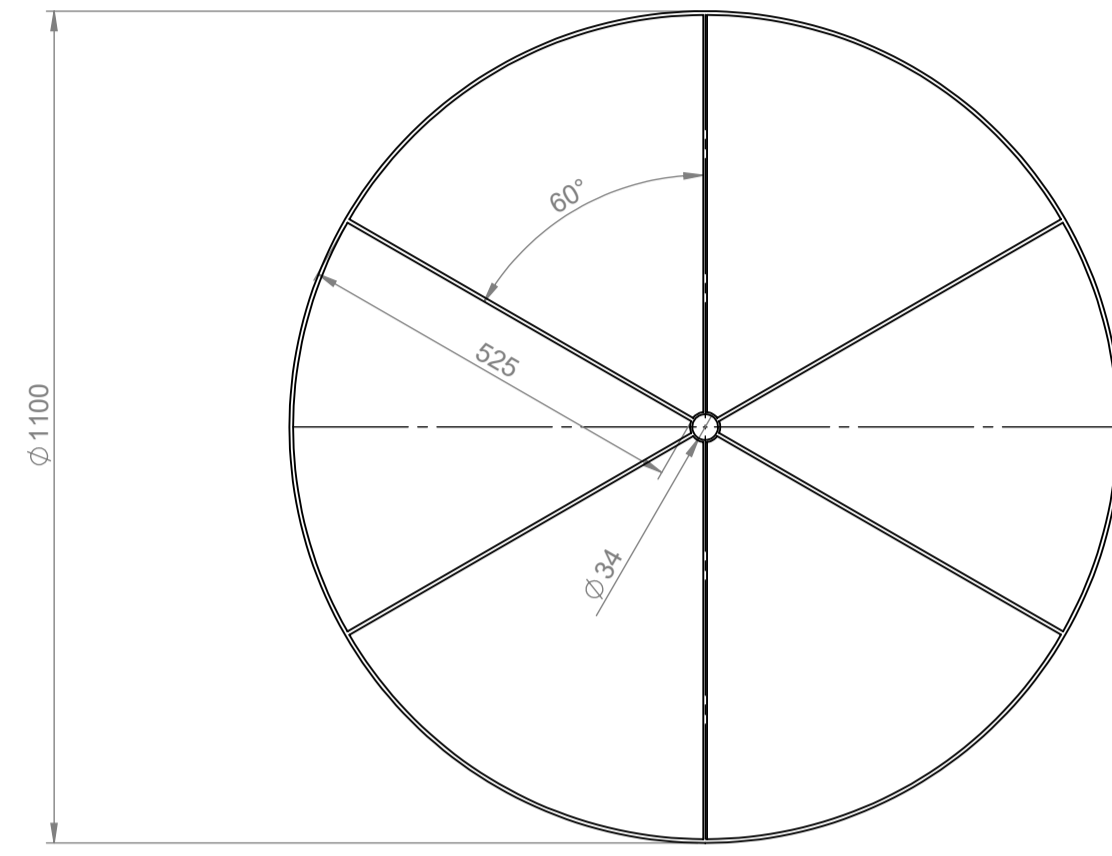
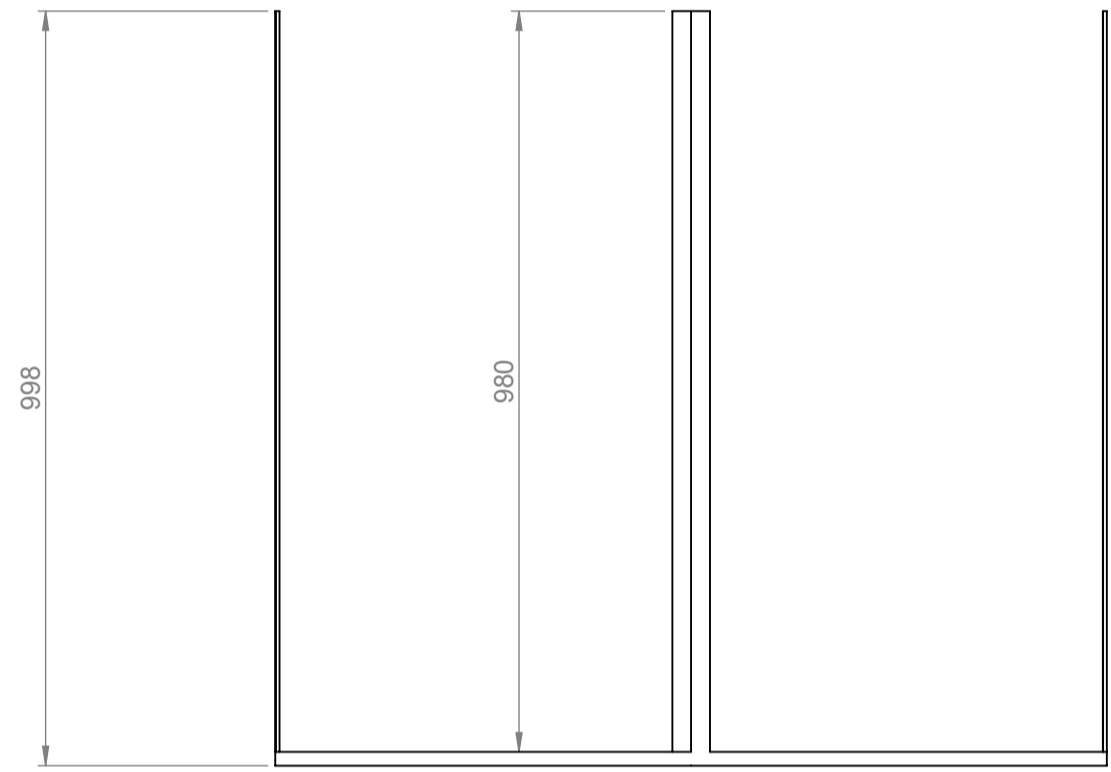
Nombre	Fecha	 <b>Universidad Politécnica de Valencia</b> <small>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA</small>	Escuela de Ingenierías Facultad de Ingeniería Mecánica
Dibujó	Comprobó		
Norma	ISO	TÍTULO IV DE LA INSTRUCCIÓN	Diseño y construcción de un aerogenerador de eje vertical de baja potencia
Escala Indicada	<b>Despiece del aerogenerador de eje vertical de baja potencia</b>		
ID	228919		Plano 4 de 9



