



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

Proyecto Técnico previo a la obtención del Título de  
Ingeniero Mecánico

**TEMA:**

---

“DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA EN LA  
COMUNIDAD DE RÍO BLANCO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA.”

---

**AUTOR:** Cristóbal Andrés Aguilar Castro

**TUTOR:** Ing. Mg. Alex Mayorga

**AMBATO - ECUADOR**

**2017**

## **APROBACIÓN DEL TUTOR**

En mi calidad de tutor del proyecto técnico, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, con el tema “DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA EN LA COMUNIDAD DE RÍO BLANCO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA.”, elaborado por el Sr. Cristóbal Aguilar, portador de la cedula de ciudadanía 180463758-3 y egresado de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica.

Certifico:

El presente proyecto técnico es original de su autor.

Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.

Esta concluido en su totalidad.

Ambato, agosto de 2017

.....

Ing. Mg. Alex Mayorga

**TUTOR DEL PROYECTO TÉCNICO**

## **AUTORÍA DEL PROYECTO TÉCNICO**

El presente proyecto técnico “DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA EN LA COMUNIDAD DE RÍO BLANCO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA.”. Así como los adjuntos, opiniones, conclusiones y recomendaciones son privilegio del autor, excepto fuentes bibliográficas.

Ambato, agosto de 2017

.....  
Cristóbal Aguilar  
C.I. 180463758-3

## **DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de éste proyecto técnico o parte de él un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi proyecto técnico con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este proyecto técnico dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando ésta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando a mis derechos de autor.

Ambato, agosto de 2017

Autor

.....

Cristóbal Aguilar  
C.I. 180463758-3

## **APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO**

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del proyecto técnico realizado por el estudiante Cristóbal Andrés Aguilar Castro de la carrera de Ingeniería Mecánica, bajo el tema: “DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA EN LA COMUNIDAD DE RÍO BLANCO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA”

Ambato, septiembre del 2017

Para constancia firman:

---

Ing. Gonzalo López

---

Ing. Víctor Espín

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Cristóbal y Gloria, por el impulso necesario para alcanzar la consecución de mis metas.

A mis hermanas, Daniela y Doménica, de quienes deseo ser la fuente de inspiración y el ejemplo a seguir.

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres, por ser el sostén en el cual me he apoyado en los momentos difíciles.

A la Universidad Técnica de Ambato, especialmente a la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, institución que contribuyó en mi formación profesional.

A mi tutor, Ing. Mg. Alex Mayorga, quien me guió eficientemente en el desarrollo del presente proyecto.

## ÍNDICE GENERAL

PORTADA.....	I
APROBACIÓN DEL TUTOR.....	II
AUTORÍA DEL PROYECTO TÉCNICO.....	III
DERECHOS DE AUTOR.....	IV
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO .....	V
DEDICATORIA .....	VI
AGRADECIMIENTO.....	VII
ÍNDICE GENERAL.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XI
ÍNDICE DE TABLAS .....	XIII
RESUMEN EJECUTIVO .....	XIV
SUMMARY .....	XV
<b>CAPÍTULO I. ANTECEDENTES .....</b>	<b>1</b>
1.1 Tema.....	1
1.2 Antecedentes .....	1
1.3 Justificación.....	3
1.4 Objetivos .....	5
1.4.1 General .....	5
1.4.2 Específicos .....	5
<b>CAPÍTULO II. FUNDAMENTACIÓN .....</b>	<b>6</b>
2.1 Investigaciones previas.....	6
2.2 Fundamentación teórica .....	7
2.2.1 Aerogeneradores.....	8
2.2.2 Tipos de aerogeneradores.....	8
2.2.2.1 Aerogenerador de eje vertical.....	8
2.2.2.2 Aerogenerador de eje horizontal .....	9
2.2.2.3 Orientación del rotor .....	10
2.2.3 Aerogeneradores de baja potencia.....	11
2.2.3.1 Partes de un aerogenerador de baja potencia.....	12



2.2.3.2	Sistemas de orientación.....	13
2.2.4	Perfiles aerodinámicos .....	13
2.2.5	Tipos de perfiles aerodinámicos.....	14
2.2.6	Perfiles NACA .....	15
2.2.7	Potencia del viento .....	17
2.2.8	Tipos de torres para aerogeneradores.....	18
2.2.9	Generador de electricidad para minieólica.....	19
2.2.9.1	Tipos de generadores.....	20
2.2.10	Regulador de carga.....	21
2.2.11	Inversor.....	22
2.2.12	Baterías.....	22
<b>CAPÍTULO III. DISEÑO DEL PROYECTO.....</b>		<b>23</b>
3.1	Selección de alternativas .....	23
3.1.1	Tipo de rotor.....	23
3.1.2	Relación de velocidades de diseño TSR.....	23
3.1.3	Número de álabes .....	24
3.1.4	Selección del perfil aerodinámico .....	24
3.1.5	Fuerzas que actúan sobre el alabe y rotor.....	26
3.1.6	Material de los álabes .....	27
3.1.7	Sistema de orientación .....	28
3.1.8	Tipo de torre de sustentación.....	31
3.1.9	Tipo de generador.....	32
3.1.10	Tipo de inversor .....	34
3.1.11	Tipo de baterías .....	35
3.2	Cálculos o modelo operativo.....	36
3.2.1	Dimensionamiento del álabe .....	36
3.2.1.1	Potencia útil.....	36
3.2.1.2	Relación de velocidades de diseño.....	37
3.2.1.3	Coefficiente de potencia .....	37
3.2.1.4	Densidad del aire .....	37
3.2.1.5	Media del cubo de velocidades .....	38
3.2.1.6	Longitud del álabe.....	39

3.2.1.7 Longitud de la cuerda.....	40
3.2.1.8 Linealización del álabes.....	43
3.2.1.9 Modelado del álabes en 3D.....	45
3.2.2 Diseño del sistema de orientación.....	46
3.2.3 Diseño de la torre.....	47
3.2.3.1 Determinación de las cargas.....	48
3.2.3.2 Determinación de los esfuerzos.....	51
3.2.3.3 Simulación de los esfuerzos.....	57
3.2.3.4 Factor de seguridad.....	57
3.2.3.5 Deformación.....	58
3.2.3.6 Cables de sujeción.....	59
3.2.4 Sistema de contrapeso de la torre.....	62
3.3 Presupuesto.....	63
3.4 Especificaciones técnicas.....	64
3.5 Protocolo de pruebas y resultados.....	65
<b>CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>71</b>
4.1 Conclusiones.....	71
4.2 Recomendaciones.....	72
ANEXOS.....	78
ANEXO A:.....	79
ANEXO B:.....	80
ANEXO C:.....	82
ANEXO D:.....	83
ANEXO E:.....	84
ANEXO F:.....	85
PLANOS.....	92

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Fig. 1</b> Aerogeneradores de eje vertical. ....	9
<b>Fig. 2</b> Aerogenerador de eje horizontal.....	10
<b>Fig. 3</b> Aerogenerador tipo Sotavento.....	10
<b>Fig. 4</b> Aerogenerador tipo Barlovento. ....	11
<b>Fig. 5</b> Esquema de instalación eólica de baja potencia con acumulador. ....	11
<b>Fig. 6</b> Álabes de un aerogenerador. ....	12
<b>Fig. 7</b> Sistema de orientación mediante colas.....	13
<b>Fig. 8</b> Flujo alrededor de perfiles, alta y baja presión.....	14
<b>Fig. 9</b> Familias de perfiles aerodinámicos. ....	15
<b>Fig. 10</b> Terminología empleada para la geometría de los perfiles alar NACA.....	16
<b>Fig. 11</b> Torres con tensores A, las de Celosía B. ....	19
<b>Fig. 12</b> Torre Abatible.....	19
<b>Fig. 13</b> Generador de imanes permanentes. ....	21
<b>Fig. 14</b> Perfil NACA 0012.....	25
<b>Fig. 15</b> Perfil NACA 2412.....	25
<b>Fig. 16</b> Perfil NACA 4412.....	26
<b>Fig. 17</b> Fuerzas en perfil. ....	26
<b>Fig. 18</b> Vista frontal del aerogenerador. ....	28
<b>Fig. 19</b> Vista superior del aerogenerador.....	29
<b>Fig. 20</b> Vista superior del aerogenerador.....	29
<b>Fig. 21</b> Vista superior del aerogenerador.....	30
<b>Fig. 22</b> Turbina plegada. ....	30
<b>Fig. 23</b> Posición recomendada de la veleta.....	31
<b>Fig. 24</b> Brazo de la cola del aerogenerador.....	31
<b>Fig. 25</b> Componentes del generador de flujo axial. ....	32
<b>Fig. 26</b> Dimensiones de los imanes seleccionados. ....	33
<b>Fig. 27</b> Ubicación de las bobinas. ....	33
<b>Fig. 28</b> Ubicación de los imanes.....	33
<b>Fig. 29</b> Ángulos de ataque para el diseño de los álabes.....	40
<b>Fig. 30</b> Cuerdas linealizadas en el borde de salida. ....	45
<b>Fig. 31</b> Cuerdas linealizadas en el borde de salida. ....	45

<b>Fig. 32</b> Veleta de orientación.....	46
<b>Fig. 33</b> Unión en forma de bocín.....	47
<b>Fig. 34</b> Cables de acero y pernos en U.....	48
<b>Fig. 35</b> Cargas que actúan sobre la torre.....	48
<b>Fig. 36</b> Diagrama de cuerpo libre con cargas y restricciones de movimiento.....	52
<b>Fig. 37</b> Cargas de resistencia y de tensión del cable.....	52
<b>Fig. 38</b> Diagrama de fuerza cortante y momento flector.....	54
<b>Fig. 39</b> Simulación de esfuerzos.....	57
<b>Fig. 40</b> Factor de seguridad.....	58
<b>Fig. 41</b> Deformación.....	58
<b>Fig. 42</b> Cargas y tensor.....	59
<b>Fig. 43</b> Diagrama de cuerpo libre con cargas y restricciones incluyendo el cable tensor.	
59	
<b>Fig. 44</b> Cargas de resistencia y de tensión del cable.....	60
<b>Fig. 45</b> Torre levantada con el sistema de contrapeso.....	63
<b>Fig. 46</b> Voltaje de operación entregado por el aerogenerador.....	67

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Características de las baterías.....	22
<b>Tabla 2</b> Propiedades mecánicas de madera Laurel.....	28
<b>Tabla 3</b> Especificaciones del generador. ....	34
<b>Tabla 4</b> Velocidades de diseño según el número de álabes.....	37
<b>Tabla 5</b> Valores de la densidad del aire.....	38
<b>Tabla 6</b> Velocidades de diseño según el número de álabes.....	39
<b>Tabla 7</b> Valores para la geometría del álabe de las diez secciones. ....	42
<b>Tabla 8</b> Valores obtenidos para la cuerda y ángulo de curvatura.....	42
<b>Tabla 9</b> Datos para la Linealización del álabe.....	43
<b>Tabla 10</b> Valores linealizados obtenidos para la cuerda y ángulo de curvatura. ....	44
<b>Tabla 11</b> Dimensiones de los tubos disponibles.....	56
<b>Tabla 12</b> Cables disponibles tomando en cuenta el ángulo de ubicación. ....	61
<b>Tabla 13</b> Costo total del proyecto. ....	63
<b>Tabla 14</b> Especificaciones técnicas del aerogenerador. ....	64
<b>Tabla 15</b> Tensión entregada a la red eléctrica por el aerogenerador. Prueba 1.....	65
<b>Tabla 16</b> Tensión entregada a la red eléctrica por el aerogenerador. Prueba 2.....	67
<b>Tabla 17</b> Tensión entregada a la red eléctrica por el aerogenerador. Prueba 3.....	68
<b>Tabla 18</b> Tensión entregada a la red eléctrica por el aerogenerador. Prueba 4.....	69
<b>Tabla 19</b> Tensión entregada a la red eléctrica por el aerogenerador. Prueba 5.....	69

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

## FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

**Tema:** “DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA EN LA COMUNIDAD DE RÍO BLANCO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA.”

**AUTOR:** Cristóbal Aguilar

**TUTOR:** Ing. Mg. Alex Mayorga

### RESUMEN EJECUTIVO

El presente proyecto técnico consiste en el diseño de un aerogenerador de baja potencia para el abastecimiento de energía eléctrica de corriente alterna monofásica para una vivienda localizada en la Comunidad de Río Blanco, del cantón Ambato, provincia de Tungurahua. A partir del estudio de la demanda, realizada con base en el potencial eólico del lugar y el consumo estimado, se estableció como parámetros de diseño una potencia útil de 178 W, lo que corresponde a un sistema micro eólico, una velocidad de diseño 12,63 m/s, perfiles aerodinámicos NACA 4412 de tres álabes con una longitud de 1,30 m. cada uno y contruidos de madera laurel, altura de operación a 11m, mediante el empleo de una torre abatible, además se incorpora un generador de imanes permanentes, una batería de plomo ácido y un inversor que convierte el voltaje de 12 V DC a 110 V AC. Los principales componentes del aerogenerador son los álabes, el generador eléctrico, el sistema de orientación, la torre de sustentación, el inversor y las baterías o acumuladores. Este aerogenerador permite satisfacer las necesidades energéticas básicas de una familia de la localidad y representa un importante aporte para el desarrollo del sector, tomando en consideración las condiciones de vida de la gente beneficiado, quienes no tienen ingresos económicos estables y no disponen de suministro de energía eléctrica de la red pública.

**Palabras clave:** Aerogenerador, álabes, potencia, generador, torre de sustentación.

# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**

**Theme:** "DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA EN LA COMUNIDAD DE RÍO BLANCO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA."

**AUTHOR:** Cristóbal Aguilar

**TUTOR:** Ing. Mg. Alex Mayorga

### **SUMMARY**

The present technical project consists of the design of a low-power wind turbine for the supply of single-phase AC power for a house located in the Río Blanco Community, from Ambato, Tungurahua province. Based on the demand study, made on the local wind power and estimated consumption, a useful power of 178 W was established as design parameters which corresponds to a micro-wind system, other parameters are a design speed of 12.63 m/s, NACA 4412 aerodynamic profiles with three blades, a length of 1.30 m. each one, and built of wood laurel, operating height to 11m. through the use of a folding tower, additionally a permanent magnet generator, an acid lead battery, and an inverter that converts the voltage from 12 V DC to 110 V AC were incorporated. The main components of the wind turbine are the blades, the electric generator, the orientation system, the support tower, the inverter, and the batteries or accumulators. This wind turbine allows meeting the basic energy needs of a local family and represents an important contribution to the development of the community, taking into consideration the living conditions of the beneficiaries, who do not have stable economic income and do not have an energy supply from public network.

**KEYWORDS:** Blade, generator, lift tower, power, wind turbine.

## **CAPÍTULO I. ANTECEDENTES**

### **1.1 Tema**

“DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA EN LA COMUNIDAD DE RÍO BLANCO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA”.

### **1.2 Antecedentes**

El movimiento del aire y las diferencias de presión en la atmósfera forman corrientes permanentes, que constituyen los vientos, los cuales pueden ser utilizados como fuente de energía, específicamente corresponde a la denominada energía eólica, que es renovable por su carácter de inagotable. Para poder aprovechar la energía del viento se requieren de instalaciones eólicas, que constan de una o varias máquinas conocidas como aerogeneradores, que funcionan mediante el accionamiento de palas fijadas a un buje.

De acuerdo a la potencia instalada se tienen tres niveles de generación de energía eólica. En kilovatios (kW), que son instalaciones en lugares aislados con el propósito de satisfacer demandas particulares, en donde no se cuenta con acceso a la red eléctrica. En megavatios (MW), que corresponden a las granjas eólicas, que generalmente se encuentran conectadas a la red eléctrica. En gigavatios (GW), que poseen una gran capacidad de producción de energía eléctrica y se utilizan con el fin de producir hidrógeno, en ese caso el viento se exporta transformado en hidrógeno [1].

En el caso del Ecuador, el potencial eólico factible a corto plazo es de 884 MW a nivel continental. Sin embargo, en operación se tiene únicamente una potencia de 16,5 MW. Es decir se aprovecha el 1,87% de la disponibilidad estimada en el Ecuador continental. Mientras que en la región Insular el potencial factible a corto plazo es de 7 MW y en operación se cuenta con 4,7 MW, que representa el 67,14% de la disponibilidad [2].



El motivo por el cual existe esta diferencia es porque en Galápagos el potencial de energía hidroeléctrica es casi nulo, en tanto que en el continente su utilización es masiva. Al comparar entre las diferentes fuentes de energías tanto renovables como no renovables, se tiene que únicamente el 0,32% de toda la energía generada en el país corresponde a la eólica [3].

El proyecto eólico más importante en el Ecuador lo constituye la Central Eólica Villonaco, localizada en la provincia de Loja, con una potencia nominal de 16 MW, que le permiten generar 71.94 GWh/año, por lo que se puede catalogar como de mediana generación. Además, este parque eólico se encuentra interconectado a la subestación de energía eléctrica Loja (69 kV). El mismo consta de 11 aerogeneradores, cuyo buje se encuentra a 65 m de altura y opera a una velocidad media del viento de 12,4 m/s [4].

Por otra parte, en lo correspondiente a la generación micro eólica (50 W a 1 kW), se suele emplear en el país en las zonas rurales, en donde no llega la red eléctrica. Se aprovecha para consumo doméstico, es decir para hacer funcionar electrodomésticos y para iluminación [5]. No obstante, la construcción de estos aerogeneradores se enfrenta al problema de que la evaluación oficial del recurso eólico en el país se establece a partir de los 50 m de altura, por lo tanto el potencial a alturas inferiores a 30 m es casi desconocido [6]. Se señala que son considerados como técnicamente aprovechables los sitios con velocidades medias anuales de viento mayor o iguales a 7 m/s, bajo 3.000 msnm, y con una distancia menor a 10 km desde las redes de transmisión y carreteras [2].

A pesar de no disponerse de datos oficiales de velocidad de viento a pequeñas alturas, se han desarrollado pequeños proyectos micro eólicos de aerogeneradores, los que básicamente han sido impulsados por las instituciones de educación superior. Estos proyectos se enfocan en el abastecimiento energético para demandas particulares, generalmente de una vivienda. Para el efecto, los investigadores efectúan mediciones de velocidad de viento en el lugar a implementarse el aerogenerador, al mismo tiempo que estiman la demanda requerida, y a partir de ahí realizan el diseño del sistema.

En el caso de la Universidad Técnica de Ambato, se ha impulsado el desarrollo de un proyecto titulado “Sistema de bombeo eólico con el fin de satisfacer las necesidades de irrigación agrícola en la parroquia García Moreno”, el cual consiste en el desarrollo de un sistema conversor de energía para bombear agua a una velocidad de viento de 6.1m/s [7]. De manera similar existen, otros proyectos con una capacidad inferior a 50 kW.

En el presente proyecto se propone realizar el Diseño de un aerogenerador de baja potencia, como una contribución al beneficio de la comunidad de Río Blanco, del cantón Ambato, provincia de Tungurahua y particularmente de una vivienda ahí ubicada, que no dispone del servicio de energía eléctrica de la red pública y que demanda un bajo consumo de electricidad (178 W).

El mencionado proyecto que se plantea es factible, gracias a que se dispone de mediciones del potencial eólico, realizadas previamente en la referida localidad por parte de Naranjo, J. en el periodo octubre 2015 – enero 2016, a partir de las cuales se determinó que existen características favorables para implementar proyectos de aprovechamiento eólico. Es así que, la densidad media del aire en Río Blanco es de  $0,84 \text{ kg/m}^3$  y la velocidad eficaz promedio de 6,47 m/s a 11 m. de altura. Consecuentemente, se puede satisfacer la demanda a través de un aerogenerador eólico de baja potencia.

### **1.3 Justificación**

La propuesta de implementar una turbina de generación eólica en la comunidad de Río Blanco se debe a las condiciones atmosféricas del lugar, que propician la instalación de dicha turbina, además del cambio de la matriz energética impulsada por el gobierno nacional, ya que la misma matriz hasta hace unos pocos años dependía altamente del sector hidrocarburífero, con los altos costos que implicaban para el país, como por ejemplo podemos mencionar el funcionamiento de turbinas con diésel en barcazas de generación termoeléctrica. Este cambio de matriz se puede evidenciar de sobremanera como es la Central Eólica Villonaco en la provincia de Loja. El cambio de matriz energética también incluye además de los parques eólicos las nuevas centrales hidroeléctricas.

Paralelamente, en la comunidad de Río Blanco se está desarrollando un proyecto llamado "Viabilidad del potencial energético y socioeconómico de energías renovables (eólico - solares) para poblaciones remotas de la provincia de Tungurahua" ubicado a 40 km de la ciudad de Ambato en la vía Ambato – Guaranda, dirigido por el Ingeniero Alex Mayorga, donde se está obteniendo datos de velocidad de viento cuyos resultados hasta el momento reflejan la aplicación de proyectos de energía renovable de baja potencia.

Ya que los habitantes de ese lugar donde se va a desarrollar el proyecto tienen un índice de ingresos económicos bajos, de aproximadamente \$30 mensuales con un consumo eléctrico menor a 100 kW\*h/mes, con un costo promedio de \$5 la planilla eléctrica lo que equivale al 17% de sus ingresos, con lo que la ejecución del proyecto traería beneficios tanto sociales como económicos a los habitantes que se vea afectado por el mismo [8].

Se puede aplicar un aerogenerador para mejorar el nivel de vida de las familias a quien espera beneficiar el proyecto (1 familia), ya que el dinero que se invertiría en el pago de la planilla eléctrica pueden invertirlo en otras cosas, o en su defecto ni si quiera disponen de energía eléctrica porque no pueden pagarla.

Uno de los aspectos que mejoraría el nivel de vida sería por ejemplo la educación ya que por falta de iluminación eléctrica los hijos de las familias no pueden estudiar adecuadamente durante las horas de poca iluminación solar, pudiendo una vez implementado el proyecto hacerlo a cualquier hora.

Otro beneficio es el bajo mantenimiento que necesitan estas máquinas puede ser realizado por las mismas personas a quién beneficia el proyecto.

Un aerogenerador es un equipo que no consume combustible fósil ya que la energía requerida para su funcionamiento es obtenida del viento, con lo que se podría motivar el uso de este tipo de energía alternativa en los lugares que favorecen su aplicación. [9]

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 General**

- Diseñar un aerogenerador de baja potencia en la comunidad de Río Blanco, provincia de Tungurahua.

### **1.4.2 Específicos**

- Determinar parámetros de diseño del rotor, alabes y torre de sustentación.
- Seleccionar el tipo de generador, los inversores y baterías.
- Implementar el aerogenerador.
- Tomar mediciones características del desempeño del aerogenerador.

## **CAPÍTULO II. FUNDAMENTACIÓN**

### **2.1 Investigaciones previas**

Freddy Molina y Luis Pacheco en su proyecto previa obtención del título de Ingeniería Electromecánica en la Universidad Técnica de Cotopaxi, Carrera de Electromecánica bajo el tema "Construcción de un aerogenerador eólico de bajas revoluciones para la escuela fiscal mixta Portoviejo ubicada en el sector de Cuchitingue, Parroquia Aláquez, Cantón Latacunga" realizado el 2014 describe la construcción de un generador eólico de bajas revoluciones de imanes permanentes, con el propósito de generar energía eléctrica, este aerogenerador no necesita de un arranque o un punto de excitación, es decir empieza a generar desde el primer movimiento que realice cada hélice. La energía producida se almacena en una batería pasando por un rectificador de corriente, la misma energía posteriormente es convertida de DC / AC mediante un inversor, luego pasa al punto de entrega, es decir las instalaciones de la Escuela Fiscal Mixta "Portoviejo". De esta manera se proporciona energía limpia renovable a un costo relativamente bajo. Este tipo de aerogenerador es muy práctico y se lo puede ubicar fácilmente en sectores rurales. [10]

Hector G. Espinoza en el proyecto previa a la obtención del título de Ingeniería Mecánica en la Escuela Superior Politecnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción bajo el tema "Elaboración de un modelo CFD de un generador eólico y validación experimental" realizado el 2008 tiene como objetivo elaborar un modelo de un generador eólico de eje horizontal utilizando dinámica de fluidos computacional y validar esos resultados con mediciones de campo. Se utilizó un aerogenerador J. Bornay disponible en el laboratorio de la ESPOL, para elaborar el modelo en CFD se utilizó un software. El modelo consta de las aspas en tres dimensiones y un volumen de control que encierra las aspas. Se alcanzaron condiciones de corriente libre en la superficie de control, los contornos de velocidad fueron concordantes con el fenómeno físico y la potencia predicha por el modelo CFD coherente con la potencia medida experimentalmente. [11]

Luis Endara y Pablo Toctaguano en su proyecto previa obtención del título de Ingeniería Electromecánica en la Universidad Técnica de Cotopaxi, Carrera de Electromecánica bajo el tema "Construcción de un generador eólico de bajas revoluciones por minuto para una vivienda rural, ubicada en el sector de Pansachí el morro perteneciente a la parroquia Mulaló del cantón Latacunga provincia de Cotopaxi" realizado el 2012 que se encarga de la captación de la energía del viento y convertirla en electricidad con la finalidad de abastecer de energía eléctrica a habitantes de zonas rurales aisladas de la provincia. Con el fin de optimizar el suministro de energía eléctrica, se incorporó un sistema de rectificación AC-DC, el cual se encarga de transformar la corriente AC-DC y maximizar la eficiencia en la conversión en función de la variación de la velocidad de giro de la turbina eólica. Además se dimensionó un sistema de acumulación de energía con el fin de aprovechar el excedente de energía en momentos de baja fluencia del viento. [12]

## **2.2 Fundamentación teórica**

La energía eólica es una de las fuentes de energías renovables para la que se dispone de una tecnología madura, por lo que su explotación es técnica y económicamente viable, en unas condiciones de producción y coste competitivas con las fuentes de energía tradicionales.

Ventajas:

- No hay emisión de gases contaminantes.
- Es una fuente de energía renovable.
- Su uso y posibles incidentes en su explotación no implican riesgos ambientales de gran impacto.
- Ahorra combustibles fósiles y diversifica el suministro energético.

Desventajas:

El viento es disperso y de gran variabilidad y fluctuación (tanto en velocidad como en dirección), por lo que no todos los lugares son adecuados para una explotación técnica. Un aerogenerador puede producir un ruido que podría llegar a ser molesto si está situado en un lugar cercano a un núcleo habitado. [9]

### **2.2.1 Aerogeneradores**

Un aerogenerador es un dispositivo que convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica. Las palas de un aerogenerador giran en un amplio rango de velocidad según su tecnología, a una velocidad constante o bien a velocidad variable, donde la velocidad del rotor varía en función de la velocidad del viento para alcanzar una mayor eficiencia.

Además, se procura situarlos lejos de obstáculos (árboles, edificios, etc.) que crean turbulencias en el aire y en lugares donde el viento sopla con una intensidad parecida durante todo el tiempo, a fin de optimizar su rendimiento.

Los aerogeneradores tienen una vida media superior a 25 años.

La rápida evolución de la tecnología del viento ha propiciado el aumento de la durabilidad de los aerogeneradores. [13]

### **2.2.2 Tipos de aerogeneradores**

Hay dos tipos principales de aerogeneradores verticales y de ejes horizontales. Se recoge la definición de aerogeneradores verticales y horizontales como un generador eléctrico que funciona convirtiendo la energía cinética del viento en energía mecánica y a través de una turbina eólica en energía eléctrica.

#### **2.2.2.1 Aerogenerador de eje vertical**

Se destacan por no necesitar el mecanismo de orientación y lo que es el generador eléctrico puede ir dispuesto en el suelo, su producción energética es menor. Existen tres tipos de aerogeneradores verticales como son Savonius, Giromill y Darrieus.

- Tipo Savonius

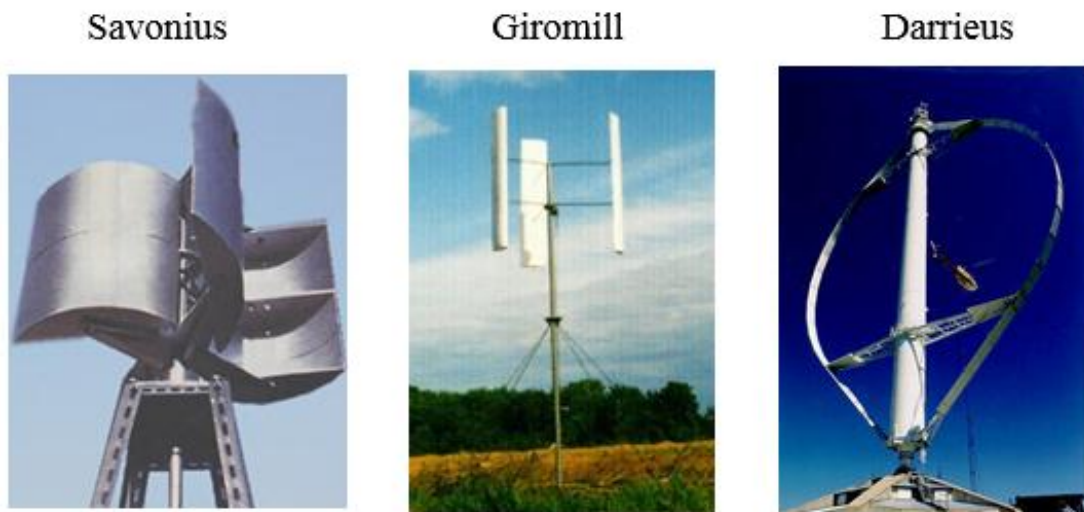
Este se caracteriza por estar formado por dos semicírculos desplazados horizontalmente a una determinada distancia, a través de la cual se desplaza el aire, por lo que desarrolla poca potencia.

- Tipo Giromill

Destaca por tener un conjunto de palas verticales unidas con dos barras en el eje vertical y ofrece un rango de suministro energético de 10 a 20 kW.

- Tipo Darrieus

Formado por dos o tres palas biconvexas unidas al eje vertical por la parte inferior y superior, permite aprovechar el viento dentro de una banda ancha de velocidades. El inconveniente que posee es que no se encienden por si solos y necesitan un rotor Savonius.



**Fig. 1** Aerogeneradores de eje vertical.

**Fuente:** [14]

### 2.2.2.2 Aerogenerador de eje horizontal

Básicamente es una máquina rotacional en el que el movimiento se produce por la energía cinética del viento cuando este actúa sobre un rotor que normalmente dispone de tres palas. Su característica principal es que el eje de rotación se encuentra paralelo al suelo y a la dirección del viento.

Entre sus ventajas, destaca por un lado que al estar a alturas más elevadas del suelo, aprovechan mejor las corrientes de aire. [13]



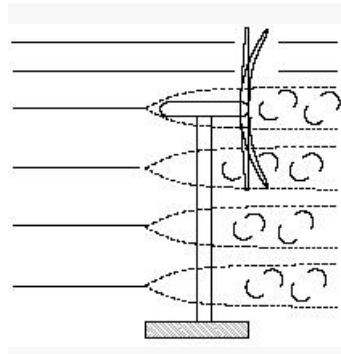


**Fig. 2** Aerogenerador de eje horizontal.

**Fuente:** [14]

### 2.2.2.3 Orientación del rotor

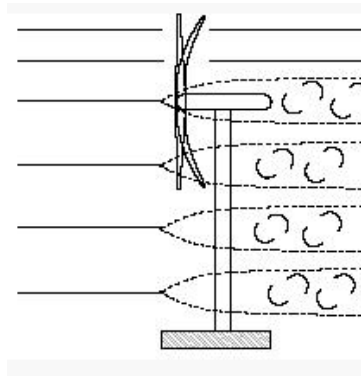
Orientadas a sotavento (down - wind): Cuando el rotor se encuentra enfocado en sentido contrario a la dirección del viento dominante. En este sistema el viento pasa primero por la torre por lo cual las aspas del generador deben tener una cierta conicidad. La orientación pasiva a sotavento presenta inconvenientes, en este tipo de aerogeneradores el aire al pasar primero por la torre provoca turbulencias, que luego pasan a las aspas, provocando sobreesfuerzos de torsión en el eje de rotación horizontal del aerogenerador.



**Fig. 3** Aerogenerador tipo Sotavento.

**Fuente:** [14]

Orientadas a barlovento (up-wind): Cuando el rotor se encuentra enfocado de frente a la dirección del viento dominante [14]. En esta forma la orientación el viento pasa primero por las aspas antes de llegar a la torre. Además la captura de energía es menor en estos casos y las cargas de fatiga son mayores. [15]



**Fig. 4** Aerogenerador tipo Barlovento.

**Fuente:** [14]

### 2.2.3 Aerogeneradores de baja potencia

Son máquinas pequeñas que se utilizan para alimentar cargas que están alejadas de las redes eléctricas, se combinan con bancos de baterías para almacenar la electricidad. Las palas del rotor se construyen con materiales de tipo *composite* (fibra de vidrio reforzada con poliéster). Pocos modelos usan madera o fibra de carbono. El aluminio no es muy aconsejable dada su débil resistencia frente a la fatiga metálica.

Se puede encontrar un amplio rango de velocidades nominales de la punta de la pala que pueden ir desde 20 hasta 120 m/s. La velocidad nominal, en la práctica, decrece a medida que aumenta el diámetro del rotor. [9]



**Fig. 5** Esquema de instalación eólica de baja potencia con acumulador.

**Fuente:** [16].

### 2.2.3.1 Partes de un aerogenerador de baja potencia

**Rotor:** El rotor es donde la energía cinética del viento se convierte en energía rotativa, está acoplado al eje de baja velocidad del generador. En un aerogenerador moderno de 1 MW el rotor gira muy lento, a unas 19 a 30 revoluciones por minuto (r.p.m.). La mayoría de los rotores en la actualidad son horizontales y pueden tener articulaciones, la más habitual es la de cambio de paso. En la mayoría de los casos el rotor está situado a barlovento de la torre, con el objeto de reducir las cargas cíclicas sobre las aspas que aparecen si se situara a sotavento de ella, pues al pasar una pala por detrás de la estela de la torre, la velocidad incidente está muy alterada. [17]

**Álabes:** Conocidos también como aspas o palas, son una parte fundamental en una turbina eólica. Realizan varias tareas y deben resistir grandes cargas.

Los álabes toman la energía del viento, la capturan y la convierten en rotación en el buje. El perfil aerodinámico de los álabes es similar al perfil del ala de un avión. Los álabes emplean el mismo principio de la fuerza de empuje que actúa por la parte de abajo del ala. El aire produce una sobrepresión en la parte inferior y un vacío en la parte superior. Esta provoca una fuerza de empuje que hace que el rotor rote.



**Fig. 6** Álabes de un aerogenerador.

**Fuente:** [18]

Actualmente la mayoría de los rotores tienen tres álabes y son de eje horizontal. Además de los bien conocidos rotores de tres aspas, existen los de dos aspas o bipalas y de una sola pala, además de los multipalas empleados fundamentalmente en los pequeños aerogeneradores y en los molinos de viento para el bombeo de agua. En el tiempo se ha demostrado que los rotores de tres palas son más eficientes en lo que

respecta a la producción de energía en las grandes turbinas eólicas. Además, estos rotores permiten una distribución de masa más adecuada, lo que hace que la rotación sea más suave y tenga una apariencia de más tranquilidad visual.

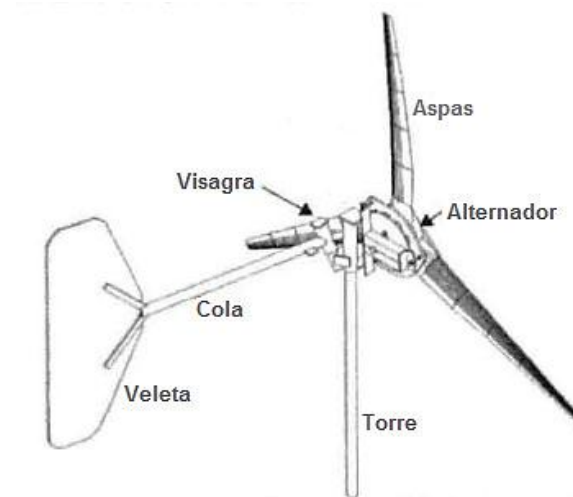
### 2.2.3.2 Sistemas de orientación

Las pequeñas turbinas por lo general se orientan mediante veletas, ésta es la que se encarga de poner al frente el viento.

De las diferentes formas de orientación se desprende:

- Orientación mediante el uso de colas (Fan tails)

Este sistema de orientación es el más antiguo pero presenta la gran ventaja de que no requiere mecanismos complejos sino simplemente una cola y un sistema (eje, cojinetes, rodamientos) para que el aerogenerador pueda girar en su eje vertical adaptándose a la dirección del viento impulsado por la fuerza de la cola. Su principal inconveniente es que requiere de grandes colas muy pesadas.



**Fig. 7** Sistema de orientación mediante colas.

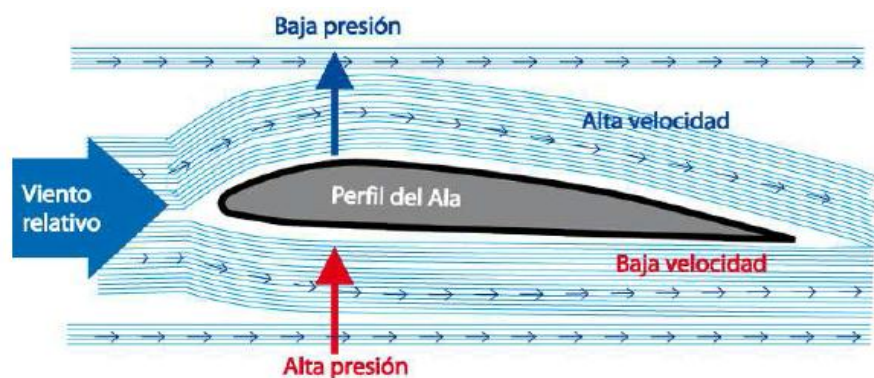
**Fuente:** [19]

### 2.2.4 Perfiles aerodinámicos

Un perfil aerodinámico es un cuerpo con un diseño determinado, el cual aprovechará al máximo las fuerzas que se originan por la variación de velocidad y presión cuando

este se sitúa dentro de una corriente de aire. Un perfil aerodinámico se define como la sección transversal de un ala en una turbina eólica.

Las dos fuerzas más importantes de las cuales se busca el equilibrio con el perfil aerodinámico son la sustentación y la resistencia, mismas que son resultantes de las fuerzas de presión y a los esfuerzos cortantes sobre la superficie del cuerpo, por ende determinamos que los verdaderos artífices de las fuerzas aerodinámicas son el cortante y la presión. [20]



**Fig. 8** Flujo alrededor de perfiles, alta y baja presión.

**Fuente:** [21]

### 2.2.5 Tipos de perfiles aerodinámicos

Existen varios tipos de perfiles, los cuales se agrupan en familias y cada una de éstas posee diferentes series. Entre las familias de perfiles se pueden destacar las series NACA, TsAGI, Joukowsky, Clark Y, RAF, Gottingen, Eppler, NLF, GA, Wortmann, entre otras.

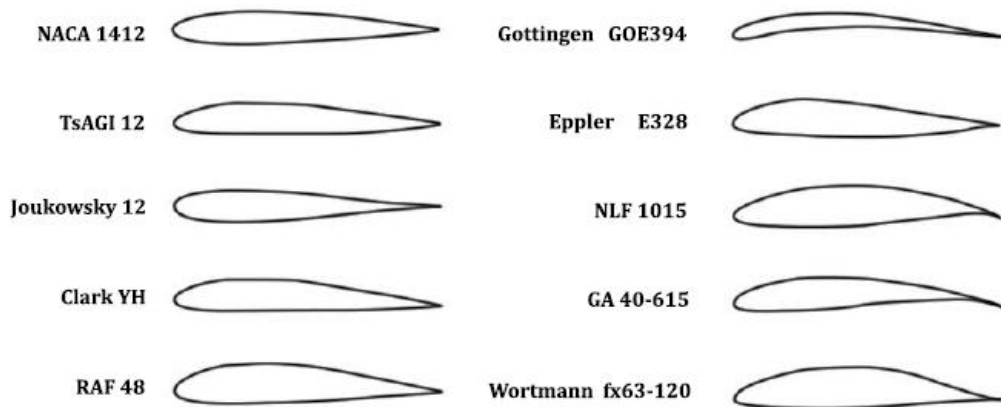
De las familias antes mencionadas, en la actualidad las series NACA son las más difundidas y empleadas. Paralelamente, existen las series TsAGI, que son el homólogo ruso, que son utilizadas en la industria aeronáutica.

Por otra parte, las primeras secciones que se definieron teóricamente fueron las Joukowsky, que hoy en día ya no se usan. Posteriormente, fueron los perfiles Clark Y (Estados Unidos) y RAF (Reino Unido), los primeros intentos de definir una familia de perfiles, en la actualidad éstos se utilizan para las hélices.

Las series Gottingen es de uso general, las Eppler y Wortmann son secciones especializadas en planeadores. Todas estas secciones son alemanas.

Finalmente, los perfiles NLF y GA son los últimos diseños desarrollados por la NASA, en el caso de los primeros se emplean en planeadores y los segundos en aviones ligeros.

A continuación se presenta un esquema comparativo entre los perfiles antes mencionados, en donde se aprecia las diferencias en las secciones de cada uno.



**Fig. 9** Familias de perfiles aerodinámicos.

**Fuente:** [22]

### 2.2.6 Perfiles NACA

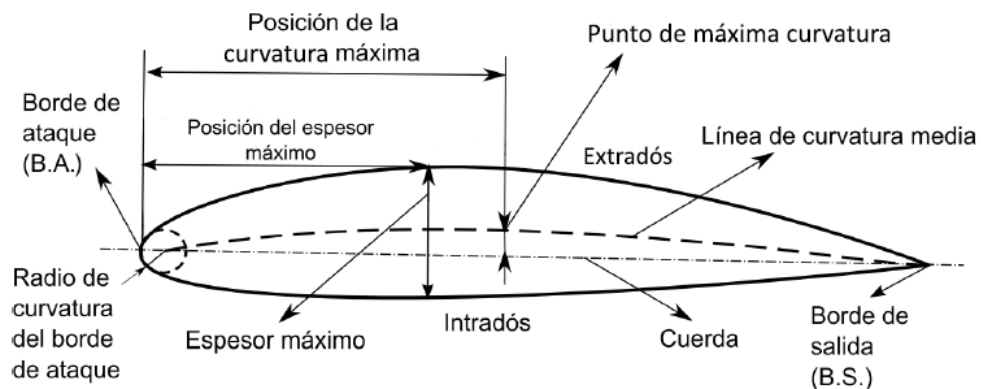
La NACA (National Advisory Comimitee for Aeronautics), llevó a cabo investigaciones sistemáticas de diferentes perfiles, y los clasificó en familias. Se hicieron estudios que dieron tipo a otros perfiles, como los Clark Y, Götingen o R.A.F. [23]

Los perfiles NACA surgen en los años 30 como el primer intento de normalizar los conocimientos aerodinámicos que por entonces se tenían. La primera familia son los NACA de cuatro cifras, en los que el primer número indica la curvatura máxima del perfil, el segundo la posición del punto en el que se encuentra el máximo de lacurvatura y los dos últimos corresponden al espesor relativo del perfil. Con el paso del tiempo surgen nuevas series de perfiles NACA, introduciendo más cifras para una descripción más detallada de los perfiles.

## Geometría de los perfiles aerodinámicos

En el diseño de palas es necesario mantener claro una serie de conceptos:

1. La línea de cuerda es una línea recta que une el borde de ataque y el borde de fuga del perfil.
2. La cuerda es la longitud de la línea anterior. Todas las dimensiones de los perfiles se miden en términos de la cuerda. La cuerda de un álabe de un rotor eólico es generalmente variable y su posicionamiento está gobernado por los diversos ángulos del perfil.
3. La línea de curvatura media es la línea media entre el extradós (superficie superior) y el intradós (superficie inferior).
4. Curvatura máxima es la distancia máxima entre la línea de curvatura media y la línea de cuerda. La posición de la curvatura máxima es importante en la determinación de las características aerodinámicas de un perfil.
5. Espesor máximo es la distancia máxima entre la superficie superior e inferior (extradós e intradós). La localización del espesor máximo también es importante.
6. Radio del borde de ataque es una medida del afilamiento del borde de ataque. Puede variar desde 0, para perfiles supersónicos afilados, hasta un 2 por 100 (de la cuerda) para perfiles más bien achatados.



**Fig. 10** Terminología empleada para la geometría de los perfiles alar NACA.

**Fuente:** [24]

A principios de la serie NACA superficie de sustentación, el 4-dígitos, 5 dígitos, y 4-/5-dígitos modificado, se generaron utilizando ecuaciones analíticas que describen la curvatura de la media-line (geométrica línea central) de la sección de perfil aerodinámico así como la distribución del espesor de la sección a lo largo de la longitud de la superficie aerodinámica. [23]

### **2.2.7 Potencia del viento**

El viento es el movimiento del aire respecto a la superficie terrestre. Este movimiento es fundamentalmente horizontal. [9]

Para definir la fuerza con que el viento puede actuar sobre la superficie terrestre es necesario considerar el concepto de potencia de viento, la cual puede ser de varios tipos, como se detalla a continuación:

Potencia disponible ( $P_d$ ). Potencia contenida en el viento debida a su energía cinética.

Potencia aprovechada ( $P_a$ ). Es la potencia que capta el rotor del eje de la máquina y que es usada para accionar la caja multiplicadora de velocidad.

Potencia de accionamiento ( $P_{ac}$ ). Es la potencia a la salida del multiplicador de velocidad utilizada por poner en movimiento el generador eléctrico.

Potencia útil ( $P_u$ ). Potencia que finalmente entregará el generador eléctrico.

Según Villarubia se define como velocidad eficaz “a aquella velocidad que debería tener el viento durante todo el año, para presentar una densidad de potencia disponible igual a la que tiene en realidad”. [9]

Coefficiente de potencia ( $C_p$ ). El coeficiente de potencia indica con qué eficiencia el aerogenerador convierte la energía del viento en electricidad. Es el coeficiente adimensional que determina el grado de producción de energía mecánica en base de aprovechar al máximo la energía cinética del viento, su valor máximo es de 0,593. [25]



### 2.2.8 Tipos de torres para aerogeneradores

Cada tipo de torre tendrá unas ventajas y unas desventajas; desde la mayor o menor dificultad de fabricación hasta el montaje, y la durabilidad.

- Torres de Celosía:

Son fabricadas utilizando perfiles de acero soldados. La ventaja básica es su costo, su fácil construcción, puesto que una torre de celosía requiere sólo la mitad de material que una torre tubular sin sustentación adicional con la misma rigidez. La principal desventaja de este tipo de torres es su apariencia visual. En cualquier caso, por razones estéticas, las torres de celosía han desaparecido prácticamente en los grandes aerogeneradores modernos.

- Torres de Mástil Tensado:

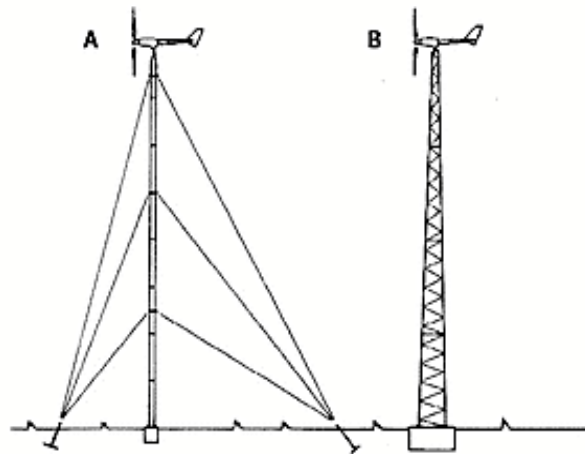
Muchos de los aerogeneradores pequeños están contruidos con delgadas torres de mástil sostenidas por cables tensores. La ventaja es el ahorro de peso y, por lo tanto, de coste. Las desventajas son el difícil acceso a las zonas alrededor de la torre, lo que las hace menos apropiadas para zonas agrícolas. Finalmente, este tipo de torres es más propensa a sufrir actos vandálicos, lo que compromete la seguridad del conjunto.

- Torres Híbridas:

Son torres compuestas por una parte fabricada con hormigón y la otra con acero. El objetivo de realizar esta mezcla consiste principalmente en abaratar costes respecto a las de hormigón totalmente, montando parte de la torre con acero. El principal problema de la parte de hormigón, es que debe ser montada in situ, por lo que los costes de montaje se elevan notablemente. Por otra parte al estar compuestas por hormigón aumenta la rigidez, por lo que se podrán utilizar para torres más altas o ahorro de material. [26]

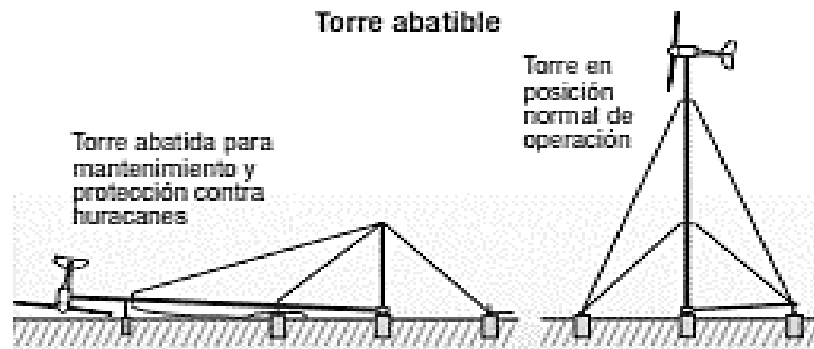
- Torres Abatibles:

Son más caras pero le permiten poder llevar a cabo en forma más fácil el mantenimiento en turbinas pequeñas de bajo peso, usualmente de 5 kW o menos.



**Fig. 11** Torres con tensores A, las de Celosía B.

**Fuente:** [27]



**Fig. 12** Torre Abatible.

**Fuente:** [27]

### 2.2.9 Generador de electricidad para minieólica

Se denomina generador a un dispositivo que puede convertir energía mecánica en energía eléctrica a través de la inducción electromagnética, ocasionada por la diferencia de potencial entre los polos produciendo una variación de flujo debido al giro de una espira dentro de un campo magnético y por ende la generación de corriente eléctrica.

El generador eléctrico mecánicamente se acopla al rotor para convertir la energía mecánica en eléctrica y pueden ser asíncronos o síncronos, en el primer caso deben estar siempre conectados a la red o a una fuente de potencia reactiva que sirva de excitación, en tanto que en el segundo caso poseen excitación propia mediante electroimanes o imanes permanentes. [28]

### 2.2.9.1 Tipos de generadores

#### -Generador de Corriente Continua o Directa (CD)

En estos generadores el campo magnético está sobre el estator y la armadura está sobre el rotor, si una armadura gira entre dos polos de campos fijos, la corriente en la armadura se mueve en una dirección durante la mitad de cada revolución, y en la otra dirección durante la otra mitad.

Para producir un flujo constante de corriente en una dirección, o continua, en un aparato determinado, es necesario disponer de un medio para invertir el flujo de corriente fuera del generador una vez durante cada revolución. Toda la corriente generada debe pasar a través del conmutador y las escobillas. Un conmutador que está sobre el rotor lleva a cabo la rectificación de la potencia generada a corriente continua.

#### -Generador de Pasos

Son esencialmente las máquinas síncronas de diseño especial. La diferencia principal con las máquinas estándar, es que estos son construidos con un número suficiente de polos para que el rotor del generador pueda girar a la misma velocidad que el rotor de turbina de viento. Esto elimina la necesidad de una caja de cambio de velocidad. A causa del alto número de polos, el diámetro del generador es relativamente grande. Los generadores tipo tambor son frecuentemente usados en turbinas de viento, conjuntamente con los convertidores de electrónica de potencia. Esto proporciona alguna derivación en el voltaje y frecuencia para el requerimiento del generador en sí mismo. [28]

#### -Generador de Reluctancia Variable:

La máquina de reluctancia variable aplicada en modo generador en aerogeneradores presenta múltiples ventajas frente a los demás tipos de generadores, siempre que la operación del aerogenerador sea a velocidad variable. Esta máquina presenta una sencillez, robustez y bajo peso similar a la máquina de inducción de jaula de ardilla. Además, su control es simple, mediante el uso de electrónica de potencia y su rango de velocidades de operación puede ser grande sin ningún problema. Este tipo de

máquina se utiliza como motor en múltiples aplicaciones pero no como generador, debido probablemente al ruido que produce y a su bajo factor de potencia. [29]

#### -Generador de Imanes Permanentes

Un generador de imanes permanentes es un generador síncrono en el que se ha sustituido el bobinado de excitación, normalmente en el rotor, por un sistema formado por imanes permanentes que suministran un campo de excitación constante.

La excitación es constante por lo que al cargar el generador cae la tensión sin opción de regulación. La principal ventaja es su simplicidad. La fabricación y montaje del rotor es más barata si se usan imanes. No necesitan mantenimiento ya que no llevan escobillas. Además la consistencia mecánica es muy superior, aparte de no necesitar sistemas para su excitación. Al eliminar la excitación se puede llegar a ahorrar un 20% de energía simplemente por usar imanes. Por ser una fuente de energía independiente del generador, puede servir para suministrar energía a sistemas auxiliares del generador principal. [30]



**Fig. 13** Generador de imanes permanentes.

**Fuente:** [31]

#### **2.2.10 Regulador de carga**

Se utiliza para controlar los procesos de carga y descarga de la batería. Este elemento es el encargado de proteger la batería contra sobrecargas o contra sobredescargas excesivas que podrían resultar dañinas para la batería, acortando su vida útil. El modo de operación es bien sencillo: cuando el regulador detecta que la batería está siendo sobrecargada, desconecta el generador y cuando detecta que la batería está siendo sobredescargada, desconecta los consumos. [32]

### 2.2.11 Inversor

En los aerogeneradores de pequeña potencia son convertidores monofásicos que admiten un ancho rango de tensiones continuas de entrada, operan a alta frecuencia y su eficiencia es alta incluso a carga parcial. Transforma la electricidad almacenada en forma de corriente continua, en electricidad apta para uso doméstico con una frecuencia de hasta 60 Hz.

### 2.2.12 Baterías

Acumulan la electricidad producida por el aerogenerador y la extraen cuando el aerogenerador no está en funcionamiento [33]. Las baterías que más se utilizan en las aplicaciones eólicas son las de níquel-cadmio y las de plomo-ácido:

**Tabla 1** Características de las baterías.

	<b>Níquel-cadmio</b>	<b>Plomo-ácido</b>
<b>Ventajas</b>	Más fiables y resistentes	Son mucho más económicas.
	Soportan descargas de hasta el 90% de su capacidad teórica.	Idóneas para pequeñas instalaciones.
	Se recuperan totalmente. Aguantan bajas temperaturas. Soportan los cortocircuitos. Mínimo mantenimiento. No producen gases corrosivos.	La vida útil puede ser mucho más larga con el mantenimiento adecuado.
<b>Desventajas</b>	Son bastante más caras.	No admite muchos ciclos por debajo del 40% de su capacidad.
		Tiene un “efecto memoria”, puede que no se recuperen totalmente
		Los cortocircuitos afectan en el rendimiento.
		Necesitan un mayor mantenimiento.