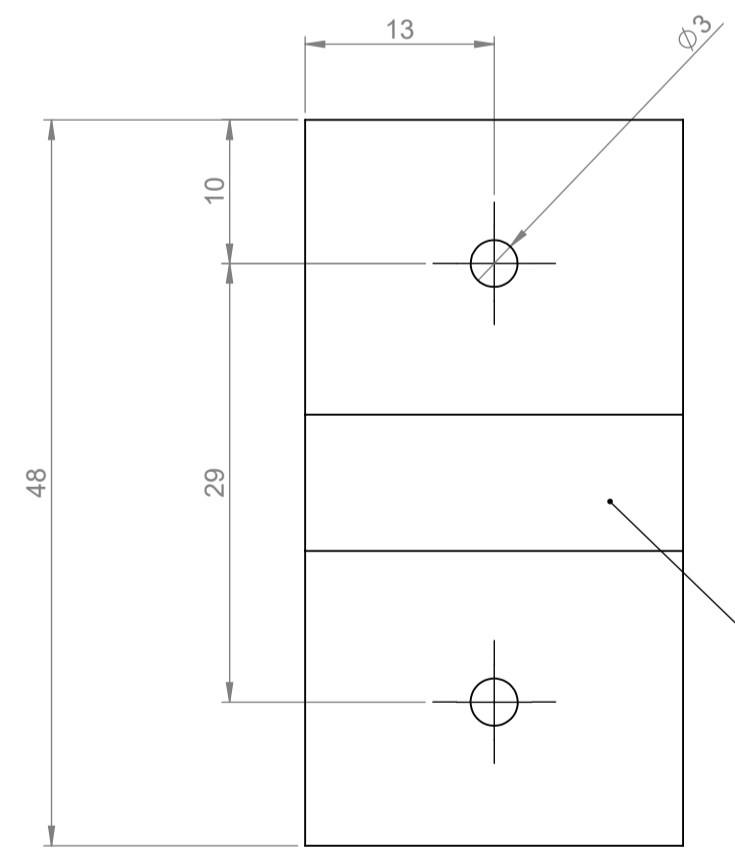
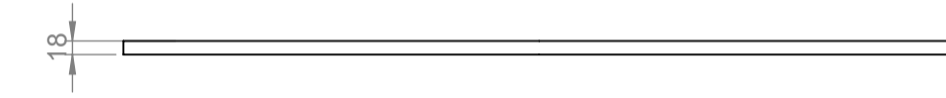
Nombre	J. Puerta	Fecha	07-03-21	 Universidad Politécnica de Valencia <small>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA</small>	Escuela de Ingenierías Facultad de Ingeniería Mecánica
Comprobó					
Norma	ISO			TÍTULO 4.º DE INGENIERÍA	
Escala Indicada	Despiece del aerogenerador de eje vertical de baja potencia			Diseño y construcción de un aerogenerador de eje vertical de baja potencia	
ID	228919			Plano 5 de 9	



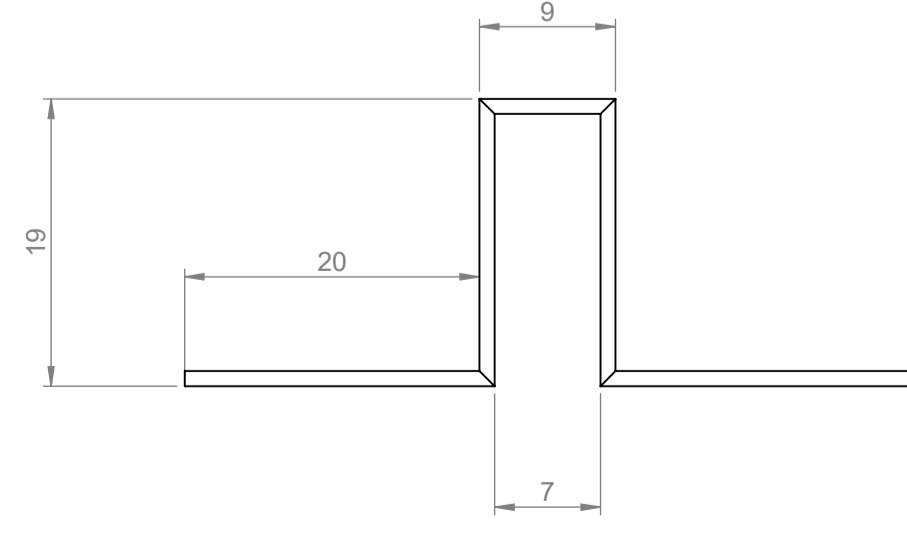
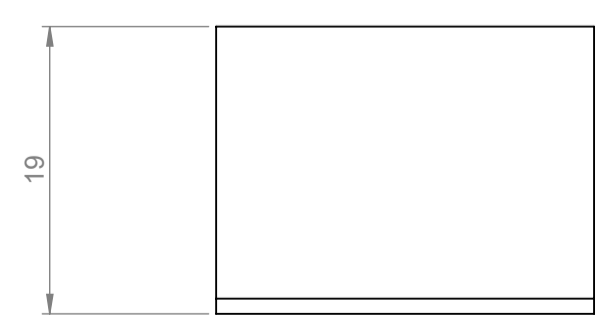
Rotor Base



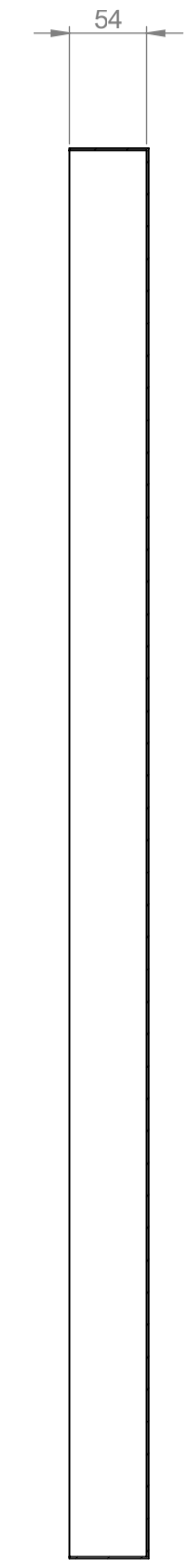
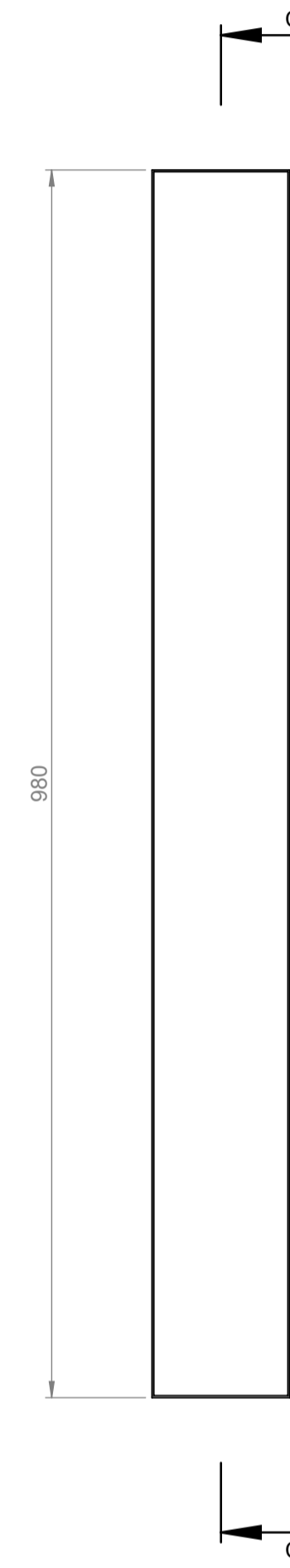
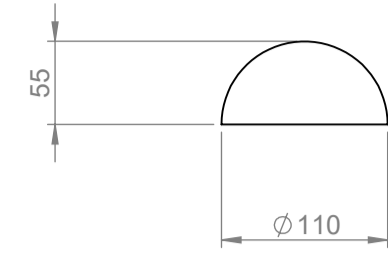
Rotor