**Fuente:** [16]

## **CAPÍTULO III. DISEÑO DEL PROYECTO**

### **3.1 Selección de alternativas**

Para desarrollar el diseño del aerogenerador se deben seguir una serie de pasos, que consisten en la elección de cada uno de los componentes, para lo cual se establece el tipo de rotor, la relación de velocidades de diseño TSR, el número de álabes, la selección del perfil aerodinámico, el material, el sistema de orientación, el tipo de torre, el generador, el inversor y las baterías.

#### **3.1.1 Tipo de rotor**

El aerogenerador utilizado es de eje horizontal. Este tipo presenta grandes ventajas entre las que se destacan que los extremos de la pala son variables, lo que da a las hojas el ángulo ideal para recoger la máxima cantidad de energía eólica, el mecanismo de transmisión es más simple y tiene un rendimiento más elevado que en un aerogenerador de eje vertical. Además, el generador está conectado muy cerca de los álabes, lo que amplía su eficacia y facilidad de construcción, permitiendo cubrir un amplio rango de aplicaciones aisladas de pequeña potencia hasta instalaciones en grandes parques eólicos. Por estos motivos en la industria de aerogeneradores los más utilizados son los de eje horizontal. [34]. Además, el movimiento rotacional producido es transmitido hasta un generador, que es el que se encarga de producir la energía eléctrica [35].

De acuerdo a la orientación del viento, el rotor diseñado es a barlovento, es decir se encontrará enfocado frente a la dirección del viento dominante.

#### **3.1.2 Relación de velocidades de diseño TSR**

La velocidad específica TSR (Teep Speed Ratio) ( $\lambda$ ) se utiliza para comparar el funcionamiento de máquinas eólicas diferentes, a velocidad específica.

En la práctica, es la relación entre la velocidad periférica del rotor medida en el extremo del álabe ( $u$ ) y la velocidad de viento ( $v$ ), y se constituye en un indicador de cuantas veces es más rápida una turbina con relación a la velocidad del viento.

La forma de determinar la relación de velocidades adecuada ( $\lambda$ ), es en función de que ésta proporciona coeficientes de potencia elevados.

El valor de la relación de velocidades de diseño ( $\lambda$ ), que varía entre 1 y 15, se obtiene de acuerdo al número de álabes del aerogenerador.

### **3.1.3 Número de álabes**

El diseño contempla el uso de tres álabes de tipo perfil aerodinámico. Se ha elegido este número de álabes porque presenta como principal ventaja un giro suave y uniforme, además un torque apropiado para el funcionamiento del generador, también con éste número de álabes la presencia de vibraciones o movimientos bruscos es muy limitada, los aerogeneradores tienen número impar de palas para minimizar las cargas cíclicas y la fatiga de los materiales, además los sistemas tri-pala se han demostrado como la solución más estable y equilibrada desde el punto de vista dinámico, mucho más que los monopalas o los bipalas y económicamente más eficaz que los sistemas con mayor número de palas.

### **3.1.4 Selección del perfil aerodinámico**

Los más utilizados en la generación eólica son los perfiles NACA de 4 cifras.

Dentro de los perfiles NACA de 4 cifras existen básicamente 3 familias que se emplean en aerogeneradores. Éstos deben tener una aerodinámica.

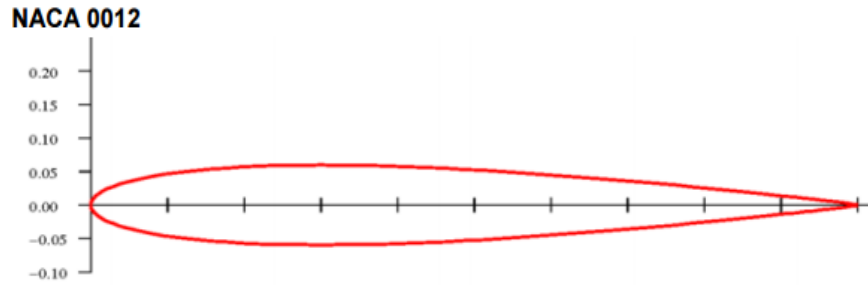
Perfiles de la serie cuatro dígitos tienen por defecto un valor máximo de espesor del 30% de la cuerda. [36]

Primer dígito describe la curvatura máxima como porcentaje de la cuerda (%  $c$ ).

Segundo dígito describe la distancia de máxima curvatura desde el borde de ataque en 1/10 del porcentaje de la cuerda.

Dos últimos dígitos describen el máximo espesor como % de la cuerda.

Los perfiles 00XX, especialmente el 0015 que tienen un perfil totalmente simétrico pero que se han destinado básicamente a aerogeneradores de eje vertical.

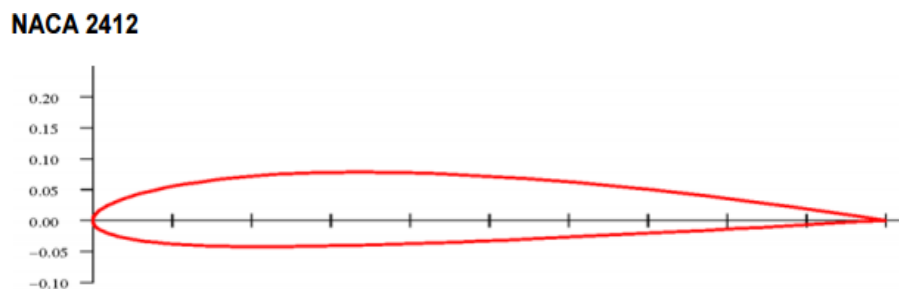


**Fig. 14** Perfil NACA 0012.

Fuente: [37]

Los perfiles NACA-4 cifras del tipo 24XX. Estos perfiles son muy versátiles y son utilizados para diferentes utilidades, su Reynolds de trabajo es bajo y el  $CL/CD$  es bueno.

Al no presentar caras convexas, le hace un candidato para que la fabricación sea sencilla.



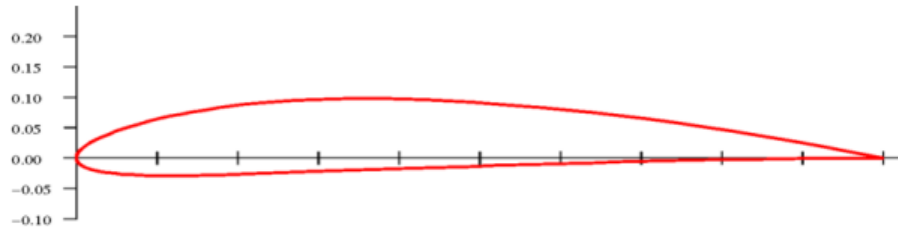
**Fig. 15** Perfil NACA 2412.

Fuente: [37]

Los perfiles NACA-4 cifras son las 44XX. Son muy utilizados en mini-aerogeneradores debido a su elevado  $CL/CD$ , por lo tanto son una buena alternativa. Pero el diseño de su perfil cóncavo hace que la fabricación de este perfil sea más costosa. [37]



**NACA 4412**



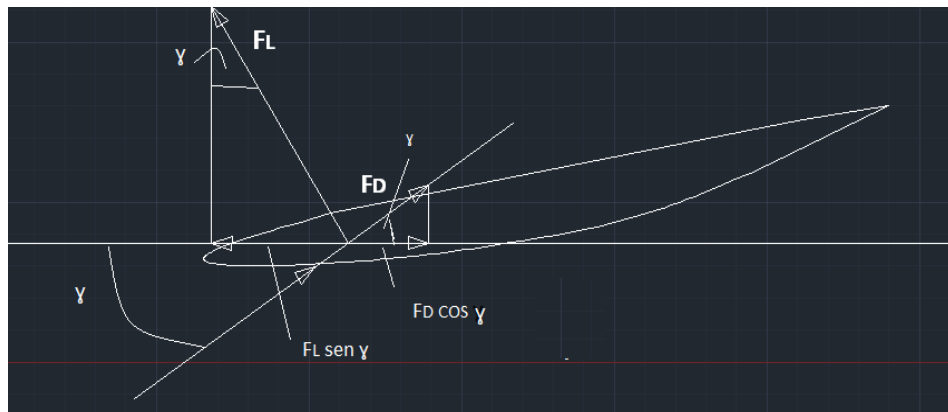
**Fig. 16** Perfil NACA 4412.

**Fuente:** [37]

Se escogió el perfil NACA 4412 ya que son muy usados en aerogeneradores, es uno de los mejores de los NACA de 4 cifras, con un número de Reynolds de 500000, este perfil presenta un elevado coeficiente de sustentación, necesario para garantizar una velocidad de rotación alta del rotor.

### 3.1.5 Fuerzas que actúan sobre el alabe y rotor

La fuerza de sustentación  $F_L$  tiene por definición dirección perpendicular a la dirección de la velocidad relativa del viento, mientras la fuerza de resistencia permanece en dirección paralela a la velocidad relativa del aire.



**Fig. 17** Fuerzas en perfil.

**Fuente:** [38]

En condiciones de relación constante se tiene equilibrio entre la fuerza motriz ( $F_L \sin \gamma$ ) y la fuerza resistente ( $F_a \cos \gamma$ ) respectivamente.

### **3.1.6 Material de los álabes**

Las aspas deben ser fáciles de fabricar y tener una adecuada resistencia estructural, para resistir las altas cargas a que van a estar sometidas.

Para la fabricación es importante la selección de materiales, ya que la vida útil de los álabes y las propiedades estructurales dependen de los mismos. El material de los álabes debe responder a variaciones en la velocidad del viento. [39]

Los materiales usados para la fabricación de los álabes suelen ser madera, aluminio, acero y recientemente materiales compuestos, tales como: poliéster o resina epóxica reforzado con fibra de vidrio o de carbono.

Los álabes de aluminio y las aleaciones de acero son pesados y vulnerables a la fatiga. Estos materiales son, generalmente usados en turbinas muy pequeñas. Los álabes deben ser de bajo peso y tener un comportamiento mecánico adecuado durante su vida útil, siendo la madera y los materiales compuestos los que cumplen todos estos requisitos, por eso tienen mayor acogida.

Además se trabaja con materiales polímeros, plásticos, fibras y resinas, los cuales tienen buena resistencia a la fatiga, pero el costo es muy elevado, con peso ligero y la insensibilidad a la corrosión.

Las principales ventajas de la utilización de la madera radican en su amplia disponibilidad y los procesos de fabricación, que incluyen tareas de carpintería. Por esta razón, la madera presenta un costo relativamente accesible. Por otro lado, las propiedades de la madera favorecen su buen desempeño en el funcionamiento de los aerogeneradores, especialmente es de destacar su bajo peso.

Para el presente caso se ha considerado el uso de madera ya que es fácil de modelar, duradera, sencilla, ligera, barata, presenta una buena resistencia estructural y está disponible en el mercado. Además se puede conseguir en cualquier lugar de la serranía del Ecuador y lo más importante es que es considerada como renovable, en este sentido de acuerdo a investigaciones realizadas se requiere menos cantidad de energía para

generar productos de madera en comparación con otros materiales como plásticos, metales y otros. [40]

Para el álabe se utilizó como material madera de laurel, por tres razones principales: es relativamente fácil de moldear y pulir, está disponible en el Ecuador (sus plantaciones se encuentran en la Costa y Amazonía) y tiene bajo costo, las propiedades mecánicas se muestran a continuación. [41]

**Tabla 2** Propiedades mecánicas de madera Laurel.

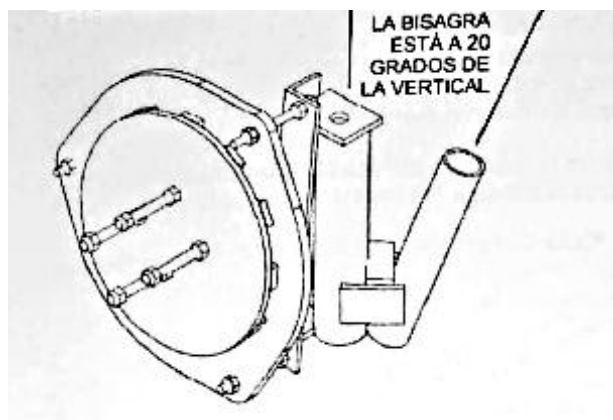
Módulo de elasticidad ( $N/m^2$ )	Módulo Cortante	Límite de Tracción ( $N/m^2$ )	Límite de Compresión ( $N/m^2$ )	Límite de elasticidad ( $N/m^2$ )	Coefficiente de Poisson	Densidad ( $kg/m^3$ )
$88,6 \cdot 10^8$	$71 \cdot 10^6$	$22,5 \cdot 10^6$	$31,8 \cdot 10^5$	$45,5 \cdot 10^6$	0,3	390

**Fuente:** [41]

### 3.1.7 Sistema de orientación

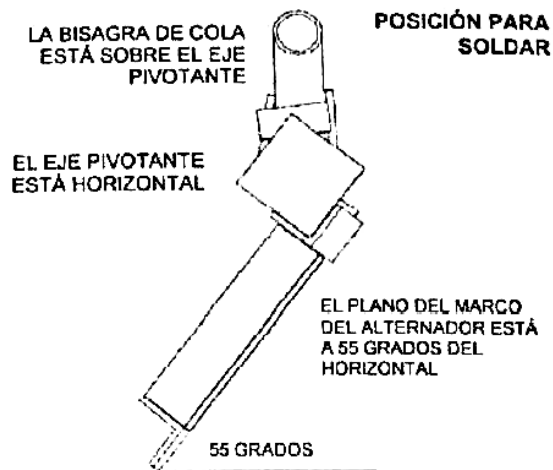
Para la selección del sistema de orientación se siguieron las indicaciones proporcionadas por Hugh Piggott [42]. Por lo tanto, desde la estructura del generador se adaptaron los siguientes elementos:

- 1.- Eje pivotante soldado a la estructura de generador.
- 2.- Bisagra a  $20^\circ$  de la vertical.



**Fig. 18** Vista frontal del aerogenerador.

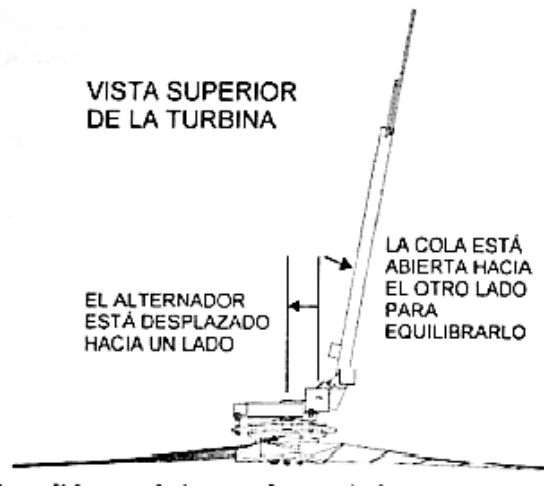
**Fuente:** [42]



**Fig. 19** Vista superior del aerogenerador.

**Fuente:** [42]

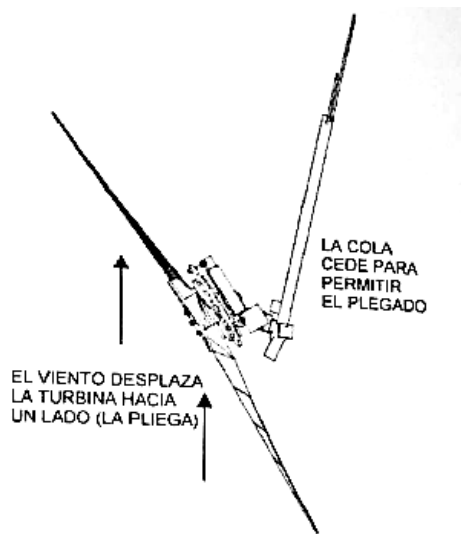
Con esta configuración lo que se pretende es crear el movimiento oscilante que tiende a ladear la turbina respecto al viento. En la Fig. 18 se puede observar que la bisagra está a  $20^\circ$  de la vertical para equilibrar la tendencia de la turbina de moverse junto con el generador por el peso esta bisagra ayuda a que la turbina esté perpendicular al viento.



**Fig. 20** Vista superior del aerogenerador.

**Fuente:** [42]

A medida que el viento se hace más fuerte aumenta la fuerza de empuje sobre la hélice, pero también sobre la cola, manteniendo así la turbina recta. En el caso de que se tengan vientos demasiado fuertes esta configuración hace que el generador se plegue para no sobrecargar el sistema. Como se muestra en la Fig. 21:



**Fig. 21** Vista superior del aerogenerador.

**Fuente:** [42]

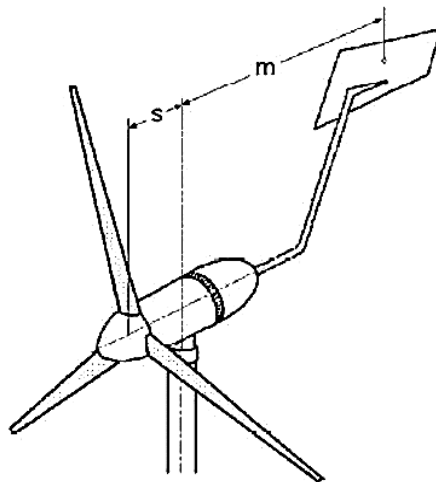
El plegado funciona bien para limitar la potencia y la velocidad siempre que la turbina esté conectada a las baterías [42]. Al plegarse la cola queda elevada como se muestra en la Fig.22.



**Fig. 22** Turbina plegada.

**Fuente:** [42]

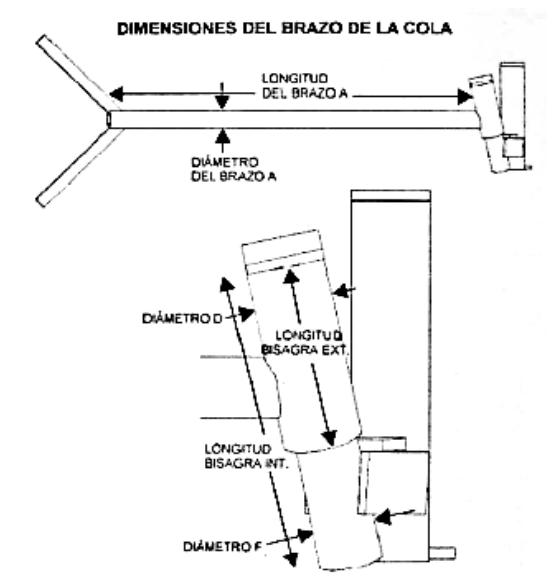
Cuando el diámetro de las palas es menor a 6 m, se recomienda que la distancia entre el eje de rotación de la góndola (s) y la ubicación de la veleta (m) sea de aproximadamente 4 veces la distancia entre el eje de rotación de la góndola y el plano del rotor ( $m = 4s$ ). Por otra parte, la superficie de la veleta tiene que ser aproximadamente el 4 % del área barridas por las palas, para el caso de los aerogeneradores compuestos por 3 palas [43].



**Fig. 23** Posición recomendada de la veleta.

Fuente: [43]

La cola es parte principal del sistema de orientación, se une a la bisagra inclinada mediante tubos que faciliten su libre desplazamiento.



**Fig. 24** Brazo de la cola del aerogenerador

Fuente: [42]

### 3.1.8 Tipo de torre de sustentación

Debido a las condiciones del lugar, que es de difícil acceso, se escoge una torre abatible como el tipo más idóneo para el presente caso.

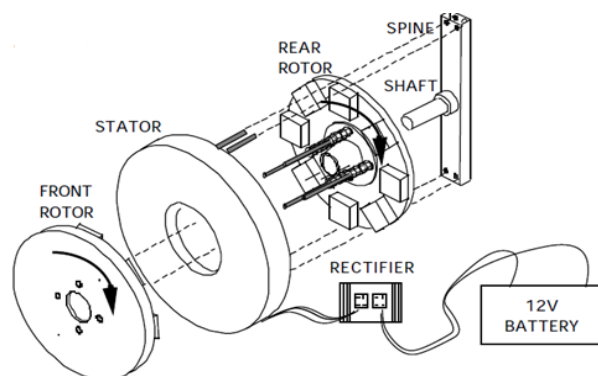
La función de la torre es mantener el aerogenerador a la altura indicada sobre el nivel del suelo, que es de 11 m., tolerando además el peso del aerogenerador y los fuertes vientos.

El diseño consiste en determinar además de la altura de la torre, el material y los detalles para su adecuada instalación. En cuanto al material, se utilizó un tubo de acero galvanizado ASTM A500 tipo B, cuyas especificaciones se presentan en el Anexo B. La mencionada torre se asienta en una base cuadrada y se ancla al piso mediante pernos de sujeción.

### 3.1.9 Tipo de generador

Para el presente proyecto se considera un generador de imanes permanentes de flujo axial para bajas velocidades, con un rotor de diámetro de 300 mm. Este tipo de generador es utilizado debido a que presenta facilidades en cuanto al costo de la energía producida, del tren de potencia y las pérdidas por conversión de potencia de acuerdo a Claudio [44]. Además, el generador de imanes permanentes produce un menor nivel de ruido en comparación con otros tipos, lo que es más confortable cuando el sistema abastece a viviendas localizadas en zonas pobladas. Otras características están asociadas a que se trabaja a bajas revoluciones y no requiere un sistema de multiplicación de velocidades para su funcionamiento, su diseño es compacto y fácil de instalar.

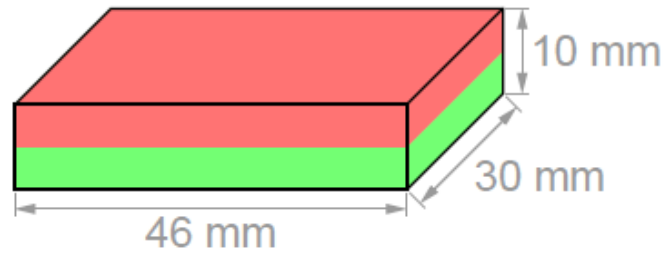
A partir del diseño realizado por Claudio [44] se consideraron los siguientes componentes para el generador:



**Fig. 25** Componentes del generador de flujo axial.

**Fuente:** [44].

Se seleccionaron imanes de neodimio grado 40 (N40) con las siguientes medidas:



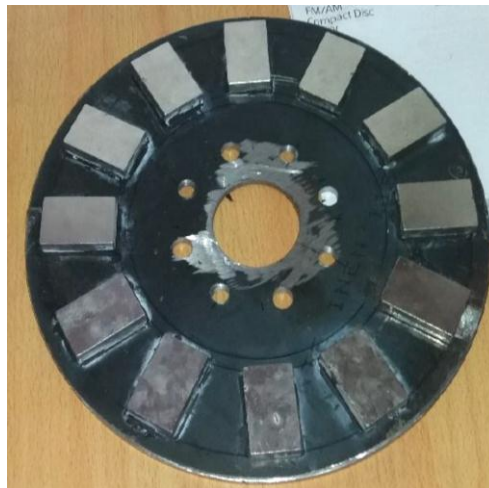
**Fig. 26** Dimensiones de los imanes seleccionados.

**Fuente:** [44].



**Fig. 27** Ubicación de las bobinas.

**Fuente:** [44].



**Fig. 28** Ubicación de los imanes.

**Fuente:** [44].



Las especificaciones del generador son las siguientes:

**Tabla 3** Especificaciones del generador.

<b>Criterio</b>	<b>Detalle</b>
Tipo de generador	De flujo axial
Número de rotores	2
Número de polos del rotor	24 (12 por cada rotor)
Número de bobinas del estator	9
Número de espiras por bobina	67
Tipo de conexión de las bobinas	En serie
Conductor para las bobinas	Alambre de cobre esmaltado AWG 14
Número de imanes	12
Diámetro de la isla	130 mm
Rodamiento	De rodillo cónico de doble hilera
Velocidad	44 – 450 rpm (según la velocidad de viento)
Potencia	1,62 – 273,8 W (según la velocidad de viento)
Intensidad de corriente	0,6 – 7,4 A (según la velocidad de viento)
Voltaje	2,7 – 37 V (según la velocidad de viento)
Resistencia	5 $\Omega$ o 10 $\Omega$
Eficiencia	Carga de 5 $\Omega$ : 50 - 70 % Carga de 10 $\Omega$ : 60 – 80 %

**Fuente:** [44].

### 3.1.10 Tipo de inversor

El inversor seleccionado se fundamenta en el estudio realizado por Guananga [45], en el cual se establecieron los siguientes parámetros:

El aerogenerador está destinado a uso doméstico con una corriente alterna de 110V. Por lo tanto se requiere el uso de un inversor de corriente continua DC a corriente alterna AC, el cual deberá dar una señal sinusoidal pura, de preferencia para aquellos electrodomésticos que precisan ondas limpias.

Las características técnicas requeridas son las siguientes:

Voltaje de entrada: 12V.

Voltaje de salida: 110V.

Frecuencia: 60 Hz.

Inversor de corriente: HURRICATE POWER SI 400.

Forma de onda: Sinusoidal modificada.

Capacidad nominal: 800W.

### **3.1.11 Tipo de baterías**

De manera similar, en el mismo estudio efectuado por Guananga [45] se establecieron las siguientes consideraciones de diseño para las baterías:

Las baterías deben ser de plomo ácido, ya que su costo es relativamente económico y no requieren mantenimiento. Por otra parte, se requiere que el suministro sea de corriente continua DC de 12V. La profundidad de las baterías se tiene que fijar en el 60% (la capacidad nominal del acumulador no supera el 60%), valor que es recomendable para ocasiones en las que las descargas tan profundas no son muy frecuentes.

El número de baterías a utilizarse depende de la capacidad nominal de cada batería, en el caso de emplearse baterías con capacidad nominal de 100 A.h, se requieren 2 baterías en paralelo.

Con base en los parámetros establecidos se tienen las siguientes características técnicas de la batería seleccionada:

Batería marca: RITAR tipo RA6-200D.

Voltaje: 6 V.

Corriente máxima de carga: 60 A.

Dimensiones: 322 x 177.5 x 226 mm.

Temperatura normal de operación: 25 °C.

Capacidades eléctricas: 10H 100 A.

Peso: 29 kg.

Para mayor detalle ver Anexo C.

### **3.2 Cálculos o modelo operativo**

Una vez establecidos los tipos de componentes a ser utilizados, se hace el dimensionamiento del sistema, para lo cual corresponde la realización de cálculos, con base en las definiciones teóricas de cada uno de los parámetros físicos involucrados en la aerodinámica de perfiles.

#### **3.2.1 Dimensionamiento del álabe**

Para el dimensionamiento se comenzará con las dimensiones características del álabe, en el cual se involucran varios parámetros de interés, como se detalla a continuación:

$P_u$  = Potencia útil

$n_g$  = Rendimiento del aerogenerador

$\rho$  = Densidad del aire

$\langle v^3 \rangle$  = Media del cubo de velocidades

$C_p$  = Coeficiente de potencia

##### **3.2.1.1 Potencia útil**

A partir de la investigación previa realizada por Naranjo [46], se obtuvieron los siguientes valores de energía requerida y de potencia útil para una vivienda ubicada en la Comunidad de Río Blanco.

De acuerdo al mismo autor, el valor de rpm calculadas es de 308,51, con un amperaje de 4,9 A, un voltaje de 24,2 V y una potencia útil de 118,58 W considerando 3 horas al día con esta velocidad de viento. La cantidad de energía con estas estimaciones es 355,74 Wh/día, suficiente para cubrir la necesidad energética diaria que será entregada por las baterías.