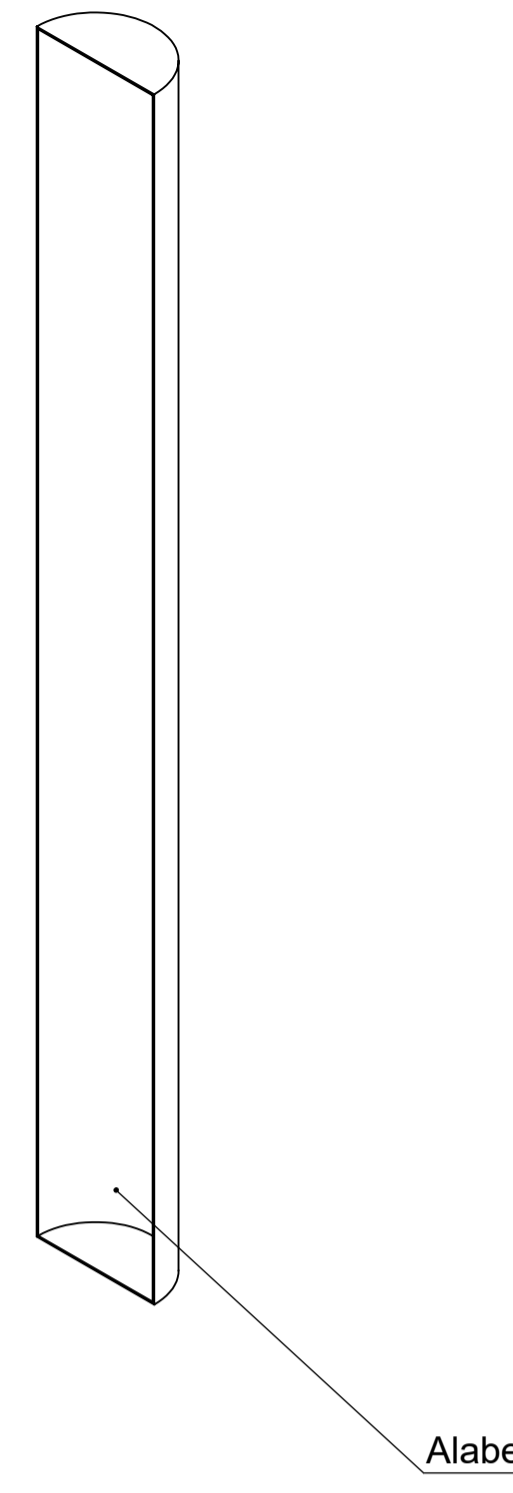
Grapa



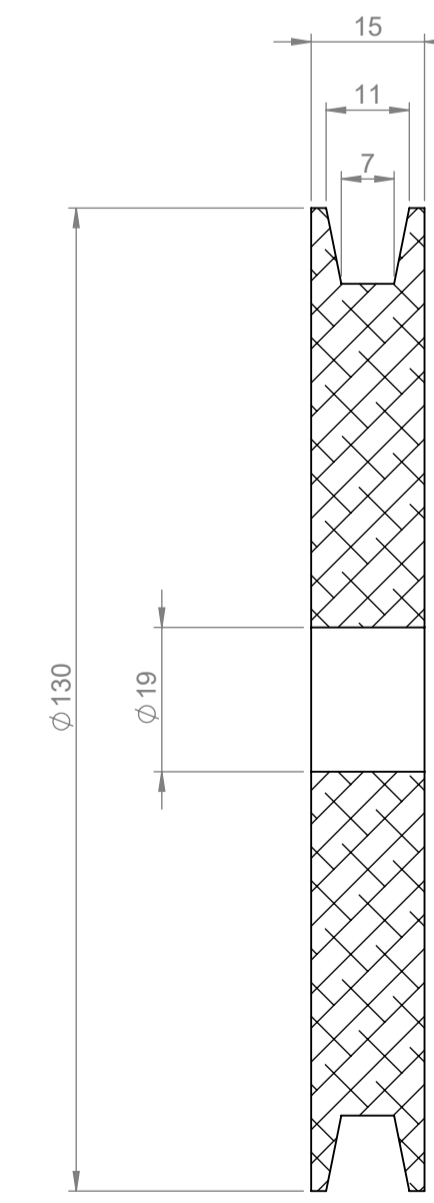
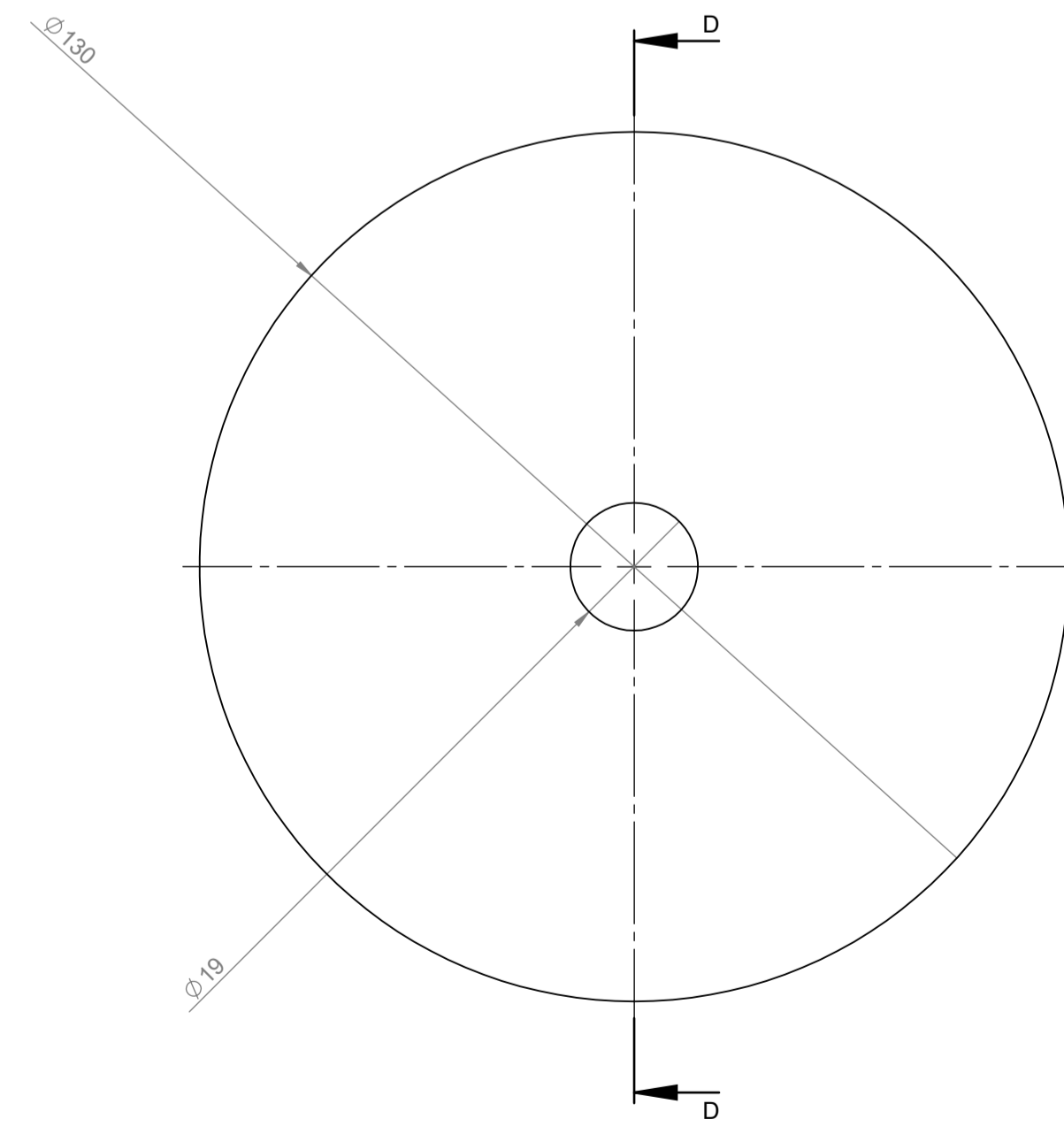
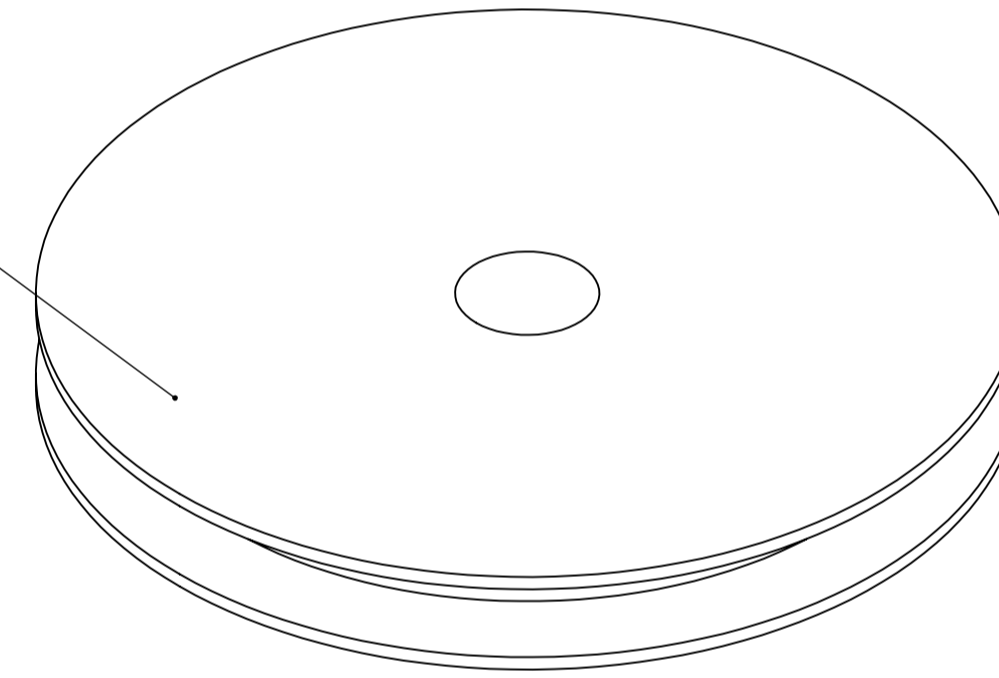
Nombre	J. Puerta	Fecha	07-03-21	Universidad Politécnica de Valencia <small>Escuela de Ingenierías</small>	
Comprobó					Escuela de Ingenierías Facultad de Ingeniería Mecánica