Para asegurar que el abastecimiento de energía efectiva sea superior a la energía requerida, se tomará un factor de seguridad de 1,5 tomando en cuenta las pérdidas que

se pueden producir en el aerogenerador; es decir, se sobredimensionará en un 50% la potencia útil de trabajo.

$$P_u = 118.58 \text{ W} \cdot 1,5$$

$$P_u = 178 \text{ W}$$

### 3.2.1.2 Relación de velocidades de diseño

La relación de velocidades de diseño ( $\lambda$ ) se escoge en función del número de álabes [38]. A partir de los datos de la Tabla 4 y con base en la selección de tres álabes  $B = 3$ , corresponde un valor de la velocidad de diseño igual a 7 ( $\lambda = 7$ ).

**Tabla 4** Velocidades de diseño según el número de álabes.

$\lambda$	Nº de palas
1	6 – 20
2	4 – 12
3	3 – 6
4	2 – 4
5 – 8	2 – 3
8 – 15	1 – 2

**Fuente:** [38]

### 3.2.1.3 Coeficiente de potencia

Se asume un valor de  $C_p = 0.42$  como parámetro base de diseño para un rotor de eje horizontal

### 3.2.1.4 Densidad del aire

Par calcular la densidad se consideran como referentes los valores de las Tabla 5:

**Tabla 5** Valores de la densidad del aire.

Altitud (metros)	Valores de la densidad del aire ambiente		
	Mínimo (kg/m <sup>3</sup> )	Promedio (kg/m <sup>3</sup> )	Máximo (kg/m <sup>3</sup> )
0	1,1405	1,2254	1,3167
305	1,1101	1,1886	1,2735
610	1,0812	1,1533	1,2302
914	1,0524	1,1197	1,2222
1000	1,0444	1,1101	1,1902
1219	1,0252	1,0861	1,1501
1524	0,9996	1,0556	1,1133
1829	0,9739	1,0236	1,0764
2000	0,9595	1,0076	1,0572
2134	0,9483	0,9931	1,0412
2438	0,9243	0,9643	1,0060
2743	0,8986	0,9355	0,9723
3000	0,8794	0,9115	0,9467
3048	0,8762	0,9082	0,9419

**Fuente:** [47]

La densidad promedio del aire a 4040 msnm., obtenida mediante extrapolación lineal es de 0,84 kg/m<sup>3</sup>.

### **3.2.1.5 Media del cubo de velocidades**

De acuerdo a un estudio preliminar realizado en el período octubre 2015 – enero 2016, en la Comunidad de Río Blanco se tiene una velocidad eficaz promedio de 6,47 m/s a 11 m. de altura [46].

Los datos a partir de los cuales se estableció la media se muestran en la Tabla 6:

**Tabla 6** Velocidades de diseño según el número de álabes.

Meses	Velocidad eficaz (m/s)
Octubre	5,86
Noviembre	6,39
Diciembre	7,17
Enero	5,87
Febrero	7,17
Marzo	6,43
Abril	6,46
Mayo	7,55
Junio	1,99
Julio	8,54
Agosto	7,52
Septiembre	6,64

**Fuente:** [46].

$$v^3 = (6,47)^3$$

$$v^3 = 270,84 \frac{m^3}{s^3}$$

### 3.2.1.6 Longitud del álabe

$$R = \left[ \frac{2 \cdot P_u}{\pi(n_m) (n_g) \cdot C_p \cdot \rho(v^3)} \right]^{0.5} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde:

R = radio (m)

C<sub>p</sub> = coeficiente de potencia.

P<sub>u</sub> = Potencia útil

η<sub>g</sub> = 0,7 como parámetro base de diseño.

η<sub>m</sub> = 1,0 debido a que el generador va conectado directamente al eje de la turbina por ser un generador de imanes permanentes.

C<sub>p</sub> = 0,42 como parámetro base de diseño para un rotor de eje horizontal.

ρ = 0,84 kg/m<sup>3</sup> Densidad media del aire en Río Blanco

$$\langle v^3 \rangle = 270,84 \frac{m^3}{s^3}$$

$$R = \left[ \frac{2(178)}{\pi(1)(0.7)(0,42)(0,84)(270,84)} \right]^{0.5}$$

$$R = \left[ \frac{356}{210,13} \right]^{0.5}$$

$$R = 1,30 \text{ m}$$

### 3.2.1.7 Longitud de la cuerda

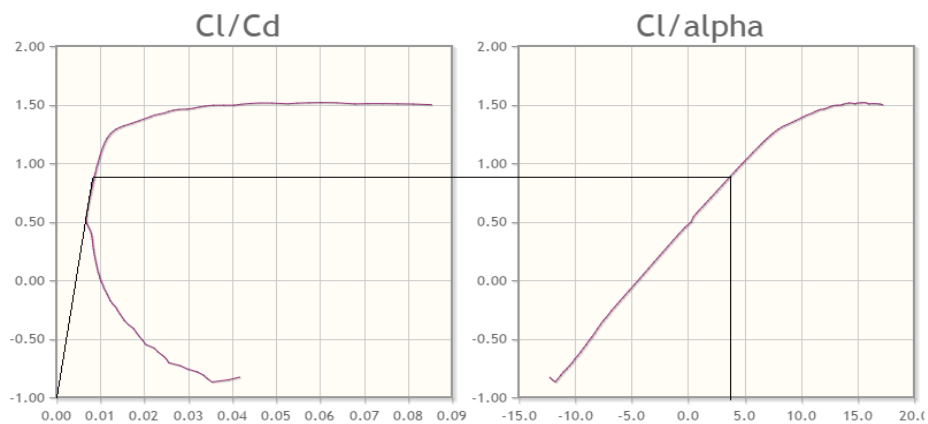
La manera de encontrar los valores óptimos de los coeficientes de arrastre ( $C_d$ ) y de sustentación ( $C_L$ ) de la curva polar es la siguiente:

En el esquema  $C_L - C_d$  partiendo del origen (punto 0), se traza una tangente a la curva, de cuyas proyecciones se tiene:

Proyección a la abscisa el valor de  $C_d$

Proyección a la ordenada el valor de  $C_L$

Si se proyecta en forma paralela y se corta la curva del plano  $\alpha - C_L$  en la proyección de  $\alpha$  se encuentra el ángulo de ataque óptimo para el diseño.



**Fig. 29** Ángulos de ataque para el diseño de los álabes.

**Fuente:** [37]

Coefficiente de sustentación  $C_L = 0.8$

Coefficiente de arrastre  $C_d = 0,008$

Ángulo de ataque  $\alpha = 4^\circ$

$$C_L = 0,8$$

$$C_D = 0,008$$

Relación mínima  $(C_D/C_L)_{\text{mín.}} = 0,01$  [48]

Con las fórmulas de  $\lambda_{ri}$ ,  $C$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  se confecciona la siguiente tabla de valores que determinan la geometría del álabe, es indispensable seleccionar un determinado número de radio total de la pala (recomendable de 10 secciones).

$C$  = Cuerda

$\beta$  = ángulo de curvatura

$\lambda_{ri}$  = relación de velocidades local.

$\gamma$  = ángulo de viento.

$\alpha$  = ángulo de ataque

El ángulo de curvatura de la pala se calcula de la expresión:

$$\beta = \gamma - \alpha \quad \text{Ec. 3.2}$$

Variando  $\gamma$  varía también  $\lambda$  y para mantener constante el ángulo de ataque  $\alpha$  se debe asumir valores pequeños de la relación  $C_d/C_L$ .

Es evidente por lo tanto que las hélices necesitan de un ángulo de curvatura variable del centro sobre la parte periférica y las hélices tienen siempre una curvatura.

Reemplazando con los datos obtenidos se tiene

$$\lambda_{ri} = \lambda \frac{r_i}{R} \quad \text{Ec. 3.3}$$

$$C = \left[ \frac{8 \cdot \pi \cdot r_i}{B \cdot C_L} \right] (1 - \cos \gamma) \quad \text{Ec. 3.4}$$

$$\gamma = \frac{2}{3} \arctg \left( \frac{1}{\lambda_r} \right) \quad \text{Ec. 3.5}$$



**Tabla 7** Valores para la geometría del álabe de las diez secciones.

SECCIÓN	$r_i$ (m)	$\lambda_{ri}$	$\gamma$ (°)	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$c$ (m)
1	0,13	0,7	36,672	4	32,672	0,269
2	0,26	1,4	23,692	4	19,692	0,229
3	0,39	2,1	16,976	4	12,976	0,178
4	0,52	2,8	13,103	4	9,103	0,142
5	0,65	3,5	10,630	4	6,630	0,117
6	0,78	4,2	8,928	4	4,928	0,099
7	0,91	4,9	7,690	4	3,690	0,086
8	1,04	5,6	6,750	4	2,750	0,075
9	1,17	6,3	6,013	4	2,013	0,067
10	1,30	7	5,420	4	1,420	0,061

Fuente: Autor

Características de las estaciones: 10 estaciones, distancia entre estaciones: 0,13 m.

Para obtener las coordenadas de las 10 estaciones o secciones, se debe calcular el producto de cada una de las cuerdas por las coordenadas del perfil en los ejes X e Y. Las coordenadas para el perfil NACA 4412 (Anexo A) son las que se muestran a continuación:

**Tabla 8** Valores obtenidos para la cuerda y ángulo de curvatura.

coor X	coor Y +	coor Y -
0	0	0
1,25	2,44	-1,43
2,5	3,39	-1,95
5	4,73	-2,49
7,5	5,76	-2,74
10	6,59	-2,86
15	7,89	-2,88
20	8,8	-2,74
25	9,41	-2,5
30	9,76	-2,26
40	9,8	-1,8
50	9,19	-1,4
60	8,14	-1
70	6,69	-0,65
80	4,89	-0,39
90	2,71	-0,22
95	1,47	-0,16
100	0,13	-0,13

Fuente: [49]

### 3.2.1.8 Linealización del álabe

La linealización del álabe y sus ángulos de posicionamiento facilita la construcción y optimiza los materiales sin que se tengan pérdidas de potencia, pues el 75% aproximadamente de la potencia se extrae de la mitad exterior del álabe, debido a que el área de captación varía con el cuadrado del radio, además la eficiencia de las palas es menor a menor radio, lo recomendable es linealizar los álaves entre los valores:

$$0,5 R \leq r_i \leq 0,9 R$$

**Tabla 9** Datos para la Linealización del álabe.

<b>r<sub>i</sub> (m)</b>	<b>C (m)</b>	<b>β (°)</b>
0,65	0,11	6,63
1,17	0,06	2,013

**Fuente:** [38]

Linealización de las cuerdas

$$C = a_1 r_i + a_2 \quad \text{Ec. 3.6}$$

Linealización de ángulos

$$\beta = a_3 r_i + a_4 \quad \text{Ec. 3.7}$$

Con los valores de cuerdas y ángulos para ( $r = 0,65$  y  $r = 1,17$ ), se encuentran las constantes de las ecuaciones de primer grado:

Cuerdas:

$$0,11 = a_1 (0,65) + a_2$$

$$0,06 = a_1 (1,17) + a_2$$

Ángulos:

$$6,63 = a_3 (0,65) + a_4$$

$$2,013 = a_3 (1,17) + a_4$$

Resolviendo se tiene lo siguiente:

$$a_1 = -0,09615$$

$$a_2 = 0,1725$$

$$a_3 = -8,87885$$

$$a_4 = 12,40125$$

Reemplazando la ecuación de la cuerda y el ángulo.

$$C = a_1 (r) + a_2$$

$$C = -0,09615 (r) + 0,1725$$

$$\beta = a_3 (r) + a_4$$

$$\beta = -8,87885 (r) + 12,40125$$

Calculando los valores de cuerdas y ángulos en los extremos del álabe se tiene:

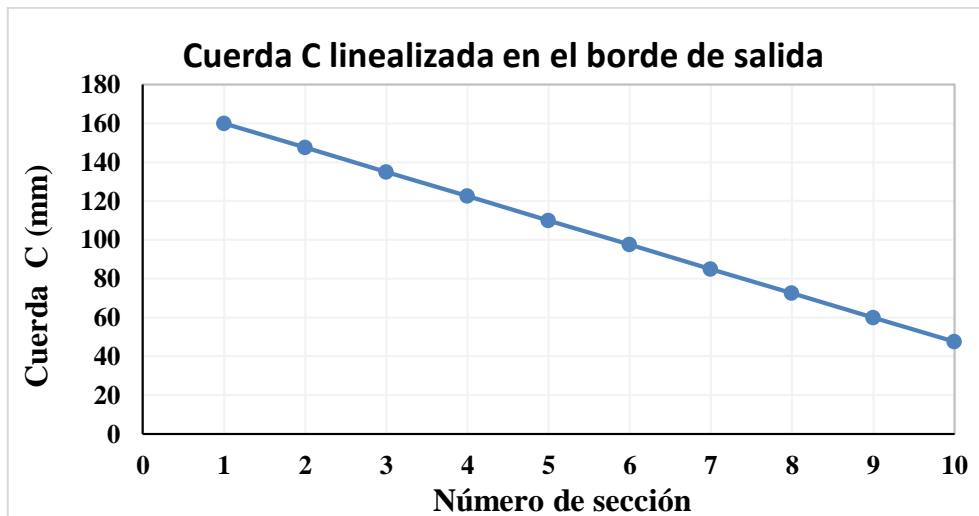
**Tabla 10** Valores linealizados obtenidos para la cuerda y ángulo de curvatura.

Sección	Longitud r del álabe (mm)	C (m)	$\beta$ (°)	C (mm)
1	130	0,160	11,25	160,00
2	260	0,148	10,09	147,50
3	390	0,135	8,94	135,00
4	520	0,123	7,78	122,50
5	650	0,110	6,63	110,00
6	780	0,097	5,48	97,50
7	910	0,085	4,32	85,00
8	1040	0,073	3,17	72,50
9	1170	0,060	2,01	60,00
10	1300	0,048	0,86	47,51

**Fuente:** Autor.

Una vez linealizado el perfil se obtiene las coordenadas en X e Y para las 10 secciones del álabe, mediante el producto de cada una de las cuerdas linealizadas por las coordenadas del perfil NACA 4412.

Para una mejor visualización, en la Fig. 30 se presenta el efecto de *linealización* del borde de salida:

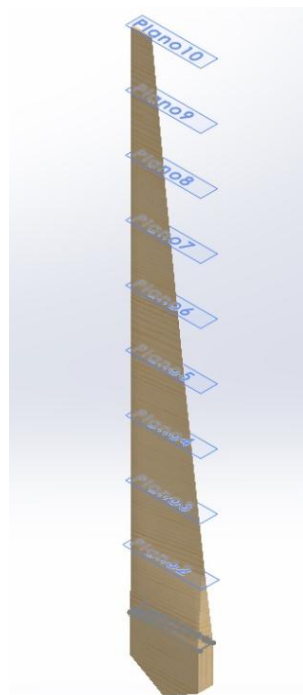


**Fig. 30** Cuerdas linealizadas en el borde de salida.

**Fuente:** Autor

### 3.2.1.9 Modelado del álabe en 3D

Como se aprecia en la Fig. 31, las cuerdas de las 10 secciones forman una línea recta, que va desde 160 mm en la sección 1 (inferior) hasta 47,51 mm en la sección 10 (superior). A partir de los datos para las 10 secciones se elaboró el álabe en un software de modelado 3D, como se muestra en la siguiente imagen:



**Fig. 31** Cuerdas linealizadas en el borde de salida.

**Fuente:** Autor

### 3.2.2 Diseño del sistema de orientación

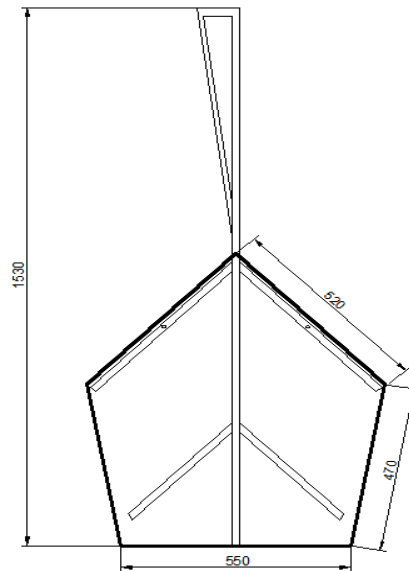
Conforme se indicó anteriormente (p. 31), la superficie de la veleta tiene que ser cercana al 4 % del área barrida por las palas, El área barrida es la siguiente:

$$A_{barrida} = \pi r^2 \quad \text{Ec. 3.8}$$

$$A_{barrida} = \pi (1,30)^2$$

$$A_{barrida} = 5,31 \text{ m}^2$$

Posteriormente se diseña la veleta de orientación, para lo cual se utilizó un software de diseño CAD, conforme se muestra en la figura 32:



**Fig. 32** Veleta de orientación.

**Fuente:** Autor

El área de la veleta de orientación corresponde a aquella que se obtiene a partir del pentágono irregular, cuyo valor es de  $0,4265 \text{ m}^2$ . Por lo tanto la relación del área de la veleta al área de barrido del álabe es la siguiente:

Datos:

$$A_{barrida} = 5,31 \text{ m}^2$$

$$A_{veleta} = 0,4265 \text{ m}^2 \text{ (obtenida mediante software CAD).}$$

Relación de áreas de la veleta con respecto al área barrida de los álabes:

$$\frac{A_{\text{veleta}}}{A_{\text{barrida}}} = \frac{0,4265 \text{ m}^2}{5,31 \text{ m}^2}$$

$$\frac{A_{\text{veleta}}}{A_{\text{barrida}}} = 0,08 = 8 \%$$

El área de la veleta es el 8 % del área de barrido de los álabes.

### 3.2.3 Diseño de la torre

El diseño escogido para la torre es de una torre tubular abatible con tensores, que presenta ventajas de construcción así como de la relación costo-beneficio, ya que se construyó con elementos que se encuentran fácilmente en el mercado local y su construcción no requiere de herramientas ni talleres especiales. El diámetro exterior de la torre es de 101,6 mm (tubería galvanizada de 4 pulgadas), con 4 tensores compuestos de cable de acero de 1/4 in de diámetro a una altura de 9 metros desde la base (se verificó gráficamente que no hay interferencias con las aspas). En la cima de la torre se encuentra el generador con 3 aspas y una veleta.

La torre en específico se basa en tres tramos de 3 metros y uno de dos metros unidos en forma de bocín entre sí con un pedazo de 33 centímetros del mismo material como se muestra en la figura 33. Dichos tramos embocinados se limitará el movimiento de rotación entre sí a través de dos tornillos en uno de sus costados.

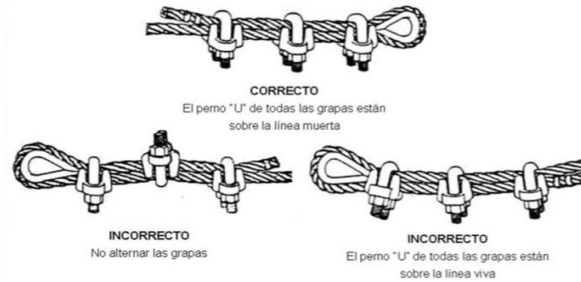


**Fig. 33** Unión en forma de bocín.

**Fuente:** Autor

Los cables de acero deben ser usados conjuntamente con grapas que irán de acuerdo al diámetro del cable y se asegurarán como se muestra a continuación.

Los cables de acero atados con pernos en U tendrán los pernos sobre el extremo muerto de la guaya y el extremo vivo descansará en la silla de la grapa:



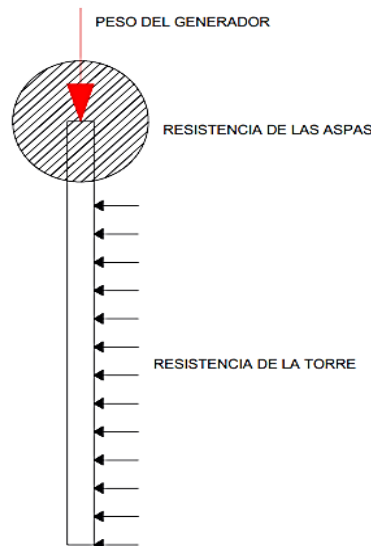
**Fig. 34** Cables de acero y pernos en U.

**Fuente:** [50]

Los tensores se anclan al piso a una profundidad de 1 metro, debido a las características del suelo no se requiere cimentaciones, ni bases de hormigón ni similares. Todo el diseño de la torre se puede montar y desmontar con facilidad sin necesidad de herramientas especializadas, razón por la cual de requerirse en un futuro la torre puede ser reubicada en otro lugar.

### 3.2.3.1 Determinación de las cargas

En la siguiente figura se muestran las cargas que actúan sobre la torre:



**Fig. 35** Cargas que actúan sobre la torre.

**Fuente:** Autor

### **Peso soportado por la torre**

La carga vertical soportada por la torre corresponde al peso del generador, sumado al peso de los álabes, al de los discos de soporte y al de la veleta. Esta carga está ubicada en la cima de la torre, el valor se calcula a continuación:

$$P = 37.3 \text{ kg} + 2 \text{ kg} + 2\text{kg} + 3,7 \text{ kg}$$

$$P = 45 \text{ kg} = 441 \text{ N}$$

### **Resistencia de las aspas**

Se considera la fuerza de oposición al paso del viento del área de barrido de las aspas para determinar esta carga se consideró la ecuación aerodinámica que propone [John D. Anderson]:

$$P = \frac{C_D \cdot \rho \cdot v^2}{2} \quad \text{Ec. 3.9}$$

Donde:

P = Presión de viento. (N/m<sup>2</sup>)

C<sub>D</sub> = Coeficiente aerodinámico de resistencia de avance. (Superficie plana 1,17. Esfera 0,5. Superficie aerodinámica 0,05)

ρ = Densidad del aire. (Kg/m<sup>3</sup>)

v = Velocidad del viento. (m/s)

Los datos son C<sub>D</sub> = 1,17 se considera una superficie de barrido plana, ρ = 0,84 kg/m<sup>3</sup> es la densidad del aire en el sector a instalar la torre, v= 11 m/s es el 70% extra de la velocidad de diseño la velocidad de diseño es 6,47 m/s.

$$P = \frac{(1,17) \cdot (0,84) \cdot (11)^2}{2}$$



$$P = 59,46 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Al aplicar la fórmula 3.9 se tiene una presión de viento  $P = 59,45 \text{ N/m}^2$ , este es el valor de la presión aplicada sobre el área de las aspas, para determinar la fuerza se aplica la expresión:

$$P = \frac{F}{A} \quad \text{Ec. 3.10}$$

Donde

$P$  = Presión de viento. ( $\text{N/m}^2$ )

$F$  = Fuerza (N) perpendicular al área de barrido

$A$  = área de barrido de los álabes ( $\text{m}^2$ )

$$F = P \cdot A$$

$$F = \left( 59,46 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right) \cdot (5,31 \text{ m}^2)$$

$$F = 315,73 \text{ N}$$

Despejando la fuerza y aplicando la fórmula se tiene  $F = 315,73 \text{ N}$ .

### **Resistencia de la torre**

Es la fuerza que genera el viento por la oposición de la torre a su paso, para determinar esta fuerza se consideró la ecuación 3.10 tomando en cuenta que el valor de  $C_D$  es superficie aerodinámica 0.05.

$$P = \left( 59,46 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right) \cdot (0,05)$$

$$P = 2,97 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

El perímetro de la torre que se sometido a la acción del viento se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Perímetro} = \pi \cdot D \quad \text{Ec.3.11}$$

$$\text{Perímetro} = \pi (0,1016 \text{ m})$$

$$\text{Perímetro} = 0,3191 \text{ m}$$

$$\frac{0,3192 \text{ m}}{2} = 0,1596 \text{ m}$$

$$A_{\text{(torre)}} = 0,1596 \text{ m} \cdot 11 \text{ m} = 1,75 \text{ m}^2$$

$$F = \left( 2,97 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right) \cdot (1,75 \text{ m}^2)$$

$$F = 5,2 \text{ N}$$

Utilizando el área de la torre, se obtuvo una fuerza de 5,2 N.

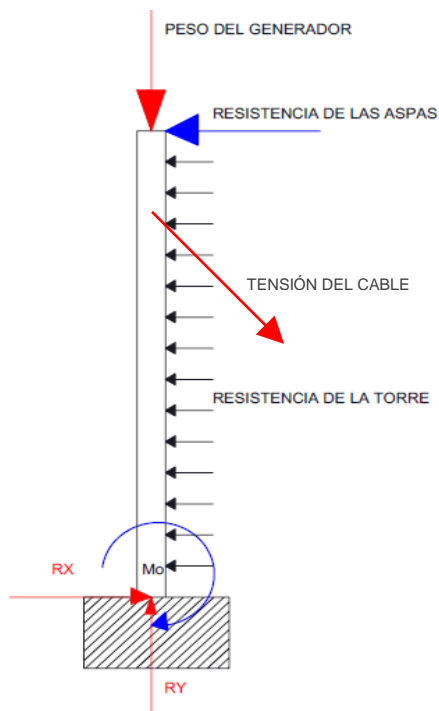
Esta carga no puede ser puntual, por lo tanto se la transforma a carga distribuida dividiendo la fuerza por la longitud, ya que la fuerza se distribuye a lo largo de toda la torre de longitud 11 m, la carga distribuida es la siguiente:

$$F_{dist} = \frac{5,2 \text{ N}}{11 \text{ m}}$$

$$F_{dist} = 0,47 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

### 3.2.3.2 Determinación de los esfuerzos

Se determinarán los esfuerzos con el análisis estático del sistema aplicando las cargas calculadas anteriormente.

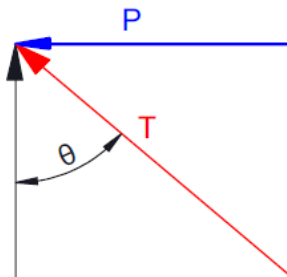


**Fig. 36** Diagrama de cuerpo libre con cargas y restricciones de movimiento.

**Fuente:** Autor

$$T_x = T \text{ sen } 30^\circ$$

$$T_y = T \text{ cos } 30^\circ$$



**Fig. 37** Cargas de resistencia y de tensión del cable.

**Fuente:** Autor

Se selecciona un ángulo de  $30^\circ$  y la altura del cable va a 9 m. Por lo tanto el cable tensor va a una distancia de 5,19 m sobre el piso y la longitud del cable de 10,39 m.

### Ecuaciones de equilibrio

$$\Sigma F_x = 0$$

$$R_x - R_{aspas} - R_{torre} + T_x = 0$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$R_y - P_{generador} - T_y = 0$$

$$\begin{aligned}
R_x - 315,73 \text{ N} - 5,2 \text{ N} + T_x &= 0 & R_y - 441 \text{ N} - T_y &= 0 \\
R_x + T_x &= 320,93 \text{ N} & R_y - T_y &= 441 \text{ N} \\
R_x + T \text{ sen } 30 &= 320,93 \text{ N} & R_y - T \cos 30 &= 441 \text{ N} \quad 2)
\end{aligned}$$

$$\Sigma M_o = 0$$

$$\begin{aligned}
11 \text{ m} (R_{aspas}) + 5,5 \text{ m} (R_{torre}) - 9 \text{ m} \cdot T_x - M_o &= 0 \\
11 \text{ m} (315,73 \text{ N}) + 5,5 \text{ m} (5,2 \text{ N}) - 9 \text{ m} \cdot T_x - M_o &= 0 \\
-9 \text{ m} \cdot T_x - M_o &= -3501,63 \text{ N} \cdot \text{m} \\
9 \text{ m} \cdot T_x + M_o &= 3501,63 \text{ N} \cdot \text{m} \\
9 \text{ m} \cdot T \text{ sen } 30 + M_o &= 3501,63 \text{ N} \cdot \text{m} \\
4,5 \text{ m} \cdot T + M_o &= 3501,63 \text{ N} \cdot \text{m} \quad 3)
\end{aligned}$$

$$\Sigma M_A = 0$$

$$\begin{aligned}
2 \text{ m} (R_{aspas}) - 3,5 \text{ m} (R_{torre}) + 9 \text{ m} \cdot R_x - M_o &= 0 \\
2 \text{ m} (315,73 \text{ N}) - 3,5 \text{ m} (5,2 \text{ N}) + 9 \text{ m} \cdot R_x - M_o &= 0 \\
9 \text{ m} \cdot R_x - M_o &= -613,26 \text{ N} \cdot \text{m} \quad 4)
\end{aligned}$$

Mediante resolución del sistema, a partir de las ecuaciones 1), 3) y 4) se tienen las siguientes soluciones:

$$R_x = 320,93 \text{ N}$$

$$T = 0$$

$$M_o = 3501,63 \text{ N} \cdot \text{m}$$

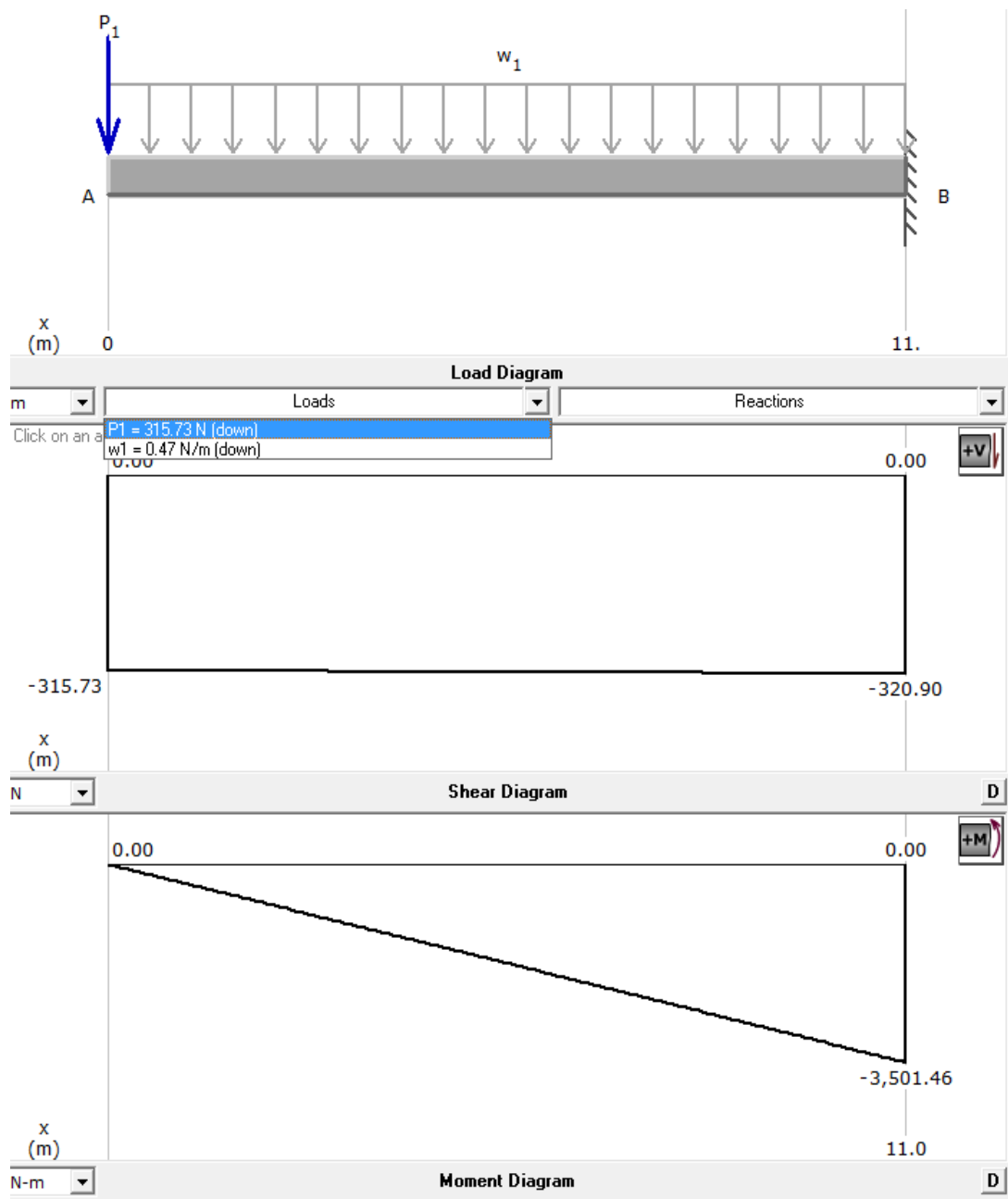
Reemplazando los valores calculados en la ecuación 2).

$$R_y - T \cos 30 = 441 \text{ N}$$

$$R_y - 0 \cdot \cos 30 = 441 \text{ N}$$

$$R_y = 441 \text{ N}$$

En el software de diseño MDSolids se realizó la configuración de las cargas en la torre, con el objeto de corroborar los valores calculados. A continuación se presenta una captura de pantalla de los resultados obtenidos:



**Fig. 38** Diagrama de fuerza cortante y momento flector.

**Fuente:** Autor

### Factor de seguridad de diseño

Al tratarse de un estudio con esfuerzos combinados [51] se aplica la siguiente fórmula:

$$\sigma = \frac{M}{S} + \frac{F}{A} \quad \text{Ec. 3.12}$$

Donde:

$\sigma$  = Esfuerzo real en la sección de la torre (Pa)

M = Momento en el punto de soporte de la torre (N·m)

S = Módulo de sección de la torre (m<sup>3</sup>)

F = Fuerza o carga axial sobre la sección de la torre (N)

A = Área de la sección transversal de la torre (m<sup>2</sup>)

Para el presente caso, utilizando la nomenclatura anterior se tiene la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{M_o}{S} + \frac{P_{\text{generador}}}{A} \quad \text{Ec. 3.13}$$

$$S = \frac{I}{c} = \frac{\pi \left( \frac{D^2}{2} - \frac{d^2}{2} \right)}{4 \frac{d}{2}} \quad \text{Ec. 3.14}$$

Donde:

S = Módulo de sección de la torre (m<sup>3</sup>)

I = Momento de inercia de área (m<sup>4</sup>)

c = Distancia del centro al diámetro interior

D = Diámetro exterior del tubo (m)

d = Diámetro interior del tubo (m)

De acuerdo a la teoría de falla de la energía de distorsión (ED) o también conocida como de Von Mises, utilizada para materiales dúctiles (en este caso el acero), la ecuación del coeficiente de seguridad [51] es la siguiente:

$$n = \frac{S_y}{\sigma} \quad \text{Ec. 3.15}$$

Donde:

$n$  = Coeficiente o factor de seguridad.

$S_y$  = Límite de fluencia del material (MPa)

$\sigma$  = Esfuerzo real en la sección de la torre (MPa)

A partir de los tubos de acero disponibles se calcula el esfuerzo real en la sección y el factor de seguridad, mediante utilización de las ecuaciones 3.13 a 3.15, conforme se detalla en la siguiente tabla:

**Tabla 11** Dimensiones de los tubos disponibles.

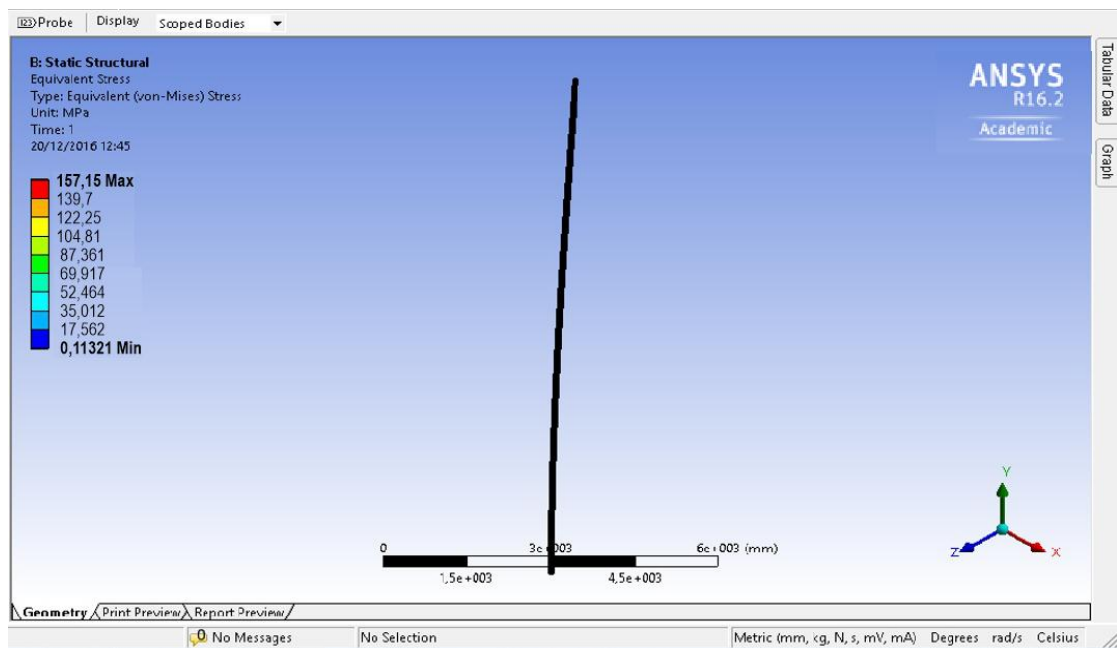
Tipo	Dimensiones		Módulo de sección	Área	Esfuerzo	Límite de fluencia	Coeficiente de seguridad
	D (m)	d (m)				S (m <sup>3</sup> )	A (m <sup>2</sup> )
<b>Tubería Galvanizada</b>							
4 pulgadas	0,1016	0,0956	2.365E-05	0,0009293	148,5	230	1,55
4,5 pulgadas	0,1043	0,1083	3.002E-05	0,0010490	117,02	230	1,97
5 pulgadas	0,127	0,121	3.715E-05	0,0011687	94,6	230	2,43
<b>Tubería cédula 40</b>							
4 pulgadas	0,1143	0,1023	5.869E-05	0,0020414	59,85	240	4,01
5 pulgadas	0,1413	0,1282	9.841E-05	0,0027728	35,72	240	6,72

**Fuente:** [52]

Para la tubería galvanizada según la NTE INEN 2415 el límite de fluencia mínimo para tubería estructural es 230 MPa y para tuberías de cédula 40 el material es acero ASTM A53 con un límite de fluencia de 240 MPa. Se elige la tubería de 4 pulgadas y espesor 3 mm de acero galvanizado, con la cual se garantiza la resistencia a las cargas y se previene el factor de corrosión. Para verificar el diseño se simulará la torre con las cargas y las especificaciones a continuación se observan los principales análisis:

### 3.2.3.3 Simulación de los esfuerzos

Para corroborar la resistencia de la torre a la aplicación de esfuerzos se utilizó el software de simulación CAE denominado ANSYS en versión Academic (estudiantil), mediante la teoría de comprobación de falla de Von Mises, donde el esfuerzo máximo es 157,15 MPa. Por lo tanto, en el caso de que llegue a este esfuerzo el material resistirá adecuadamente porque el esfuerzo máximo del material seleccionado para la torre es de 230 MPa. A continuación se muestra la imagen de los resultados:



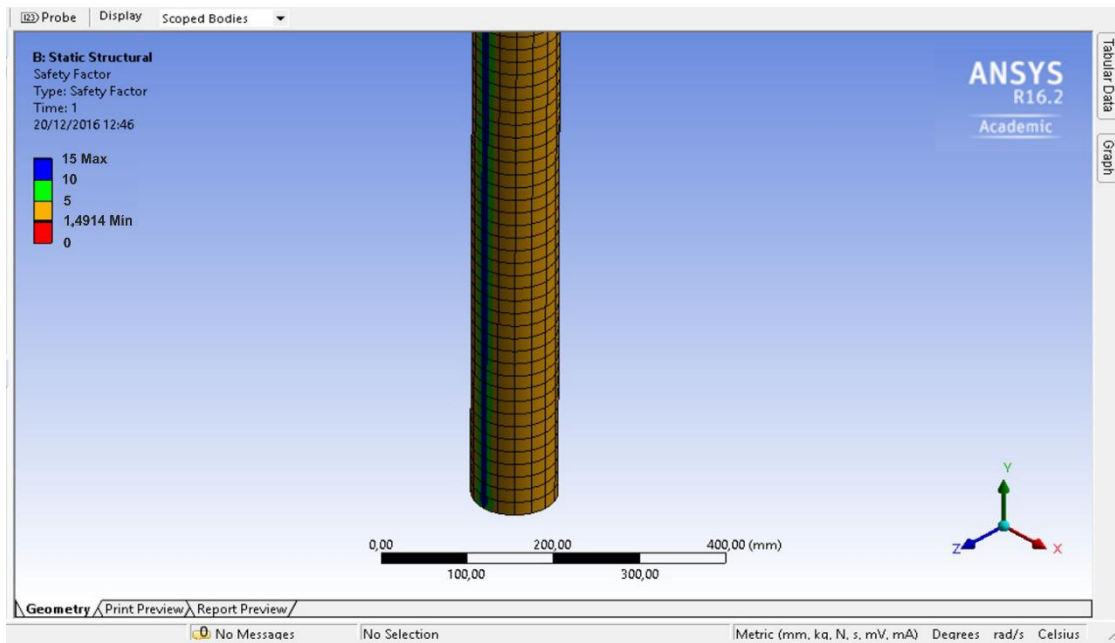
**Fig. 39** Simulación de esfuerzos.

**Fuente:** Autor

### 3.2.3.4 Factor de seguridad

En la siguiente imagen obtenida del software de simulación ANSYS Academic, se aprecia que el factor de seguridad mínimo, en toda la superficie de la torre del elemento diseñado es 1,4914 que es superior a 1, lo que implica que no se tendrá problemas de una posible falla como resultado de los esfuerzos a los que se encuentra sometido el elemento. En la figura 40 se observa la simulación correspondiente:

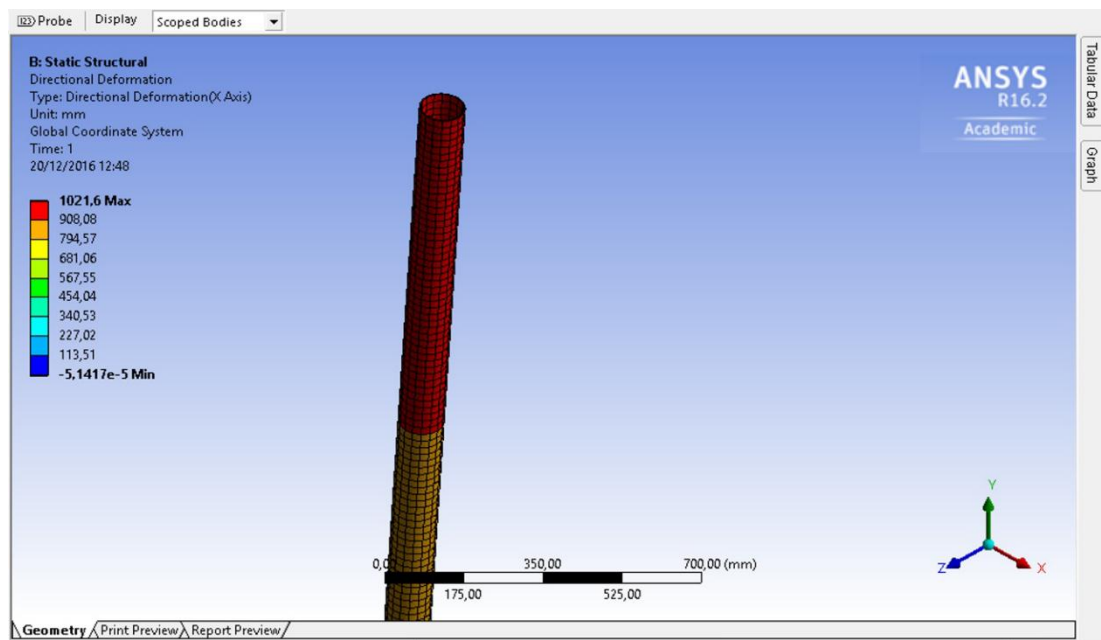




**Fig. 40** Factor de seguridad.

**Fuente:** Autor

### 3.2.3.5 Deformación

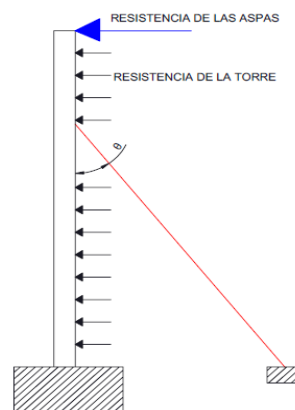


**Fig. 41** Deformación.

**Fuente:** Autor

### 3.2.3.6 Cables de sujeción

Como se puede comprobar en la figura 42, la deformación de la torre es excesiva, por lo tanto, es necesario ubicar cables tensores, generalmente con cuatro tensores se garantiza la estabilidad de la torre [42]. Además se considera que por la cambiante dirección del viento con los cuatro tensores se distribuirán mejor los esfuerzos en los cables. Para el diseño se considerará que un solo cable soporta toda la carga del viento con esto se dimensionará un cable capaz de soportar solo toda esta carga.



**Fig. 42** Cargas y tensor.

**Fuente:** Autor

En el momento de levantar y bajar la torre, se afloja el seguro de la base, con el objeto de permitir que la torre gire, por esta razón no se considera como un empotramiento y no existe momento en la base de la torre.



**Fig. 43** Diagrama de cuerpo libre con cargas y restricciones incluyendo el cable tensor.

**Fuente:** Autor

$$\begin{aligned} \Sigma F_x &= 0 & \Sigma F_y &= 0 \\ R_x - R_{aspas} - R_{torre} + T_x &= 0 & R_y - P_{generador} - T_y &= 0 \\ R_x - 315,73 \text{ N} - 5,2 \text{ N} + T_x &= 0 & R_y - 441 \text{ N} - T_y &= 0 \\ R_x + T_x &= 320,93 \text{ N} & R_y - T_y &= 441 \text{ N} \\ R_x + T \text{ sen } 30 &= 320,93 \text{ N} & R_y - T \text{ cos } 30 &= 441 \text{ N} \end{aligned} \quad \begin{matrix} 1) \\ 2) \end{matrix}$$

$$\Sigma M_o = 0$$

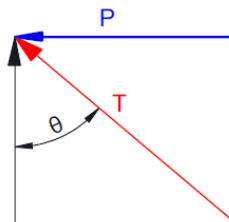
$$\begin{aligned} 11 \text{ m} (R_{aspas}) + 5,5 \text{ m} (R_{torre}) - 9 \text{ m} \cdot T_x &= 0 \\ 11 \text{ m} (315,73 \text{ N}) + 5,5 \text{ m} (5,2 \text{ N}) - 9 \text{ m} \cdot T_x &= 0 \\ -9 \text{ m} \cdot T_x &= -3501,63 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

$$T_x = \frac{3501,63 \text{ N} \cdot \text{m}}{9 \text{ m}}$$

$$T_x = 389,07 \text{ N}$$

La carga de la resistencia de la torre y la resistencia de las aspas se combinan para este diseño, se obtiene la carga P (389,07 N) y en función de esta carga se determinará la tensión del cable (T) y el ángulo de ubicación del tensor  $\theta$  la altura al ubicar el tensor es 9 metros con esto se evita el contacto de las aspas con el tensor y la excesiva deformación de la torre.

En la siguiente figura se esquematizan las cargas para la determinación de T y  $\theta$ .



**Fig. 44** Cargas de resistencia y de tensión del cable.

**Fuente:** Autor

Se tiene la siguiente tensión en el cable:

$$T_x = T \cdot \text{sen } 30$$

$$T = \frac{T_x}{\text{sen } 30}$$

$$T = \frac{389,07 \text{ N}}{\text{sen } 30}$$

$$T = 778,14 \text{ N}$$

$$\sigma = \frac{T}{A} \quad \text{Ec. 3.16}$$

En el catálogo del fabricante se debe seleccionar un diámetro del cable a partir del valor de la tensión calculada, como se muestra en la Tabla 12:

**Tabla 12** Cables disponibles tomando en cuenta el ángulo de ubicación.

Ángulo de ubicación	Tensión del cable	Diámetros disponibles	Área	Esfuerzo	Factor de seguridad
$\theta$ (grados)	T (N)	D (mm)	A(m <sup>2</sup> )	$\sigma$ (Mpa)	n
30	505.58	4,8	1,80956E-05	27,94	8.95
45	357.50	4,8	1,80956E-05	19,76	12.65
60	291.90	4,8	1,80956E-05	16,13	15.50
30	505.58	6	2,82744E-05	17,88	13.98
45	357.50	6	2,82744E-05	12,64	19.77
60	291.90	6	2,82744E-05	10,32	24.22
30	505.58	8	5,02656E-05	10,06	24.86
45	357.50	8	5,02656E-05	7,11	35.15
60	291.90	8	5,02656E-05	5,81	43.05
30	505.58	9	6,36174E-05	7,95	31.46
45	357.50	9	6,36174E-05	5,62	44.49
60	291.90	9	6,36174E-05	4,59	54.49
30	505.58	10	7,85400E-05	6,44	38.84
45	357.50	10	7,85400E-05	4,55	54.92
60	291.90	10	7,85400E-05	3,72	67.27

**Fuente:** [52]

Como se puede observar en la Tabla 12, de entre los cables disponibles se ha seleccionado un cable de 6 mm de espesor con un ángulo de 30°, obteniéndose un factor de seguridad de 13,98 respecto a la vertical de tubo como en las mostró en las figuras anteriores.

El cable seleccionado (Anexo D), que cumple con el requerimiento, tiene las siguientes características:

Denominación: 6x19S

Tipo: Cable de fuerza

Diámetro: ¼ plg (6,35 mm)

Alma: acero

Torones: 6

Hilos por torón: 19

#### **3.2.4 Sistema de contrapeso de la torre**

Como parte del protocolo de pruebas se estableció la necesidad de implementar un sistema de contrapeso para que la torre pueda ser levantada y bajada sin la necesidad de utilizar una grúa. El sistema está conformado por un tubo de contrapeso que contiene dos tubos embonados de 4 m de largo, los que se encuentran unidos al tubo base de la torre por cuatro abrazaderas grandes o grilletes. Para el anclaje se emplean cuatro estacas, una de las cuales contiene el contrapeso y con la finalidad de brindar un movimiento oscilatorio para subir y bajar la torre se dispone de dos pernos. El momento que se suelta el perno de abajo, el perno de arriba cumple la función de un eje que permite bajar a los dos lados la torre soltando dos estacas.

El sistema de contrapeso ayuda a bajar paulatinamente a la cadena que se encuentra en frente del mismo, mientras que los dos templadores restantes (cadenas de los costados) sirven para direccionar a la torre y evitar un desvío brusco de la misma. Conforme se va soltando la estaca frontal al tubo de contrapeso y va adoptando una posición horizontal, la torre empieza a bajarse y el contrapeso tiende a ubicarse en posición vertical. Este efecto es conocido como vela de barco la una cadena sube y la otra baja. Para elevar la torre el efecto es a la inversa. A continuación se muestra la torre levantada a través de este sistema:



**Fig. 45** Torre levantada con el sistema de contrapeso.

**Fuente:** Autor

### 3.3 Presupuesto

**Tabla 13** Costo total del proyecto.

Descripción	Costo (\$)
Materiales para álabes	100
Sistema de orientación	20
Materiales para torre	200
Sistema eléctrico	700
Accesorios	80
Mano de obra	250
Gastos varios	50
Instalación	50
Materiales de oficina	50
<b>TOTAL</b>	<b>1500</b>

**Fuente:** Autor.

### 3.4 Especificaciones técnicas

A continuación se presentan las características técnicas del aerogenerador de baja potencia para la Comunidad de Río Blanco, provincia de Tungurahua:

**Tabla 14** Especificaciones técnicas del aerogenerador.

Ítem	Detalle
Lugar de instalación	Comunidad de Río Blanco
Tipo de consumo	Doméstico para una vivienda
Tipo de aerogenerador	Eje horizontal a barlovento
Relación de velocidades de diseño ( $\lambda$ )	7
Perfil aerodinámico	NACA 4412
Número de álabes	3 (tripala)
Potencia útil	178 W (baja potencia)
Velocidad de diseño	12,63 m/s
Peso de los álabes (3)	2 kg.
Longitud R del álabe	1,30 m
Material de los álabes	Madera laurel
Sistema de orientación	Por veleta de cola
Tipo de torre de sustentación	Abatible
Dimensiones de la torre	Longitud 11 m. Diámetro 4 plg. Material ASTM A500 Gr. B Galvanizado Incluye cuatro cables tensores 6mm
Tipo de generador	De imanes permanentes de flujo axial para bajas velocidades
Tipo de baterías	Baterías de ciclo profundo de plomo ácido Modelo RA6-200D Voltaje 12 V Dimensiones: 322 x 177.5 x 226 mm Peso 29 kg.
Tipo de inversor de voltaje	Inversor de onda sinusoidal pura Voltaje de entrada 12 V DC Voltaje de salida 110 V AC Frecuencia 60 Hz Dimensiones: 230 x 97 x 56 mm

**Fuente:** Autor

### 3.5 Protocolo de pruebas y resultados

Una vez instalado el aerogenerador en un espacio abierto localizado en la comunidad de Río Blanco del cantón Ambato, en la provincia de Tungurahua, se procedió a efectuar las pruebas de funcionamiento, orientadas a medir la tensión eléctrica o voltaje en el controlador MORNINGSTAR TS-45 (Anexo E). El voltaje de operación requerido es cercano a 12 V, por lo cual es necesario comprobar si los datos obtenidos se encuentran en dicho valor, o cercano al mismo con un pequeño margen de tolerancia. El funcionamiento del aerogenerador en un día regular de operación tiene lugar entre las 6h30 y las 19h30, que es el lapso en el que existe potencial eólico aprovechable.

El controlador MORNINGSTAR TS-45 tiene la capacidad de realizar una adquisición de datos de voltaje y mediante el uso del software MSView, se pueden obtener todos y cada uno de los valores en voltios. El intervalo de tiempo de los datos se configuró en 15 minutos, con el objeto de evaluar la variación que se presenta.