Norma	ISO			TIT II A.D.A. INSTRUCCIÓN	
Escala Indicada	Despiece del aerogenerador de eje vertical de baja potencia				Diseño y construcción de un aerogenerador de eje vertical de baja potencia
ID	228919				Piano 6 de 9



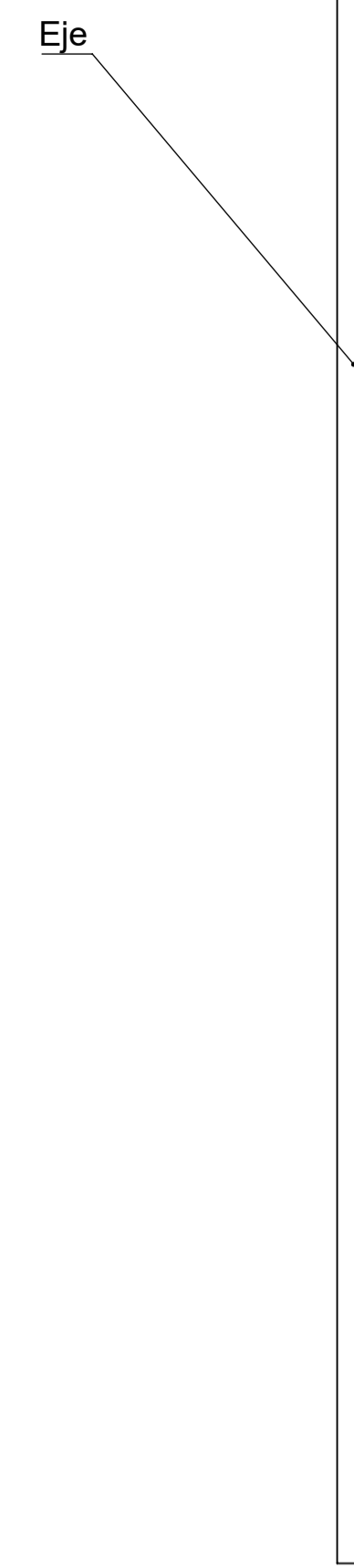
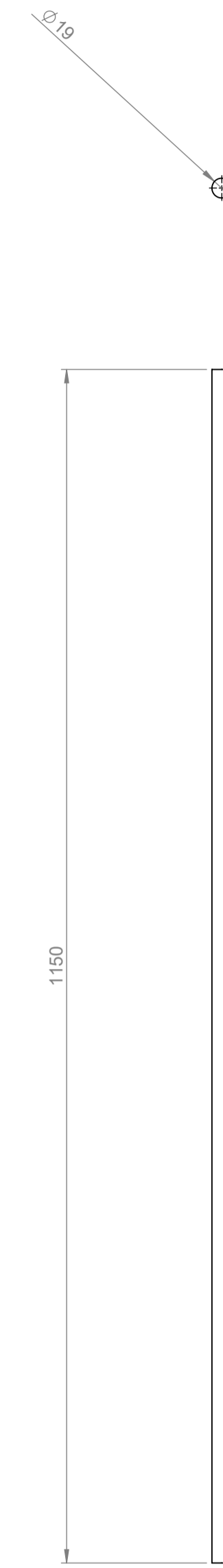
SECCIÓN C-C