Las pruebas se realizaron durante cinco días, a partir del viernes 28 de julio hasta el viernes 04 de agosto de 2017, en el horario comprendido entre las 09h00 y 17h30. Las imágenes de la instalación se muestran en el Anexo F. Los datos obtenidos durante la primera prueba de funcionamiento efectuada el día viernes 28 de julio de 2017 se presentan en detalle en la Tabla 15:

**Tabla 15** Tensión entregada a la red eléctrica por el aerogenerador. Prueba 1.

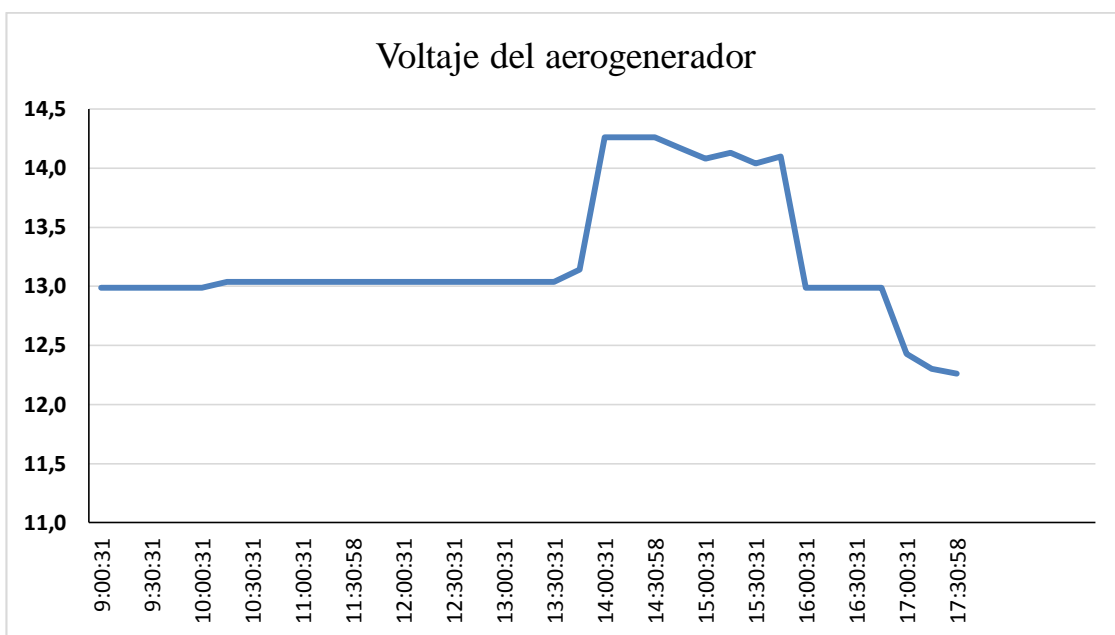
Fecha	Hora	Voltaje del aerogenerador (V)
2017/07/28	09:00:31	12,99
2017/07/28	09:15:31	12,99
2017/07/28	09:30:31	12,99
2017/07/28	09:45:31	12,99
2017/07/28	10:00:31	12,99
2017/07/28	10:15:31	13,04
2017/07/28	10:30:31	13,04
2017/07/28	10:45:31	13,04
2017/07/28	11:00:31	13,04



Fecha	Hora	Voltaje del aerogenerador (V)
2017/07/28	11:15:58	13,04
2017/07/28	11:30:58	13,04
2017/07/28	11:45:58	13,04
2017/07/28	12:00:31	13,04
2017/07/28	12:15:31	13,04
2017/07/28	12:30:31	13,04
2017/07/28	12:45:31	13,04
2017/07/28	13:00:31	13,04
2017/07/28	13:15:31	13,04
2017/07/28	13:30:31	13,04
2017/07/28	13:45:31	13,14
2017/07/28	14:00:31	14,26
2017/07/28	14:15:58	14,26
2017/07/28	14:30:58	14,26
2017/07/28	14:45:58	14,17
2017/07/28	15:00:31	14,08
2017/07/28	15:15:31	14,13
2017/07/28	15:30:31	14,04
2017/07/28	15:45:31	14,10
2017/07/28	16:00:31	12,99
2017/07/28	16:15:31	12,99
2017/07/28	16:30:31	12,99
2017/07/28	16:45:31	12,99
2017/07/28	17:00:31	12,43
2017/07/28	17:15:58	12,30
2017/07/28	17:30:58	12,26

**Fuente:** Autor

A partir de los datos mostrados en la tabla anterior se obtiene una gráfica, que permite visualizar de mejor manera el comportamiento de la tensión en función del tiempo, como se muestra en la siguiente figura:



**Fig. 46** Voltaje de operación entregado por el aerogenerador.

**Fuente:** Autor

En la figura 46, se observa que el voltaje de la batería tiene un valor mínimo de 12,26 V y su pico máximo es de 14,26 V. Es decir que, el aerogenerador opera de forma estable, dado que la tensión es casi constante. Consecuentemente, se puede establecer que el sistema tiene un funcionamiento satisfactorio.

La segunda prueba se desarrolló el día lunes 31 de julio de 2017, en horario matutino, con el objeto de aportar con más datos que corroboren los valores iniciales obtenidos. Los datos de la segunda prueba realizada se muestran en la Tabla 16:

**Tabla 16** Tensión entregada a la red eléctrica por el aerogenerador. Prueba 2.

Fecha	Hora	Voltaje del aerogenerador (V)
2017/07/31	9:21:32	12.33
2017/07/31	9:36:32	12.31
2017/07/31	9:51:32	12.33
2017/07/31	10:06:32	12.47
2017/07/31	10:21:32	12.52
2017/07/31	10:36:32	12.56
2017/07/31	10:51:32	12.60
2017/07/31	11:06:32	12.68

Fecha	Hora	Voltaje del aerogenerador (V)
2017/07/31	11:21:32	12.72
2017/07/31	11:36:32	12.89
2017/07/31	11:51:32	12.88
2017/07/31	12:06:32	12.88

**Fuente:** Autor

La tercera prueba se desarrolló el día martes 01 de agosto de 2017, en horario matutino, con el objeto de aportar con más datos que corroboren los valores iniciales obtenidos.

Los datos de la tercera prueba realizada se muestran en la Tabla 17:

**Tabla 17** Tensión entregada a la red eléctrica por el aerogenerador. Prueba 3.

Fecha	Hora	Voltaje del aerogenerador (V)
2017/08/01	10:35:51	12.21
2017/08/01	10:50:51	12.21
2017/08/01	11:05:51	12.24
2017/08/01	11:20:51	12.25
2017/08/01	11:35:51	12.27
2017/08/01	11:50:51	12.30
2017/08/01	12:05:51	12.30
2017/08/01	12:20:51	12.26
2017/08/01	12:35:51	12.26
2017/08/01	12:50:51	12.30
2017/08/01	13:05:51	12.43
2017/08/01	13:20:51	12.74
2017/08/01	13:35:51	12.92

**Fuente:** Autor

La cuarta prueba se desarrolló el día jueves 03 de agosto de 2017, en horario de la tarde, con la finalidad de aportar con más datos que corroboren los valores anteriores.

Los datos de la cuarta prueba realizada se muestran en la Tabla 18:

**Tabla 18** Tensión entregada a la red eléctrica por el aerogenerador. Prueba 4.

Fecha	Hora	Voltaje del aerogenerador (V)
2017/08/03	14:07:24	12.14
2017/08/03	14:22:24	12.15
2017/08/03	14:37:24	12.18
2017/08/03	14:52:24	12.23
2017/08/03	15:07:24	12.58
2017/08/03	15:22:24	12.84
2017/08/03	15:37:24	12.96
2017/08/03	15:52:24	13.04
2017/08/03	16:07:24	13.04
2017/08/03	16:22:24	12.59
2017/08/03	16:37:24	12.47
2017/08/03	16:52:24	12.40
2017/08/03	17:07:24	12.40

**Fuente:** Autor

La quinta y última prueba se desarrolló el día viernes 04 de agosto de 2017, en horario de la tarde, con la finalidad de aportar con más datos que corroboren los valores anteriores. Los datos de la quinta prueba realizada se muestran en la Tabla 19:

**Tabla 19** Tensión entregada a la red eléctrica por el aerogenerador. Prueba 5.

Fecha	Hora	Voltaje del aerogenerador (V)
2017/08/04	14:28:58	11.72
2017/08/04	14:43:58	11.74
2017/08/04	14:58:58	11.79
2017/08/04	15:13:58	11.86
2017/08/04	15:28:58	12.04
2017/08/04	15:43:58	12.24
2017/08/04	15:58:58	12.28
2017/08/04	16:13:58	12.35
2017/08/04	16:28:58	12.56
2017/08/04	16:43:58	12.50

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Voltaje del aerogenerador (V)</b>
2017/08/04	16:58:58	12.35
2017/08/04	17:13:58	12.11
2017/08/04	17:28:58	12.04

**Fuente:** Autor

## CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- En el diseño del aerogenerador eólico para la Comunidad de Río Blanco, se consideraron los siguientes parámetros: potencia útil de 178 W, velocidad de diseño 12,63 m/s y perfiles aerodinámicos NACA 4412 de tres palas.
- Con el objeto de que la energía obtenida mediante el funcionamiento de los álabes pueda ser utilizada para consumo doméstico en una vivienda, se incorpora un generador de imanes permanentes, una batería de plomo ácido y un inversor que convierte el voltaje de 12 V DC a 110 V AC.
- Los álabes están diseñados para operar a una altura de 11 m. mediante el empleo de una torre abatible, que consta de una sección circular de 4 pulgadas de diámetro y está soportada por cuatro cables tensores de acero de diámetro 6 mm, dos de los cables cumplen la función de elevar la torre y los dos restantes denominados templadores, permiten darle la orientación para asegurar un buen funcionamiento en caso de que la velocidad real exceda a la de diseño.
- En la base de la torre se incorpora un sistema de contrapeso, conformado por dos tubos embonados de 4 m de largo, que permiten elevar el aerogenerador acoplado a la torre de forma progresiva y segura hasta la posición vertical, uno de los tubos es desmontable. Esto permite que la torre pueda ser elevada y bajada en el momento deseado sin la necesidad de utilizar una grúa.

- El protocolo de pruebas de funcionamiento del aerogenerador determinó la necesidad de colocar la torre en un sitio completamente despejado y con base en la dirección del viento dominante, a una distancia de 20 m de la vivienda aproximadamente. En cuanto a la tensión suministrada por el aerogenerador al inversor de corriente, su valor oscila entre 11.72 y 14.26 VDC, lo que permite que la tensión de salida hacia la vivienda sea 110 VAC sin mayor dificultad.

## **4.2 Recomendaciones**

- Identificar correctamente la dirección del viento dominante en la Comunidad de Río Blanco, con el objeto de asegurar que el sistema se enfoque frente a la dirección del viento dominante.
- Comprobar que los cables tensores sujeten firmemente la torre y el aerogenerador, con el objeto de estabilizar el sistema, tomando en cuenta las vibraciones y movimientos provocados por la magnitud del viento.
- Los cables de salida del generador se deben colocar interiormente a la torre, con el fin de permitir la libertad de movimiento.
- Se sugiere almacenar el tubo desmontable del sistema de contrapeso en el interior de la vivienda, para evitar que se pueda extraviar.
- Las instituciones de educación superior del país deben impulsar la creación de otros tipos de sistemas eólicos, como por ejemplo de eje vertical, para contrastar su eficiencia con respecto a los de eje horizontal.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Gimenez y J. Gómez, «Generación eólica empleando distintos tipos de generadores considerando su impacto en el sistema de potencia,» *Dyna*, vol. 78, n° 169, pp. 95-104, Octubre 2011.
- [2] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, Proyectos de Energía Renovable Descentralizados y Potencial de su Integración a la Red en Ecuador, L. Manzano, Ed., Quito: Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2015.
- [3] ARCONEL, Estadísticas del sector eléctrico ecuatoriano, Quito: Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2014.
- [4] C. E. GENSUR, «celec.gob.ec/gensur,» CELEC EP, Noviembre 2016. [En línea]. Available: <https://www.celec.gob.ec/gensur/index.php/cev/central-eolica-villonaco-en-cifras-2>.
- [5] C. Orbegozo y R. Arivilca, Energía eólica. Manual técnico para pequeñas instalaciones, Green Energy Consultoría y Servicios SRL, 2010.
- [6] L. Fernández y R. Sánchez, La microeólica y sus potencialidades. Proyecto de medición de potencial en la Facultad de Ingeniería Química, Guayaquil: Universidad de Guayaquil, 2016.
- [7] A. Guananga, Sistema de bombeo eólico con el fin de satisfacer las necesidades de irrigación agrícola en la parroquia García Moreno, Ambato: UTA, 2013.
- [8] E. Punina, Interviewee, *Entevisita de beneficiaria del proyecto de aerogenerador*. [Entrevista]. 18 Noviembre 2016.
- [9] M. Villarubia, "Energía Eólica" en Energías Alternativas y Medio Ambiente, 2007.
- [10] F. R. Molina y L. A. Pacheco, Construcción de un generador eólico de bajas revoluciones para la escuela fiscal mixta Portoviejo ubicada en el sector de Cuchitingue, parroquia Aláquez, cantón Latacunga, Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi. Carrera de Ingeniería Electromecánica, 2014.
- [11] H. Espinoza Román, Elaboración de un modelo CFD de un generador eléctrico y validación experimental, Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral. Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, 2008.



- [12] L. Endara y P. Toctaguano, Construcción de un generador eólico de bajas revoluciones por minuto para una vivienda rural, ubicada en el sector de Pansachí el morro perteneciente a la parroquia Mulaló del cantón Latacunga provincia de Cotopaxi, Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi. Carrera de Ingeniería Electromecánica, 2011.
- [13] ACCIONA, Energía eólica.
- [14] OPEXenergy Operación y Mantenimiento S.L., «Open Energy,» 2015. [En línea]. Available: [http://opex-energy.com/eolica/tipos\\_aerogeneradores.html](http://opex-energy.com/eolica/tipos_aerogeneradores.html). [Último acceso: 2016].
- [15] M. d. N. Iñigo, Triz aplicado a los sistemas de orientación en los aerogeneradores, 2005.
- [16] Universitas Miguel Hernández, «II Máster Energía Solar y Renovables. Módulo: Energía eólica Tema 5: Tipos de instalaciones,» 2012. [En línea]. Available: <http://docplayer.es/17082310-li-master-energia-solar-y-renovables-modulo-energia-eolica-tema-5-tipos-de-instalaciones.html>. [Último acceso: 2016].
- [17] Energía Doble Cero, «Componentes de un Aerogenerador,» [En línea]. Available: <http://energiadoblezero.com/energias-renovables/energia-eolica/componentes-de-un-aerogenerador>.
- [18] Alibaba.com, «Alibaba.com,» 2016. [En línea]. Available: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/hot-frp-small-wind-turbine-blades-manufacturer-300w-to-100kw-wind-power-low-noise-low-start-wind-speed-60275478500.html>. [Último acceso: 2016].
- [19] E. García y R. Cuba, Manual teórico de capacitación en energía eólica, Lima, 2005.
- [20] G. Pedroza, Perfiles Aerodinámicos, Guanajuato: Intsitutto Politécnico Nacional.Ingeniería en Aeronáutica, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería, 2013.
- [21] M. Á. Muñoz, «Principios Aerodinámicos del Avión - Aerodinámica,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.pasionporvolar.com/principios-aerodinamicos-del-avion-aerodinamica/>.

- [22] Perfiles NACA, «Perfiles NACA,» 2017. [En línea]. Available: <http://es.paperblog.com/perfiles-naca-2979201/>.
- [23] X. Van Vilchis, Perfiles NACA.
- [24] R. E. Wilson, P. Lissaman y S. N. Walker, Aerodynamic Performance of Wind Turbines, Corvallis, Oregón, 1976.
- [25] M. d. N. Iñigo, Triz aplicado a los sistemas de orientación en los aerogeneradores, 2005.
- [26] Danish Wind Industry Association, Torres de Aerogeneradores.
- [27] DNETN-MIEM, Sistemas eólicos pequeños para generación de electricidad conectados a la red eléctrica, Montevideo, 2015.
- [28] J. Cruz, Guía sobre Tecnología Minieólica, Madrid: Gráficas Arias Montano S.A., 2012, p. 32.
- [29] F. Gaona Hernández, Diseño y construcción de un aerogenerador eléctrico para un aerogenerador de baja Potencia, Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2010.
- [30] Obeki, Generadores de Imanes Permanentes.
- [31] D. Escáñez, Diseño y fabricación de los alabes de un micro-aerogenerador de baja potencia, Barcelona, 2013, p. 150.
- [32] M. Alonso Abella, Sistemas Fotovoltaicos, Master en Energías Renovables y Mercado Energético, CIEMAT.
- [33] La Casa Sostenible, Producción de Energía.
- [34] Energías Renovadas, Turbinas de eje horizontal, 2011.
- [35] C. Portocarrero, Diseño de una turbina Propeller utilizando plásticos reciclados reforzados con madera recuperada, P. U. C. d. Perú, Ed., Lima, 2012, pp. 13-20.
- [36] S. E. Roncero, Introducción a los Perfiles NACA, Departamento de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos, 2011.
- [37] Airfoil Tools, «Airfoil Tools,» 2017. [En línea]. Available: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca4415-il>. [Último acceso: 2017].

- [38] R. Santillán Heredia, Fuentes Renovables de Energía Eólica, vol. 1, ESPOCH, Ed., Riobamba, 1986.
- [39] P. Fernández, Energía Eólica, Santander, Cantabria, 2006.
- [40] Consejo Canadiense de Asuntos Forestales, Construcciones ecológicas y los beneficios de la madera, 2014.
- [41] M. Vinueza, Ficha Técnica N° 4: LAUREL, Ecuador Forestal, 2012.
- [42] H. Piggott, Manual de Autoconstrucción de Generadores Eólicos, 2009.
- [43] D. Díez, Energía eólica, Barcelona: Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética Universidad de Cantabria, 1993.
- [44] C. Claudio, Caracterización de un generador de flujo axial para aplicaciones en Energía Eólica, Ambato: Universidad Técnica de Ambato, 2016.
- [45] M. Guananga, Diseño y construcción de un sistema fotovoltaico de baja potencia en el sector Río Blanco perteneciente a la Comunidad Yatzaputzán, Ambato: Universidad Técnica de Ambato, 2016.
- [46] J. Naranjo, Determinación del Potencial Eólico en el sector de Río Blanco del Cantón Ambato Provincia de Tungurahua, Ambato: Universidad Técnica de Ambato, 2016.
- [47] R. Melones, «Deca Blogs Tesis,» 2015. [En línea]. Available: <http://blog.tenis.decatlon.es/altitud-temperatura-y-humedad-en-el-bote-de-la-pelota/>. [Último acceso: 2016].
- [48] Airfoil Tools, NACA 4412, 2016.
- [49] National Advisory Committee for Aeronautics, Summary of Airfoil Data, Washington D.C.: Reporte No.824, 1945, p. 101.
- [50] M. Márquez, Requerimientos internacionales para izamiento seguro de cargas, Caracas, 2012, p. 47.
- [51] R. Budynas y K. Nisbett, Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, 8 ed., México, D. F.: McGraw-Hill Interamericana, 2008, p. 1062.
- [52] Novacero, «Induferro B&B,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.induferro.com/index.php/902-cable-de-acero>. [Último acceso: 2017].

[53] D. Bazán, *Perfiles Aerodinámicos: Familias y Tipos*, Madrid, 2013.

# **ANEXOS**

ANEXO A:

Características y coeficientes de reacción de perfiles NACA

## NACA 4412

[Stations and ordinates given in percent of airfoil chord]

Upper surface		Lower surface	
Station	Ordinate	Station	Ordinate
0	0	0	0
1.25	2.44	1.25	-1.43
2.5	3.39	2.5	-1.95
5.0	4.73	5.0	-2.49
7.5	5.76	7.5	-2.74
10	6.59	10	-2.86
15	7.89	15	-2.88
20	8.80	20	-2.74
25	9.41	25	-2.50
30	9.78	30	-2.26
40	9.80	40	-1.80
50	9.19	50	-1.40
60	8.14	60	-1.00
70	6.69	70	-.65
80	4.89	80	-.39
90	2.71	90	-.22
95	1.47	95	-.16
100	(.13)	100	(-.13)
100	-----	100	0

L. E. radius: 1.58  
Slope of radius through L. E.: 0.20

Fuente: National Advisory Committee for Aeronautics, 1945 [49].

## ANEXO B:

### Especificaciones del Acero ASTM A500 Grado B

#### ASTM A500 Steel, grade B, shaped structural tubing

**Categories:** [Metal](#); [Ferrous Metal](#); [ASTM Steel](#); [Carbon Steel](#); [Low Carbon Steel](#)

**Material Notes:** The Cu content of 0.18% is a minimum content when copper steel is specified.

**Key Words:** copper steels, copper-steels, UNS K03000, ASTM A501

**Vendors:** [Click here](#) to view all available suppliers for this material.

Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	7.85 g/cc	0.284 lb/in <sup>3</sup>	Typical of ASTM Steel

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Tensile Strength, Ultimate	400 MPa	58000 psi	
Tensile Strength, Yield	315 MPa	45700 psi	
Elongation at Break	23.0 %	23.0 %	
Bulk Modulus	140 GPa	20300 ksi	Typical for steel
Shear Modulus	80.0 GPa	11600 ksi	Typical for steel

Material Components Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	<= 0.30 %	<= 0.30 %	
Copper, Cu	<= 0.18 %	<= 0.18 %	
Iron, Fe	99.0 %	99.0 %	
Phosphorous, P	<= 0.050 %	<= 0.050 %	
Sulfur, S	<= 0.0630 %	<= 0.0630 %	

**References** for this datasheet.

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's disclaimer and terms of use regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

MS500E / 13953

PERFIL CIRCULAR																
DIÁMETRO			INTERIOR d INT (cm)	ESPESOR		PESO P			ÁREA cm <sup>2</sup>	FLEXIÓN			MÓDULO PLÁSTICO Z cm <sup>3</sup>	TORSIÓN		UNIDAD DE EMPAQUE
NOMINAL PULG.	EXT. d (pulg)	EXT. d (cm)		PARED E (mm)	NEGRO (kg/m)	GALV. (kg/m)	MOMENTO INERCIA - I cm <sup>4</sup>	MÓDULO SECCIÓN - S cm <sup>3</sup>		RADIO DE GIRO - r cm	MOMENTO INERCIA - J cm <sup>4</sup>	MÓDULO ELÁSTICO - B cm <sup>3</sup>				
1/2	0,84	2,13	1,83	1,50	0,73	0,75	0,93	0,46	0,43	0,70	0,59	0,92	0,86	37		
3/4	1,05	2,67	2,27	2,00	1,22	1,27	1,55	1,19	0,89	0,88	1,22	2,38	1,78	37		
1	1,30	3,29	2,79	2,50	1,88	1,95	2,39	2,78	1,69	1,08	2,32	5,56	3,38	37		
	1,30	3,29	2,69	3,00	2,21	2,3	2,82	3,19	1,94	1,06	2,69	6,37	3,87			
1 1/4	1,66	4,22	3,72	2,50	2,45	2,55	3,12	6,17	2,92	1,41	3,95	12,33	5,85	19		
	1,66	4,22	3,62	3,00	2,90	2,96	3,70	7,16	3,39	1,39	4,63	14,32	6,78			
1 1/2	1,90	4,83	4,53	1,50	1,73	1,86	2,20	6,03	2,50	1,66	3,28	12,06	5,00			
	1,90	4,83	4,43	2,00	2,28	2,45	2,91	7,81	3,23	1,64	4,29	15,62	6,47	19		
	1,90	4,83	4,33	2,50	2,82	2,91	3,60	9,46	3,92	1,62	5,25	18,92	7,83			
2	1,90	4,83	4,23	3,00	3,35	3,42	4,27	10,97	4,55	1,60	6,15	21,94	9,09			
	2,36	5,99	5,59	2,00	2,86	3,07	3,64	15,29	5,10	2,05	6,72	30,59	10,21			
	2,36	5,99	5,49	2,50	3,54	3,69	4,51	18,64	6,22	2,03	8,25	37,28	12,44	19		
	2,36	5,99	5,39	3,00	4,21	4,3	5,36	21,76	7,27	2,01	9,72	43,53	14,53			
2 1/2	2,36	5,99	5,19	4,00	5,52	5,66	7,02	27,58	9,21	1,98	12,52	55,16	18,42			
	2,85	7,24	6,84	2,00	3,47	3,73	4,42	27,41	7,57	2,49	9,91	54,83	15,15			
	2,85	7,24	6,74	2,50	4,31	4,49	5,49	33,56	9,27	2,47	12,22	67,12	18,54	7		
	2,85	7,24	6,64	3,00	5,13	5,24	6,54	39,44	10,90	2,46	14,45	78,87	21,79			
3	2,85	7,24	6,44	4,00	6,75	6,92	8,59	50,42	13,93	2,42	18,73	100,83	27,86			
	3,50	8,89	8,49	2,00	4,29	4,57	5,46	51,57	11,60	3,07	15,11	103,14	23,20			
	3,50	8,89	8,39	2,50	5,33	5,51	6,79	63,37	14,26	3,06	18,67	126,75	28,51			
	3,50	8,89	8,29	3,00	6,36	6,44	8,10	74,76	16,82	3,04	22,15	149,53	33,64	7		
	3,50	8,89	8,09	4,00	8,38	8,52	10,67	96,34	21,67	3,00	28,85	192,68	43,35			
4	3,50	8,89	7,69	6,00	12,27		15,63	134,94	30,36	2,94	41,31	269,88	60,72			
	4,50	11,43	11,03	2,00	5,54	5,91	7,06	111,27	19,47	3,97	25,23	222,53	38,94			
	4,50	11,43	10,93	2,50	6,89	7,14	8,78	137,26	24,02	3,95	31,25	274,52	48,03			
	4,50	11,43	10,83	3,00	8,23	8,35	10,49	162,55	28,44	3,94	37,17	325,10	56,88	7		
	4,50	11,43	10,63	4,00	10,88	11,08	13,86	211,07	36,93	3,90	48,69	422,13	73,86			
5	4,50	11,43	10,23	6,00	16,02		20,41	300,21	52,53	3,83	70,45	600,42	105,06			
5	5,56	13,97	13,17	4,00	13,54		17,05	392,86	56,24	4,80	73,68	785,72	112,49	1		



ANEXO C:

Características Técnicas de la Batería



**RA6-200D (6V200Ah)**

RA6-200D is AGM Deep cycle battery with 10 years floating design life, specially designed for frequent cyclic discharge usage. By using strong grid and specific paste plate, it makes battery have 30% more cyclic life time than standby series. It is applicable for solar energy system, golf cart, electric wheelchair, etc...

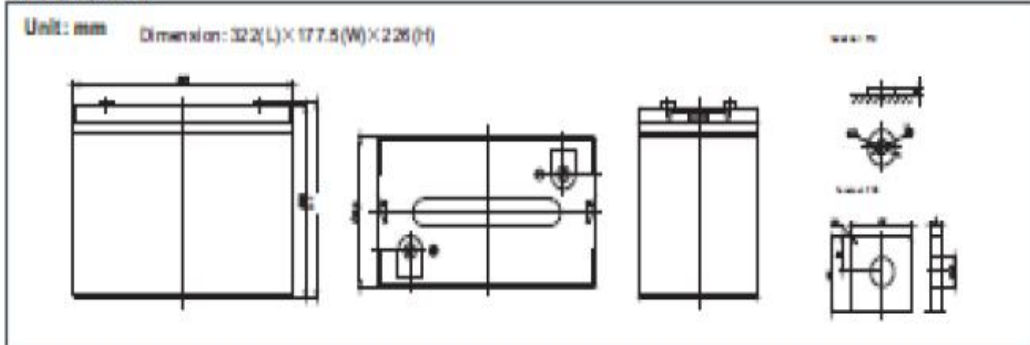


**Specification**

Cells Per Unit	3
Voltage Per Unit	6
Capacity	200Ah@ 10hr-rate to 1.80V per cell @25°C
Weight	Approx. 29.0Kg
Max. Discharge Current	2000A (5sec)
Internal Resistance	Approx. 1.8 mΩ
Operating Temperature Range	Discharge: -20°C~60°C Charge: 0°C~50°C Storage: -20°C~60°C
Normal Operating Temperature Range	25°C±5°C
Float Charging Voltage	6.8to 6.9V DC/unit Average at 25°C
Recommended Maximum Charging Current Limit	60A
Equalization and Cycle Service	7.3to 7.4V DC/unit Average at 25°C
Self Discharge	RITAR Valve Regulated LeadAcid (VRLA) batteries can be stored for more than 6 months at 25°C. Self-discharge ratio less than 3% per month at 25°C. Please charge batteries before using.
Terminal	Terminal F 14/F 16
Container Material	A.B.S. (UL94-HB), Flammability resistance of UL94-V1 can be available upon request.