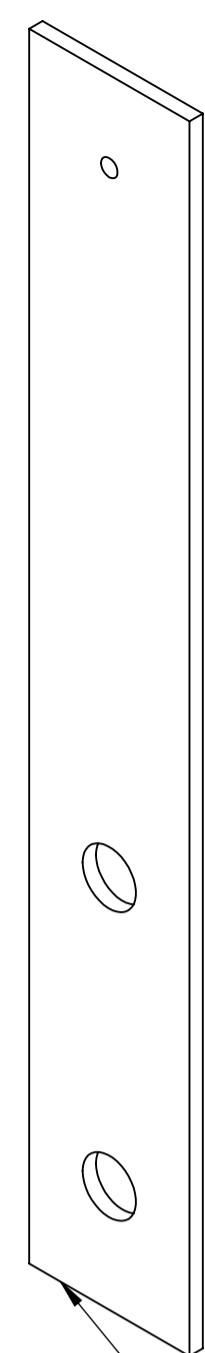
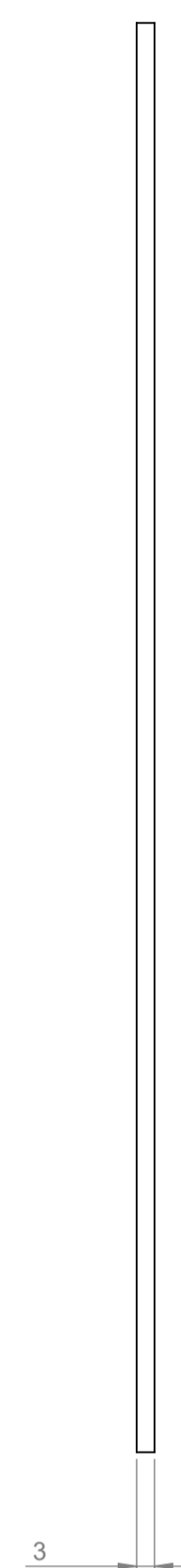
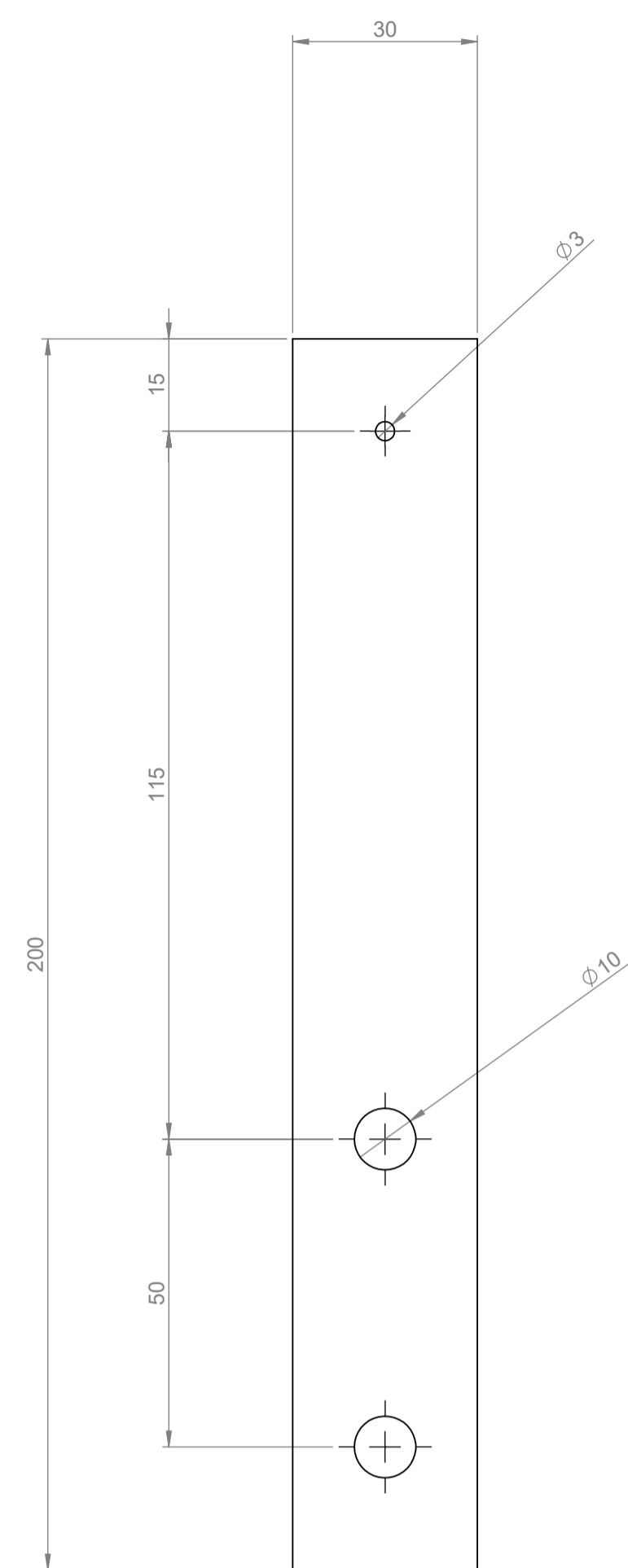
Polea Motriz