ISO 9001:2015 Certificate

**Dimensions**

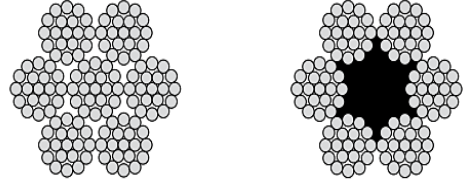


## ANEXO D:

### Catálogo de cables de acero de fuerza

#### 6X19 y 6X26 (AF – AA)

Construcción del Torón	
Item	Cantidad
Alambres	15 A 26
Alambres Externos	7 A 12
Capa de Alambres	2 A 3



Construcción del Cable	
Item	Cantidad
Torones	6
Torones Externos	6
Capa de Torones	1
Alambres en Cable	90 A 156

Ejemplos Típicos	
Cables	Torones
6x19S	1-9-9
6x21F	1-5-5F-10
6x26WS	1-5-(5+5)-10
6x19W	1-6-(6+6)
6x25F	1-6-6F-12

TABLA 4						
Diámetro (pulg)	Alma de Fibra			Alma de Acero		
	Peso aproximado Kg/m	Carga de rotura en Tons		Peso aproximado Kg/m	Carga de rotura en Tons	
		IPS	EIPS		IPS	EIPS
1/4	0.156	2.74	3.01	0.172	2.94	3.40
5/16	0.244	4.26	4.69	0.268	4.58	5.27
3/8	0.352	6.10	6.71	0.386	6.56	7.55
7/16	0.479	8.27	9.10	0.526	8.89	10.2

ANEXO E:

Controlador de voltaje MORNINGSTAR

**TRISTAR**<sup>TM</sup>.....

**Solar Charging System Controller**

**Installation, Operation and  
Maintenance Manual**



.....  
**Solar Battery Charging**

.....  
**Load Control**

.....  
**Diversion Control**



**MORNINGSTAR**

World's Leading Solar Controllers & Inverters

[www.morningstarcorp.com](http://www.morningstarcorp.com)

**MODELS**

**TS-45**

**TS-60**

**ANEXO F:**

**Instalación del aerogenerador eólico de baja potencia en la Comunidad de Río Blanco**

Estaca o ancla



Excavación para implantación de la torre



**Fuente:** Autor



Mecanismo de anclaje



Armado de la torre en cuatro secciones



Sujeción de las secciones de la torre con abrazaderas



Engrasado de elementos sometidos a fricción

**Fuente:** Autor



Montaje del conjunto álabes-rotor



Montaje de la veleta de orientación al conjunto álabes-rotor



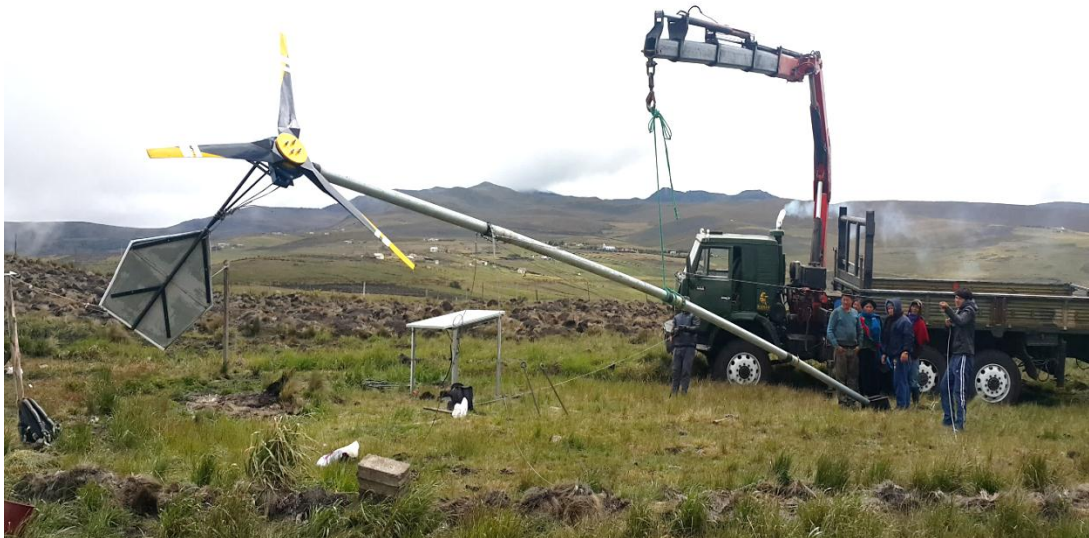
**Fuente:** Autor



Armado de la torre con el aerogenerador



Levantamiento del aerogenerador mediante una grúa



**Fuente:** Autor

Levantamiento del aerogenerador mediante una grúa



Colocación de las estacas para sujeción de los cables tensores



**Fuente:** Autor



Colocación de los cables tensores



Nivelación de la torre



Base de la torre en el mecanismo de anclaje



**Fuente:** Autor

Batería de almacenamiento energético

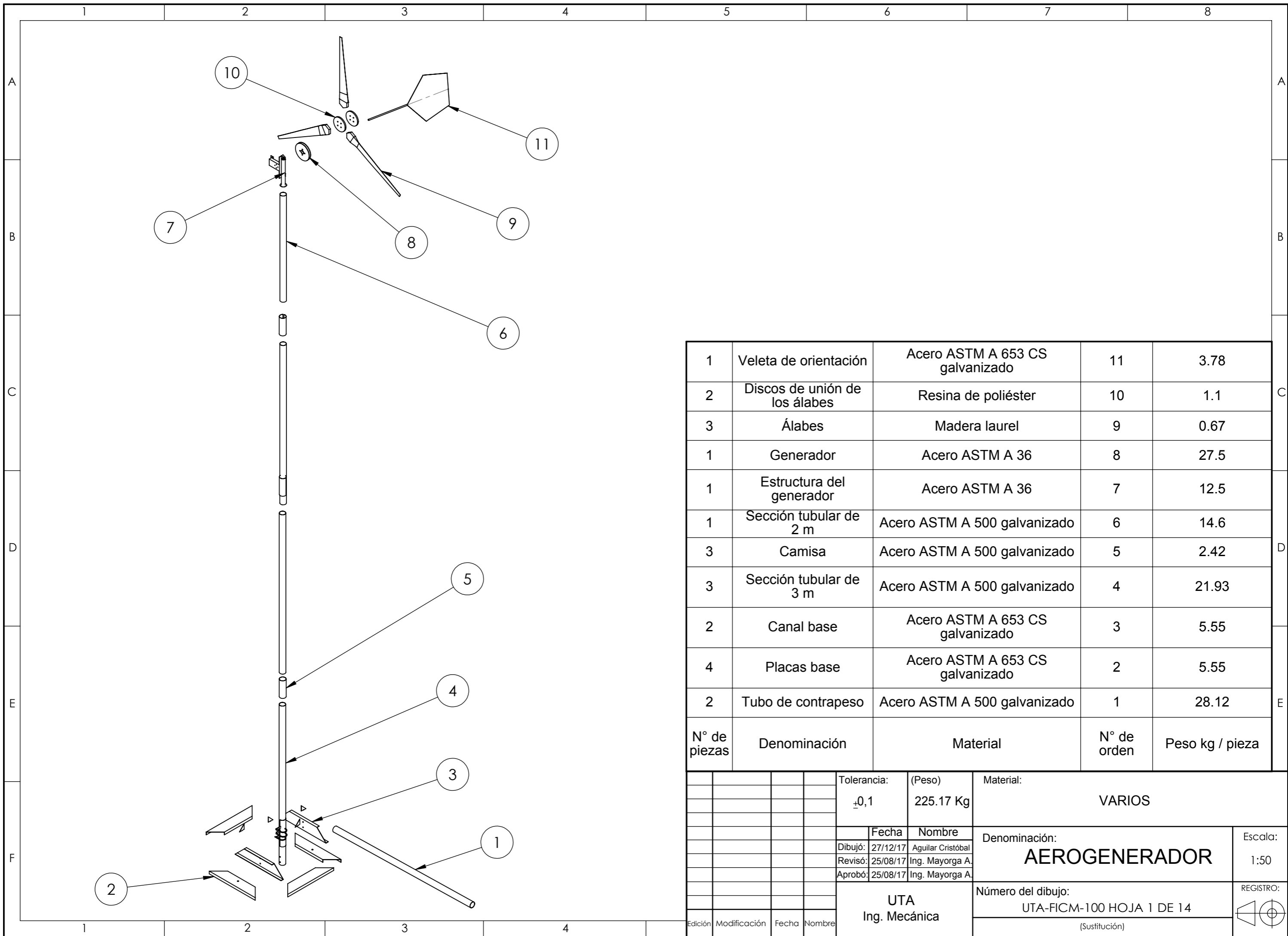


Aerogenerador instalado en la vivienda de la Comunidad de Río Blanco



Fuente: Autor

# PLANOS

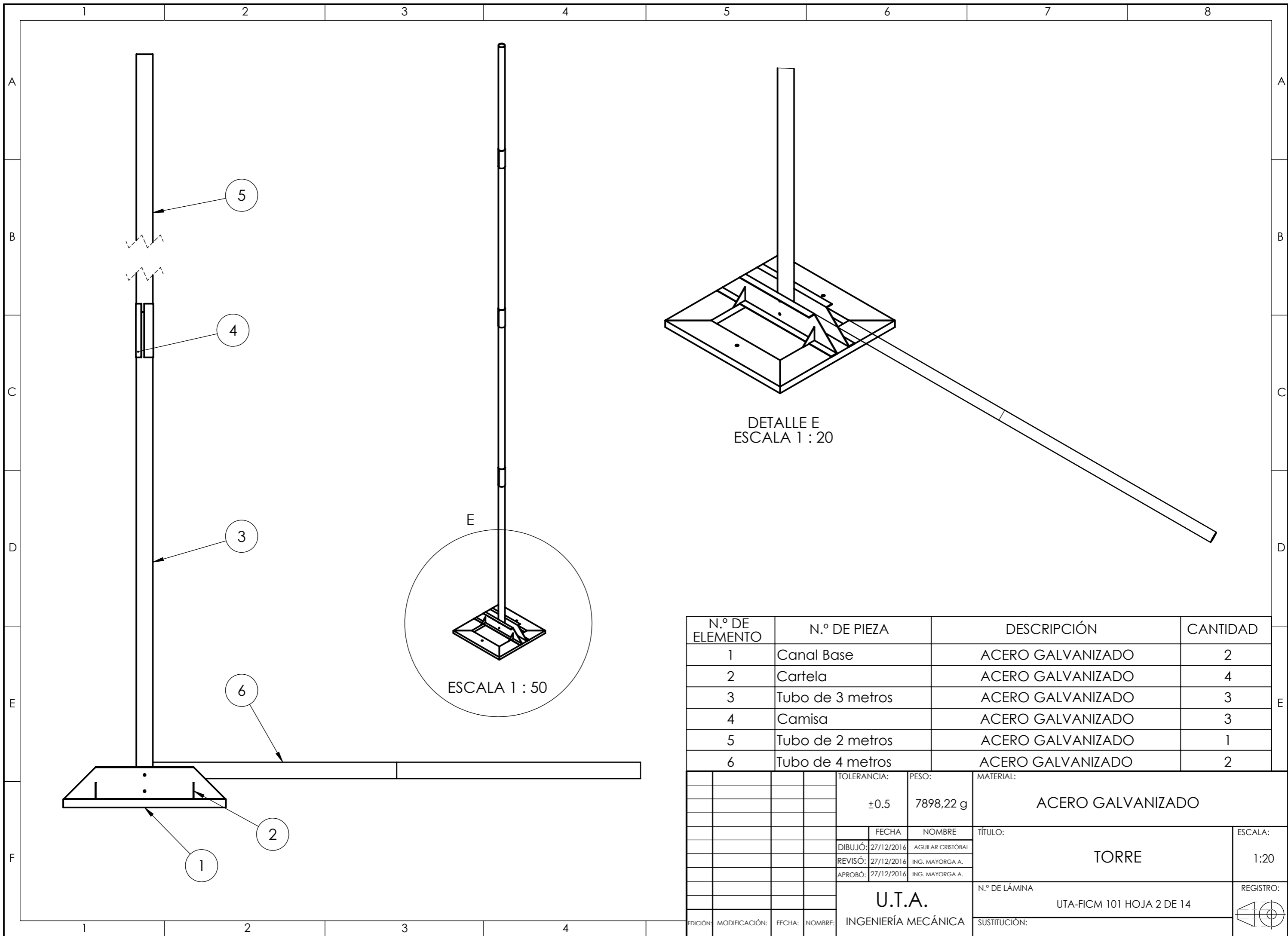


1	Veleta de orientación	Acero ASTM A 653 CS galvanizado	11	3.78
2	Discos de unión de los álabes	Resina de poliéster	10	1.1
3	Álabes	Madera laurel	9	0.67
1	Generador	Acero ASTM A 36	8	27.5
1	Estructura del generador	Acero ASTM A 36	7	12.5
1	Sección tubular de 2 m	Acero ASTM A 500 galvanizado	6	14.6
3	Camisa	Acero ASTM A 500 galvanizado	5	2.42
3	Sección tubular de 3 m	Acero ASTM A 500 galvanizado	4	21.93
2	Canal base	Acero ASTM A 653 CS galvanizado	3	5.55
4	Placas base	Acero ASTM A 653 CS galvanizado	2	5.55
2	Tubo de contrapeso	Acero ASTM A 500 galvanizado	1	28.12
N° de piezas	Denominación	Material	N° de orden	Peso kg / pieza

Tolerancia:		(Peso)	Material:	
±0,1		225.17 Kg	VARIOS	
Fecha		Nombre	Denominación:	
Dibujó: 27/12/17		Aguilar Cristóbal	<b>AEROGENERADOR</b>	
Revisó: 25/08/17		Ing. Mayorga A.		
Aprobó: 25/08/17		Ing. Mayorga A.		
Edición		Modificación	Fecha	Nombre
		UTA		Número del dibujo:
		Ing. Mecánica		UTA-FICM-100 HOJA 1 DE 14
				(Sustitución)
				REGISTRO:

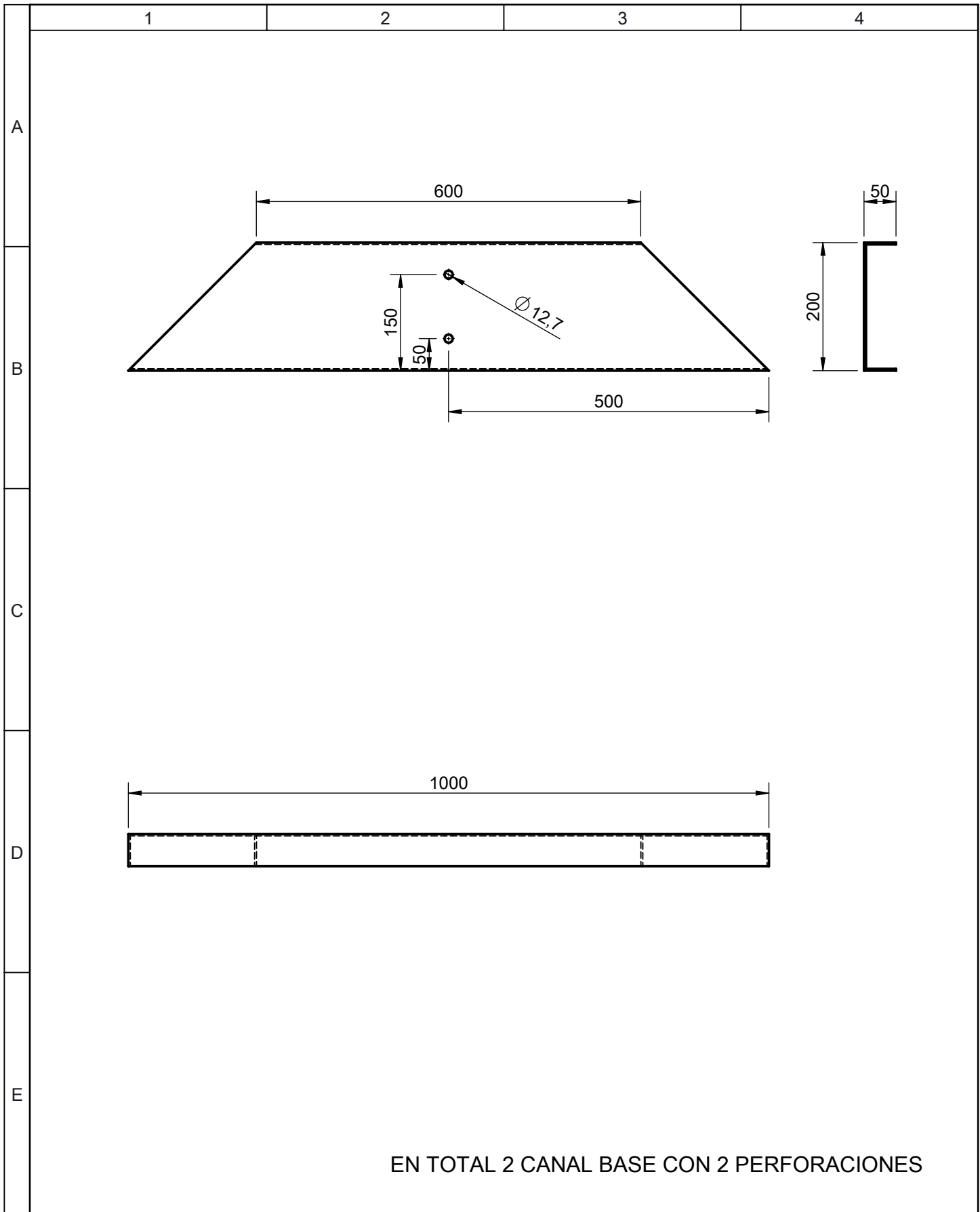
Escala:  
1:50





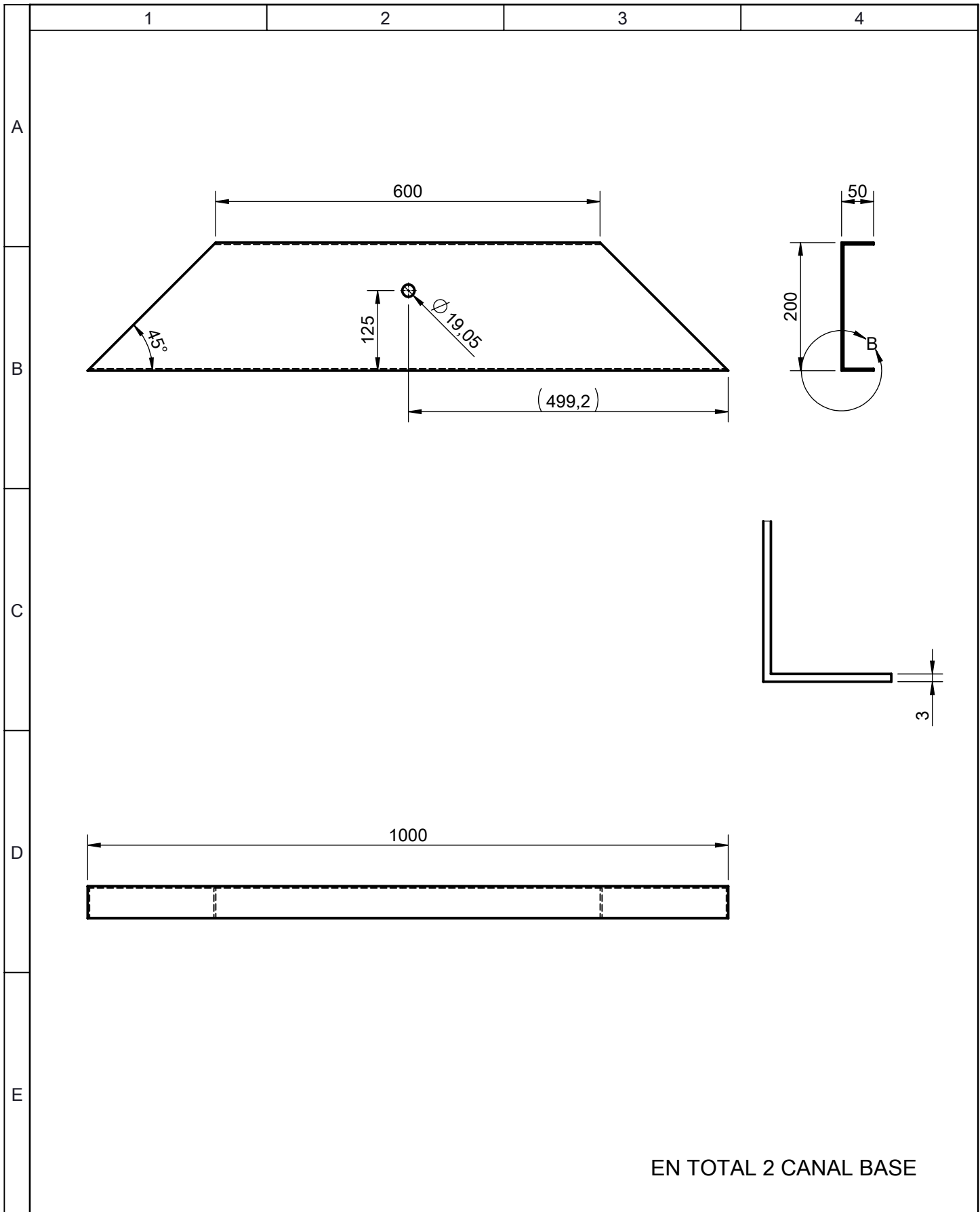
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Canal Base	ACERO GALVANIZADO	2
2	Cartela	ACERO GALVANIZADO	4
3	Tubo de 3 metros	ACERO GALVANIZADO	3
4	Camisa	ACERO GALVANIZADO	3
5	Tubo de 2 metros	ACERO GALVANIZADO	1
6	Tubo de 4 metros	ACERO GALVANIZADO	2

TOLERANCIA:		PESO:		MATERIAL:	
±0.5		7898,22 g		ACERO GALVANIZADO	
FECHA:		NOMBRE:		TÍTULO:	
DIBUJÓ: 27/12/2016		AGUILAR CRISTÓBAL		TORRE	
REVISÓ: 27/12/2016		ING. MAYORGA A.		ESCALA: 1:20	
APROBÓ: 27/12/2016		ING. MAYORGA A.		REGISTRO:	
U.T.A.				N.º DE LÁMINA	
INGENIERÍA MECÁNICA				UTA-FICM 101 HOJA 2 DE 14	
EDICIÓN:	MODIFICACIÓN:	FECHA:	NOMBRE:	SUSTITUCIÓN:	



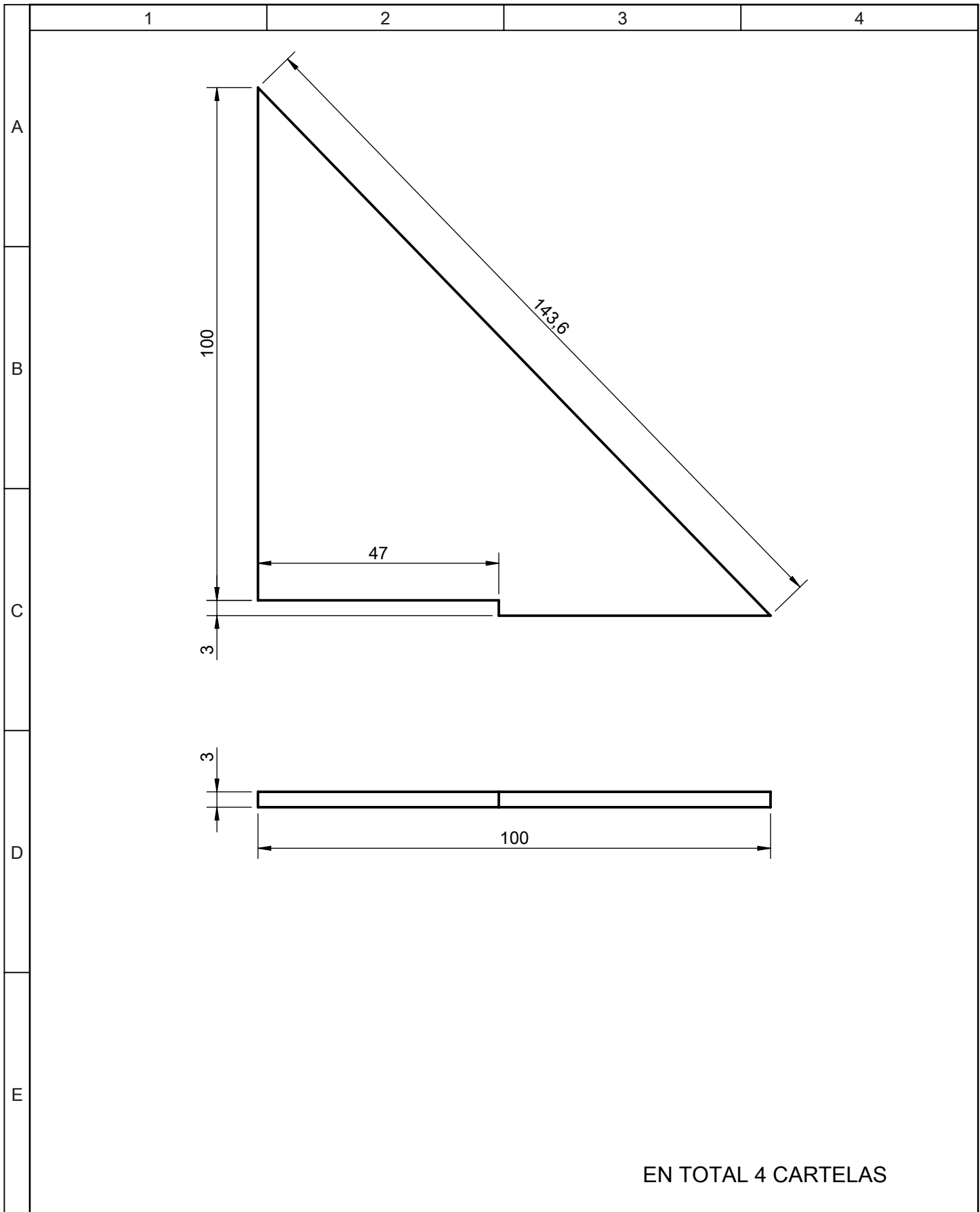
EN TOTAL 2 CANAL BASE CON 2 PERFORACIONES

				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				±0,1	569.82 g	ACERO GALVANIZADO	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujó: 27/12/16	Aguilar Cristóbal		
				Revisó: 25/08/17	Ing. Mayorga A.		
				Aprobó: 25/08/17	Ing. Mayorga A.	CANAL BASE CON 2 PERFORACIONES	1:1
				UTA Ing. Mecánica			
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			UTA-FICM-101.001 HOJA 3 DE 14 (Sustitución)	