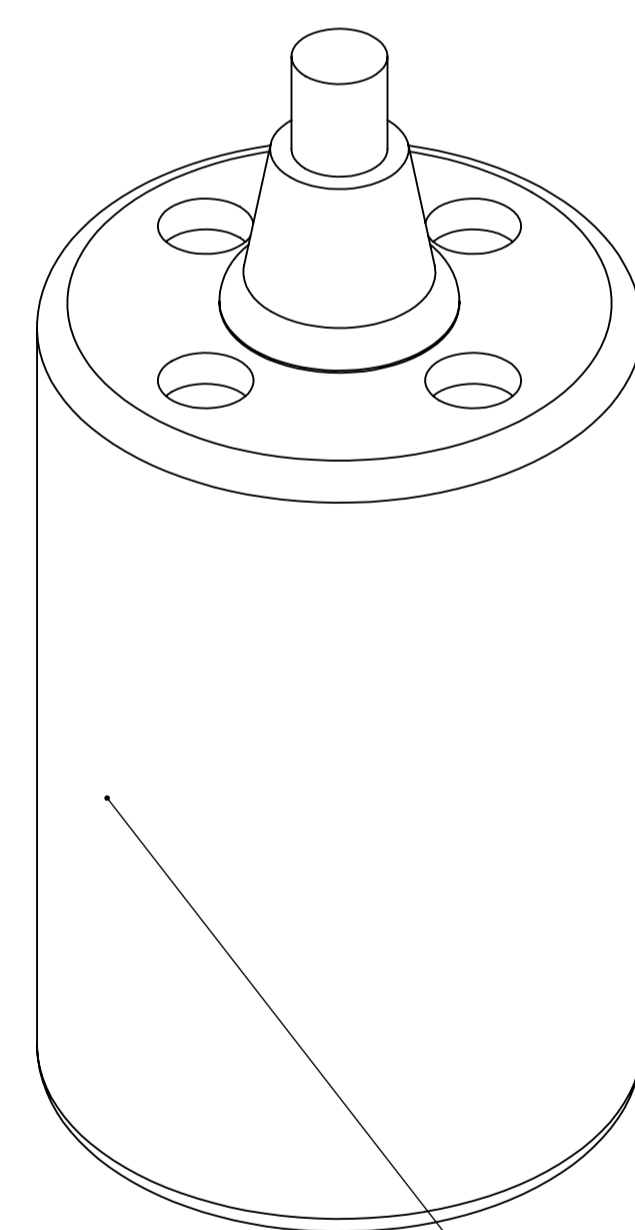
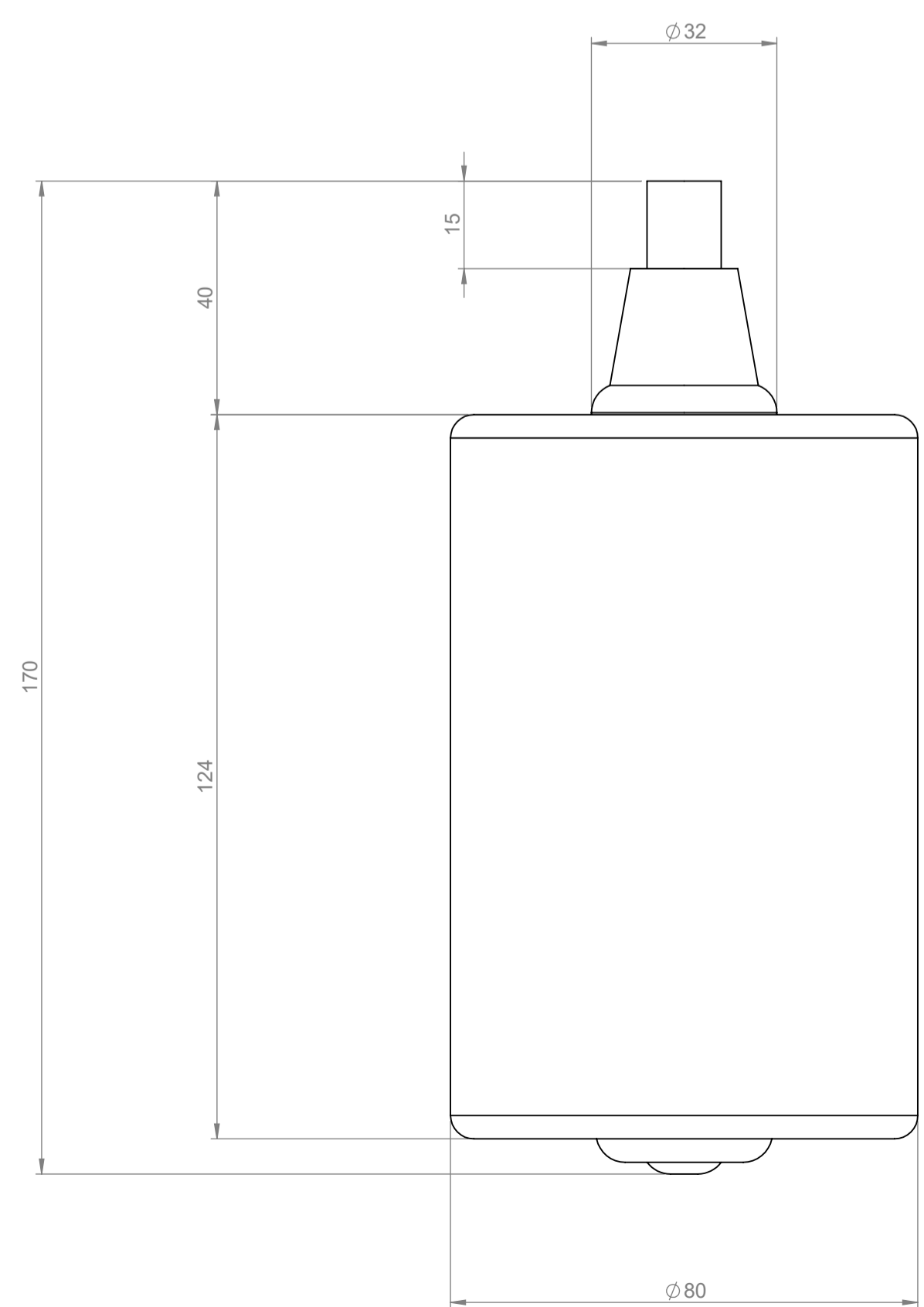
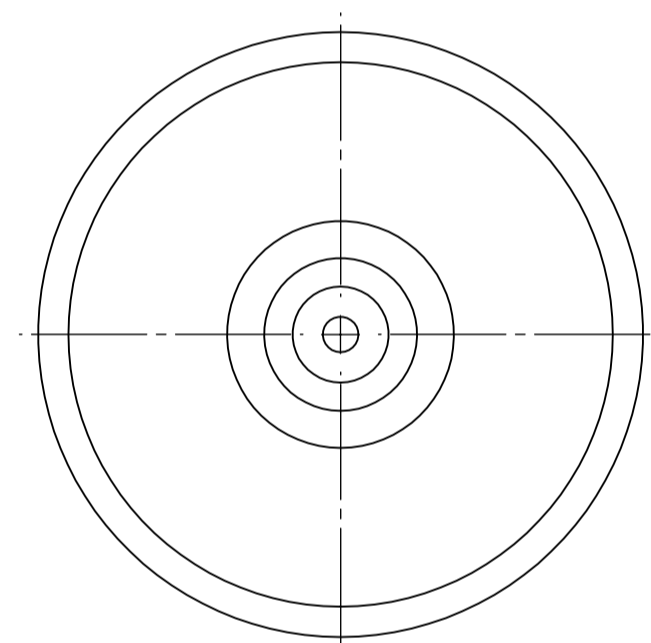
SECCIÓN D-D  
ESCALA 1 : 1



Nombre	J. Puerta	Fecha	07-03-21	Universidad Politécnica de Valencia ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA	Escuela de Ingenierías Facultad de Ingeniería Mecánica
Comprobó					
Norma	ISO			TÍTULO IV. A. INSTRUCCIÓN	Diseño y construcción de un aerogenerador de eje vertical de baja potencia
Escala Indicada	Despiece del aerogenerador de eje vertical de baja potencia				
ID	228919				Piano 7 de 9

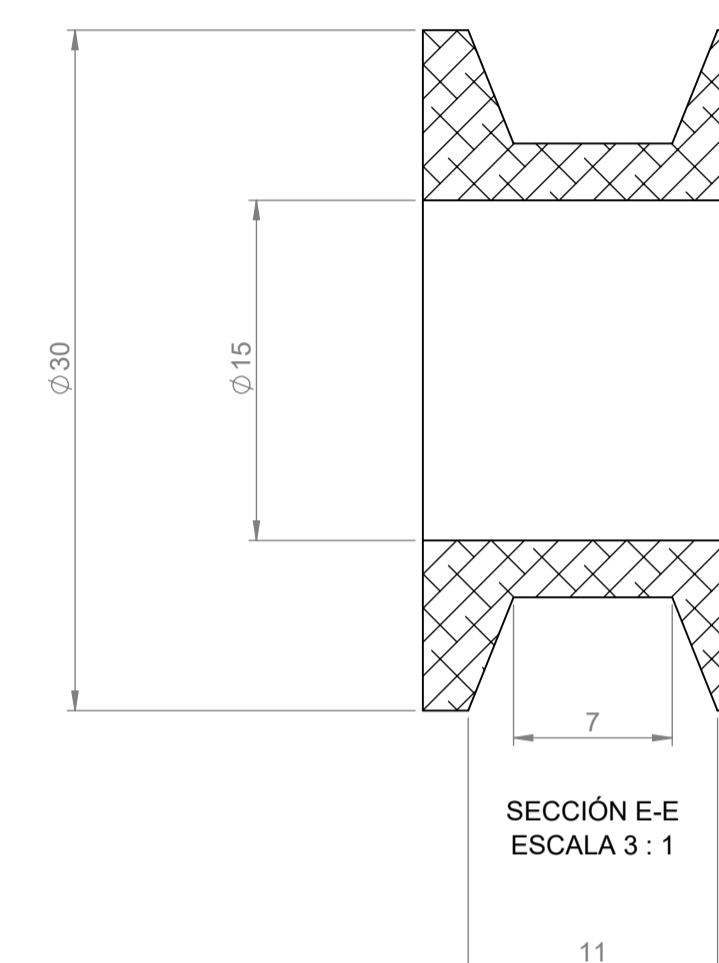
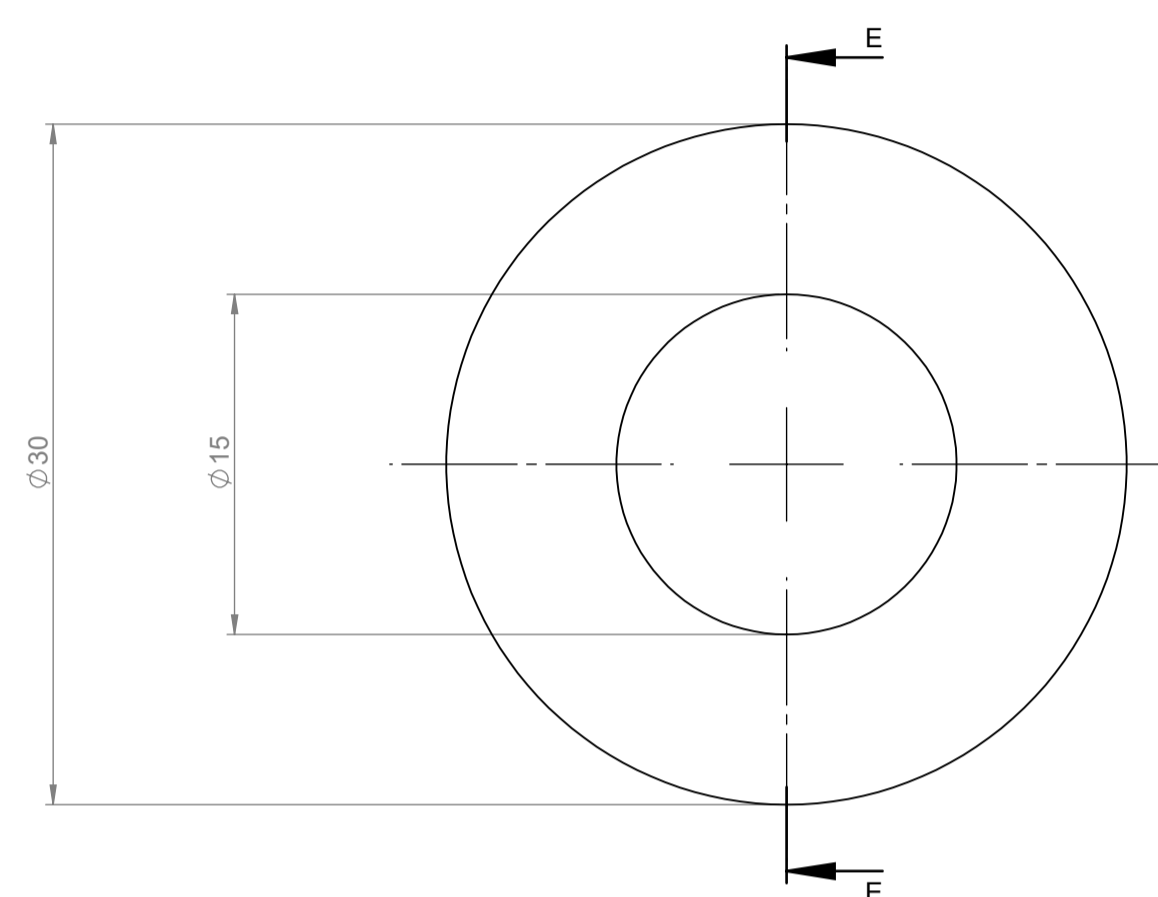
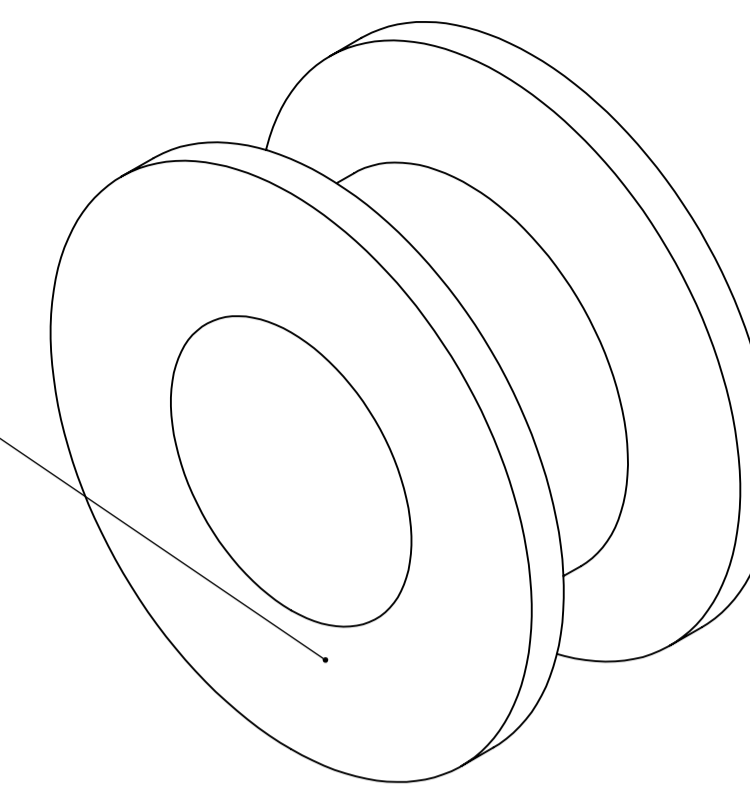


Platina soporte motor

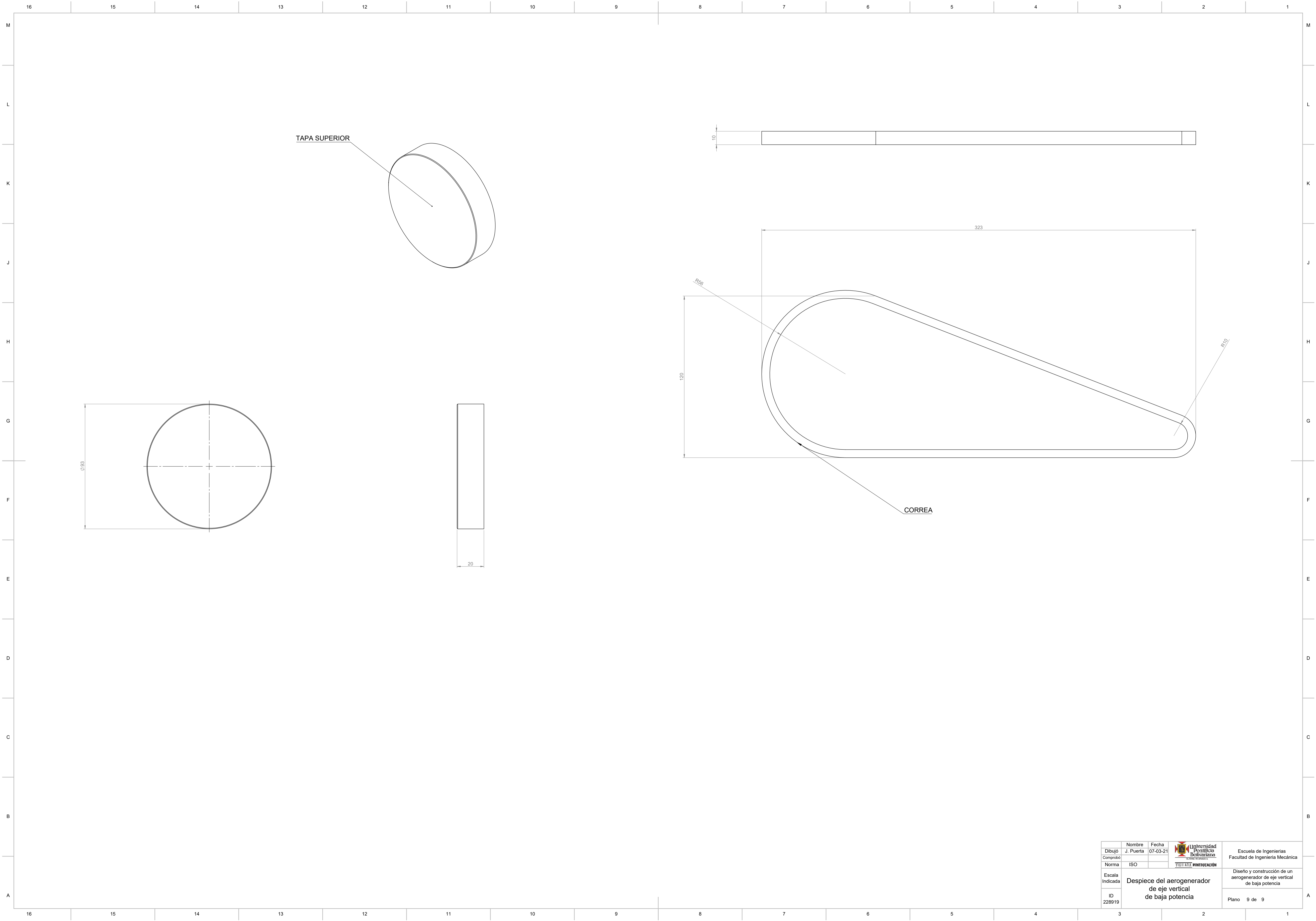


Motor Generator

Polea



Nombre	Fecha	 Universidad Politécnica de Puerto Rico <small>UNIVERSITY OF PUERTO RICO</small> INSTITUCIÓN DE EDUCACIÓN	Escuela de Ingenierías Facultad de Ingeniería Mecánica
Dibujó	J. Puerta		
Comprobó	07-03-21		
Norma	ISO		
Escala Indicada	Despiece del aerogenerador de eje vertical de baja potencia		Diseño y construcción de un aerogenerador de eje vertical de baja potencia
ID	228919		Piano 8 de 9



TAPA SUPERIOR

CORREA

Nombre	J. Puerta	Fecha	07-03-21	 Universidad Politécnica de Valencia TÍTULO 4.º DE INGENIERÍA	Escuela de Ingenierías Facultad de Ingeniería Mecánica
Norma	ISO				
Escala	Despiece del aerogenerador de eje vertical de baja potencia			Diseño y construcción de un aerogenerador de eje vertical de baja potencia	
ID	228919			Plano 9 de 9	