EN TOTAL 2 CANAL BASE

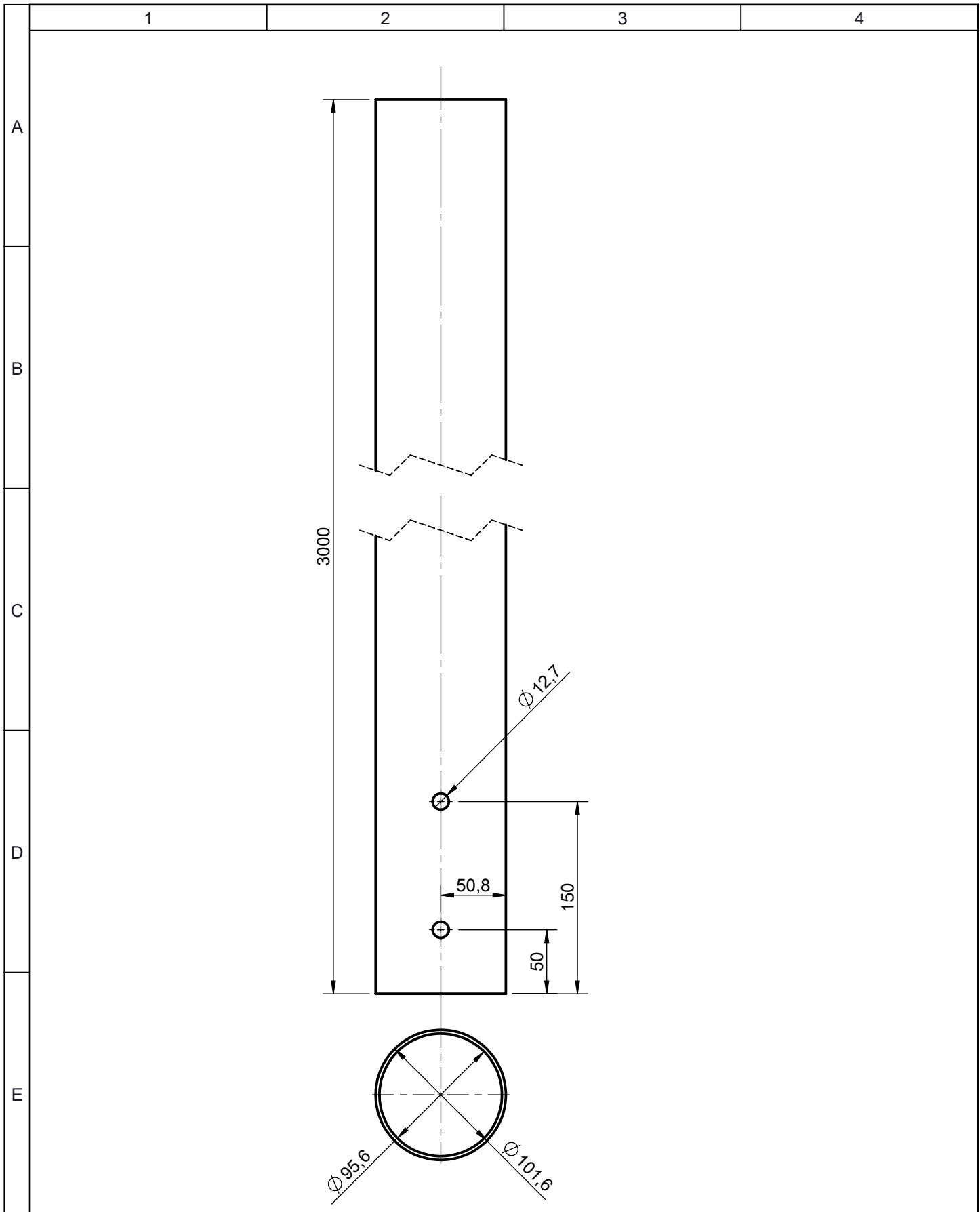
				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				±0,1	569.82 g	ACERO GALVANIZADO	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujó: 27/12/16	Aguilar Cristóbal		
				Revisó: 25/08/17	Ing. Mayorga A.		
				Aprobó: 25/08/17	Ing. Mayorga A.	<b>CANAL BASE</b> Número del dibujo: UTA-FICM-101.002 HOJA 4 DE 14 (Sustitución)	Escala: 1:8 
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	UTA Ing. Mecánica			



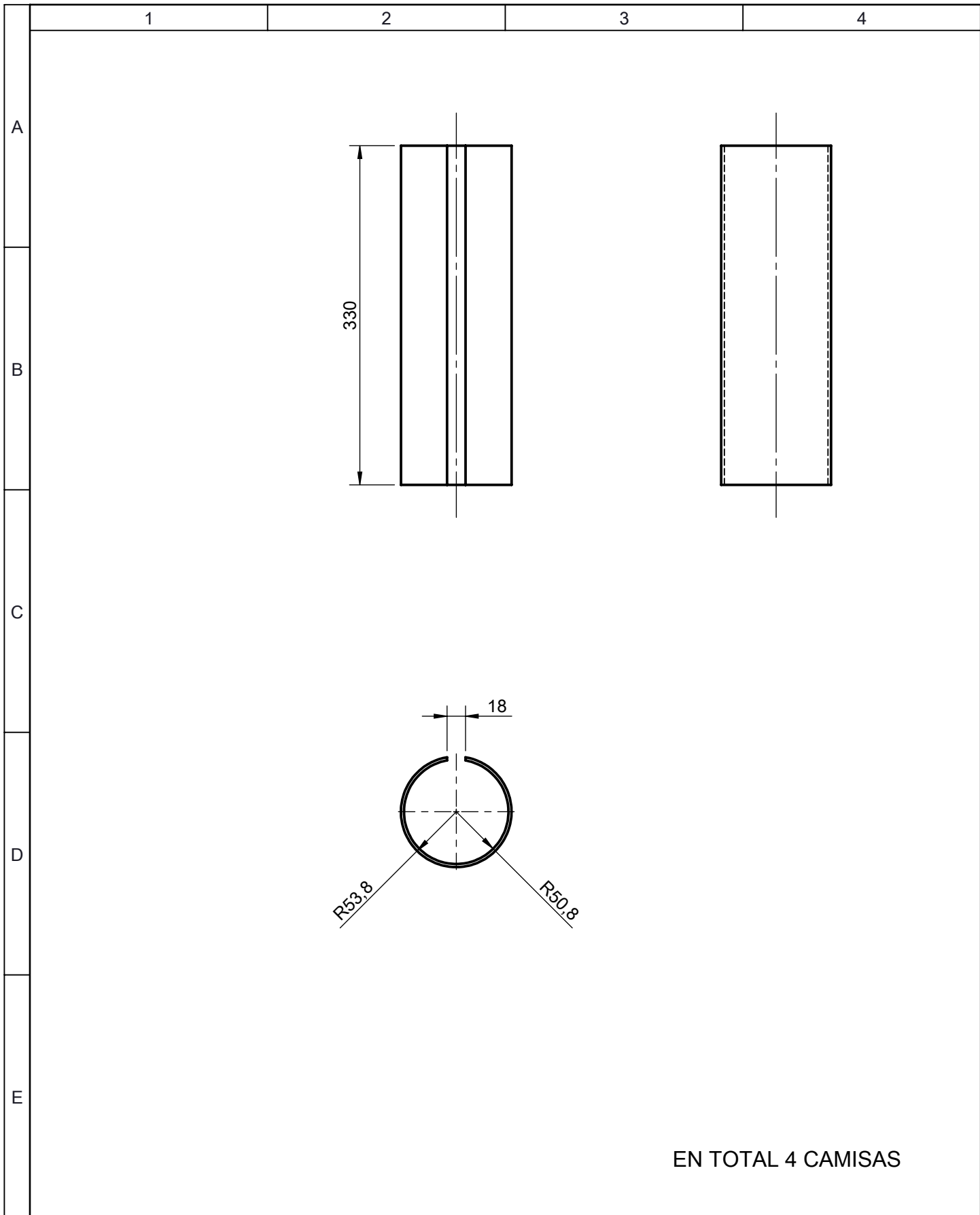
EN TOTAL 4 CARTELAS

				Tolerancia	(Peso)	Materiales:		
				±0,1	569.82 g	ACERO GALVANIZADO		
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:	
				Dibujó: 27/12/16	Aguilar Cristóbal			
				Revisó: 25/08/17	Ing. Mayorga A.			
				Aprobó: 25/08/17	Ing. Mayorga A.	Número del dibujo:	1:1	
				UTA				UTA-FICM-101.003 HOJA 5 DE 14
				Ing. Mecánica				
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)		



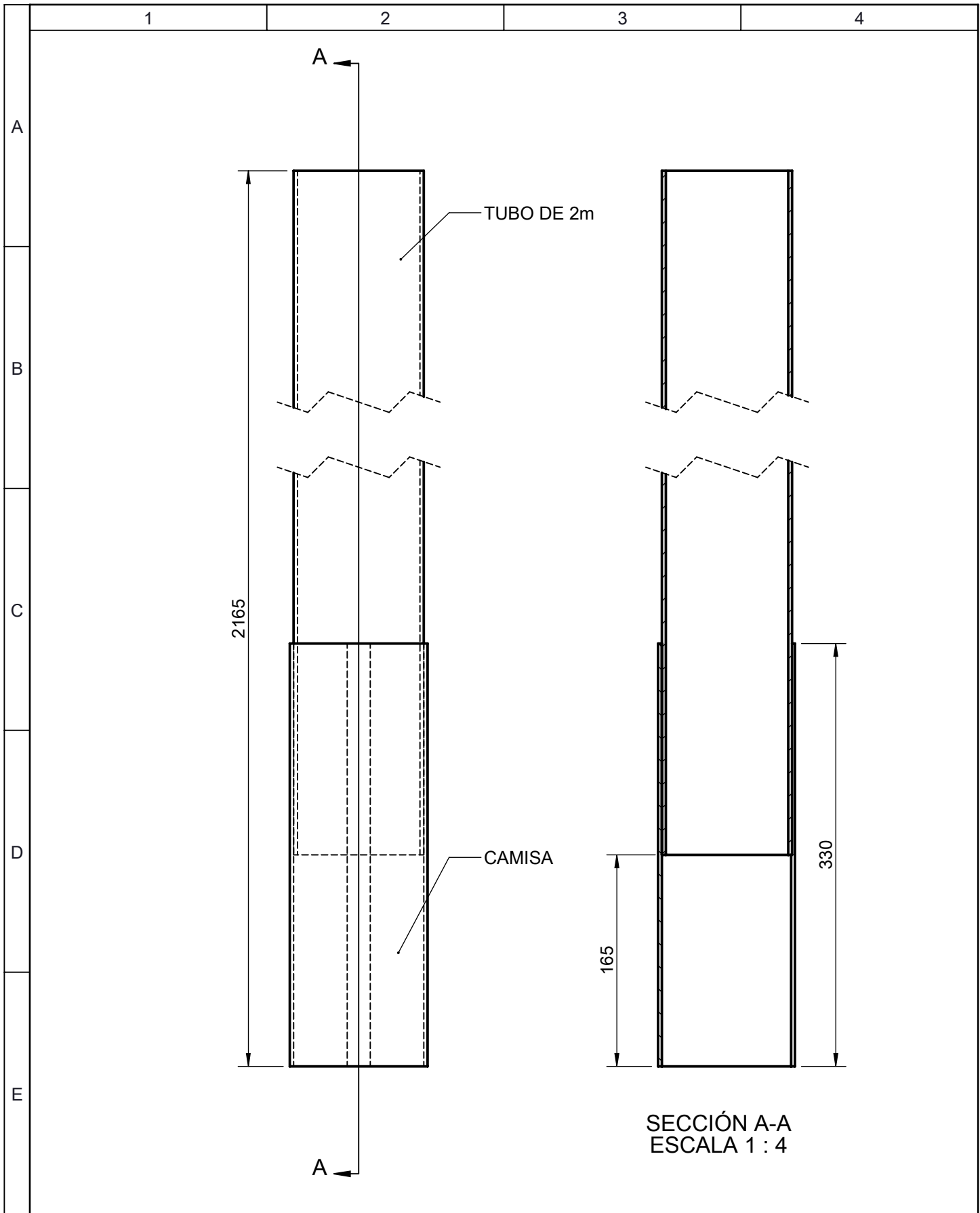


				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				±0,1	569.82 g	ACERO GALVANIZADO	
				Fecha	Nombre	Denominación: <b>SECCIÓN TUBULAR DE 3 m</b>	Escala: 1:4
			Dibujó:	27/12/16	Aguilar Cristóbal		
			Revisó:	25/08/17	Ing. Mayorga A.		
				Aprobó:	25/08/17	Ing. Mayorga A.	
				UTA Ing. Mecánica		Número del dibujo: UTA-FICM-101.004 HOJA 6 DE 14	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	



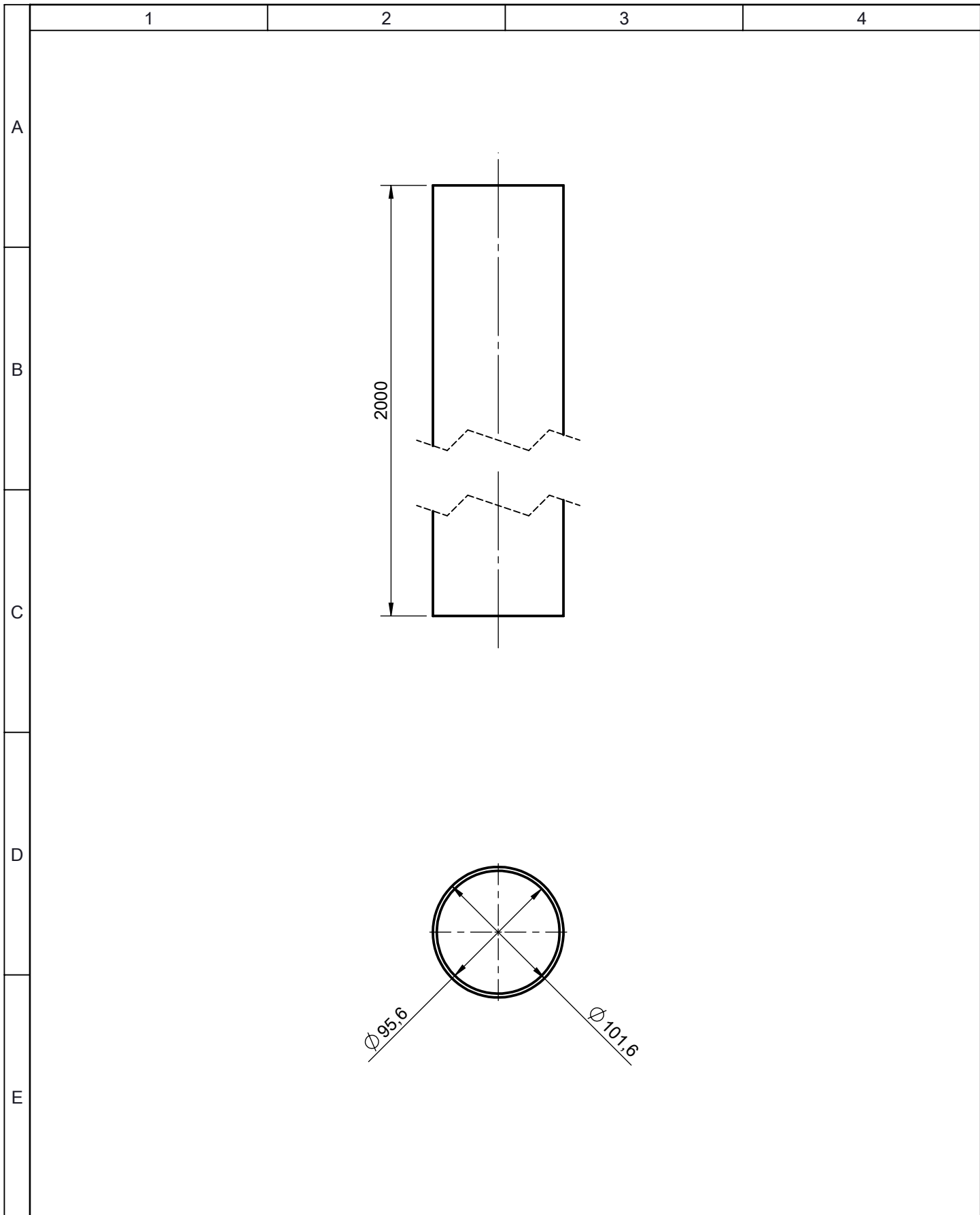
EN TOTAL 4 CAMISAS

				Tolerancia	(Peso)	Materiales:		
				±0,1	569.82 g	ACERO GALVANIZADO		
				Fecha	Nombre	Denominación: <b>CAMISA</b>		Escala:
				Dibujó: 27/12/16	Aguilar Cristóbal			1:5
				Revisó: 25/08/17	Ing. Mayorga A.			
				Aprobó: 25/08/17	Ing. Mayorga A.	Número del dibujo: UTA-FICM-101.005 HOJA 7 DE 14		
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	UTA Ing. Mecánica		(Sustitución)		



SECCIÓN A-A  
ESCALA 1 : 4

				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				±0,1	569.82 g	ACERO GALVANIZADO	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujó: 27/12/16	Aguilar Cristóbal		
				Revisó: 25/08/17	Ing. Mayorga A.		
				Aprobó: 25/08/17	Ing. Mayorga A.	<b>TUBO CON CAMISA</b> Número del dibujo: UTA-FICM-101.006 HOJA 8 DE 14 (Sustitución)	1:4
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	UTA Ing. Mecánica			



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:		
				±0,1	569.82 g	<b>ACERO GALVANIZADO</b>		
				Fecha	Nombre	Denominación:		Escala:
				Dibujó: 27/12/16	Aguilar Cristóbal	<b>SECCIÓN TUBULAR DE 2 m</b>		1:4
				Revisó: 25/08/17	Ing. Mayorga A.	Número del dibujo: UTA-FICM-101.007 HOJA 9 DE 14		
				Aprobó: 25/08/17	Ing. Mayorga A.			
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	UTA Ing. Mecánica				

1

2

3

4

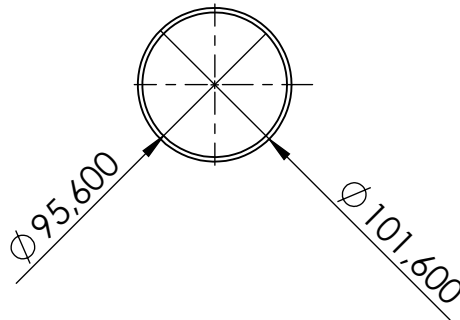
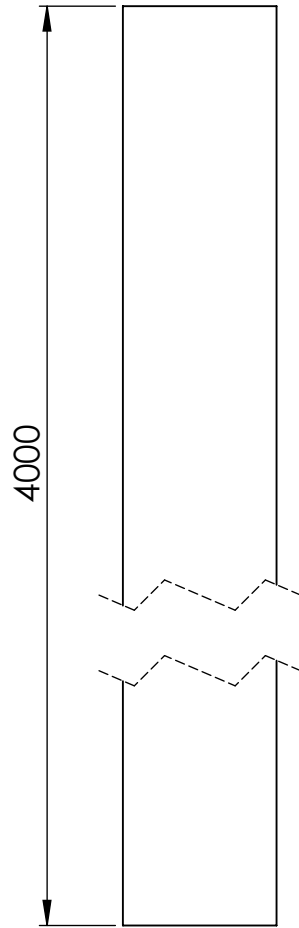
A

B

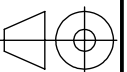
C

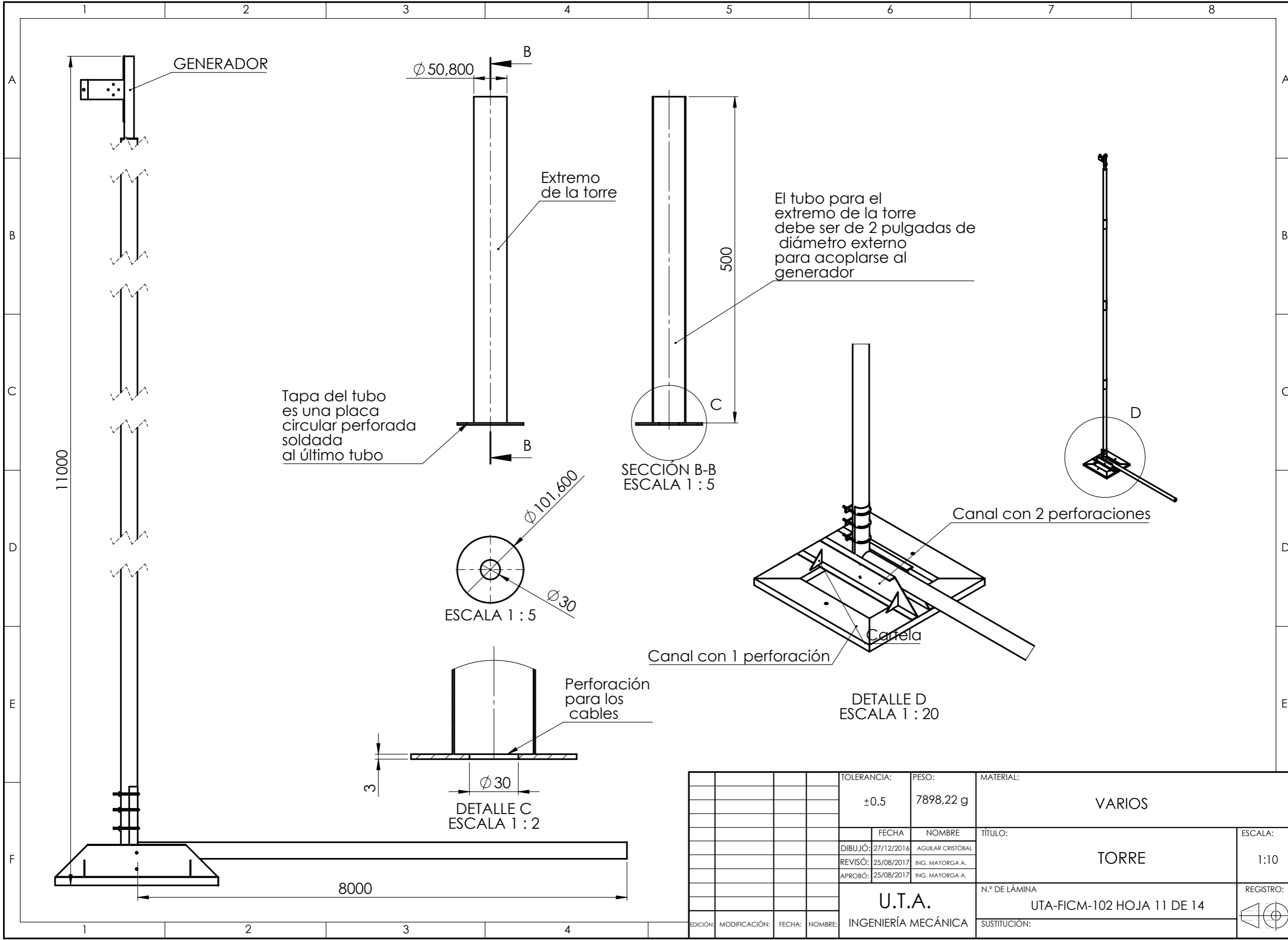
D

E

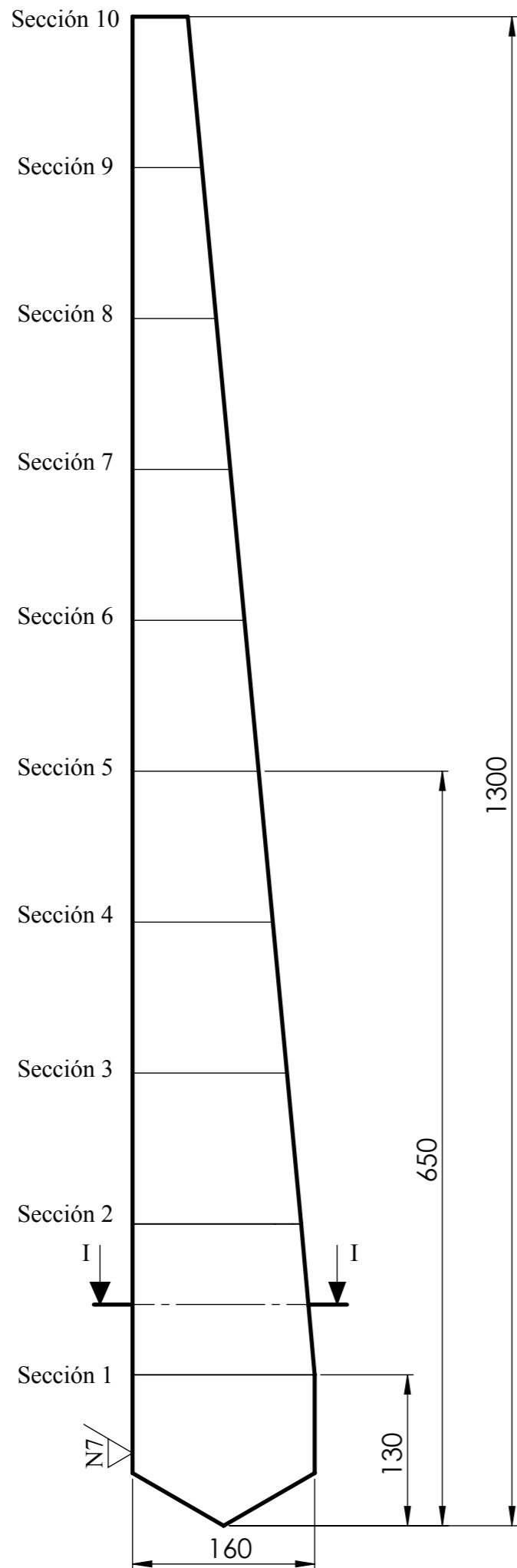


				TOLERANCIA: $\pm 0.5$	PESO: 2279.28gr	MATERIAL: ACERO GALVANIZADO	
					FECHA	NOMBRE	TÍTULO:
				DIBUJO:	27/12/16	Aguilar Cristóbal	TUBO DE CONTRAPESO
				REVISO:	25/08/17	Ing. Mayorga A.	
				APROBO:	25/08/17	Ing. Mayorga A.	
				U.T.A. INGENIERIA MECANICA		N.º DE LAMINA UTA-FICM-101.008 HOJA 10 DE 14	ESCALA: 1:5
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:			SUSTITUCION:	REGISTRO:



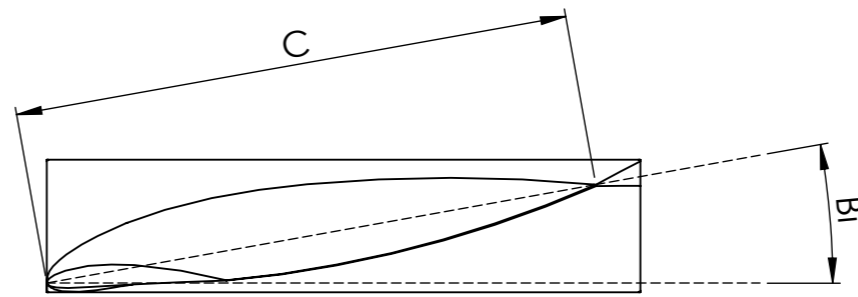


				TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:	
				$\pm 0.5$	7898,22 g	VARIOS	
				FECHA	NOMBRE	TÍTULO:	ESCALA:
				DIBUJÓ: 27/12/2016	AGUILAR CRISTÓBAL	TORRE	1:10
				REVISÓ: 25/08/2017	ING. MAYORGA A.		
				APROBÓ: 25/08/2017	ING. MAYORGA A.		
				U.T.A.		N.º DE LÁMINA	REGISTRO:
				INGENIERÍA MECÁNICA		UTA-FICM-102 HOJA 11 DE 14	
EDICIÓN:	MODIFICACIÓN:	FECHA:	NOMBRE:	SUSTITUCIÓN:			



N7 Mecanizado

Sección I-I del álabe



Escala 1:2

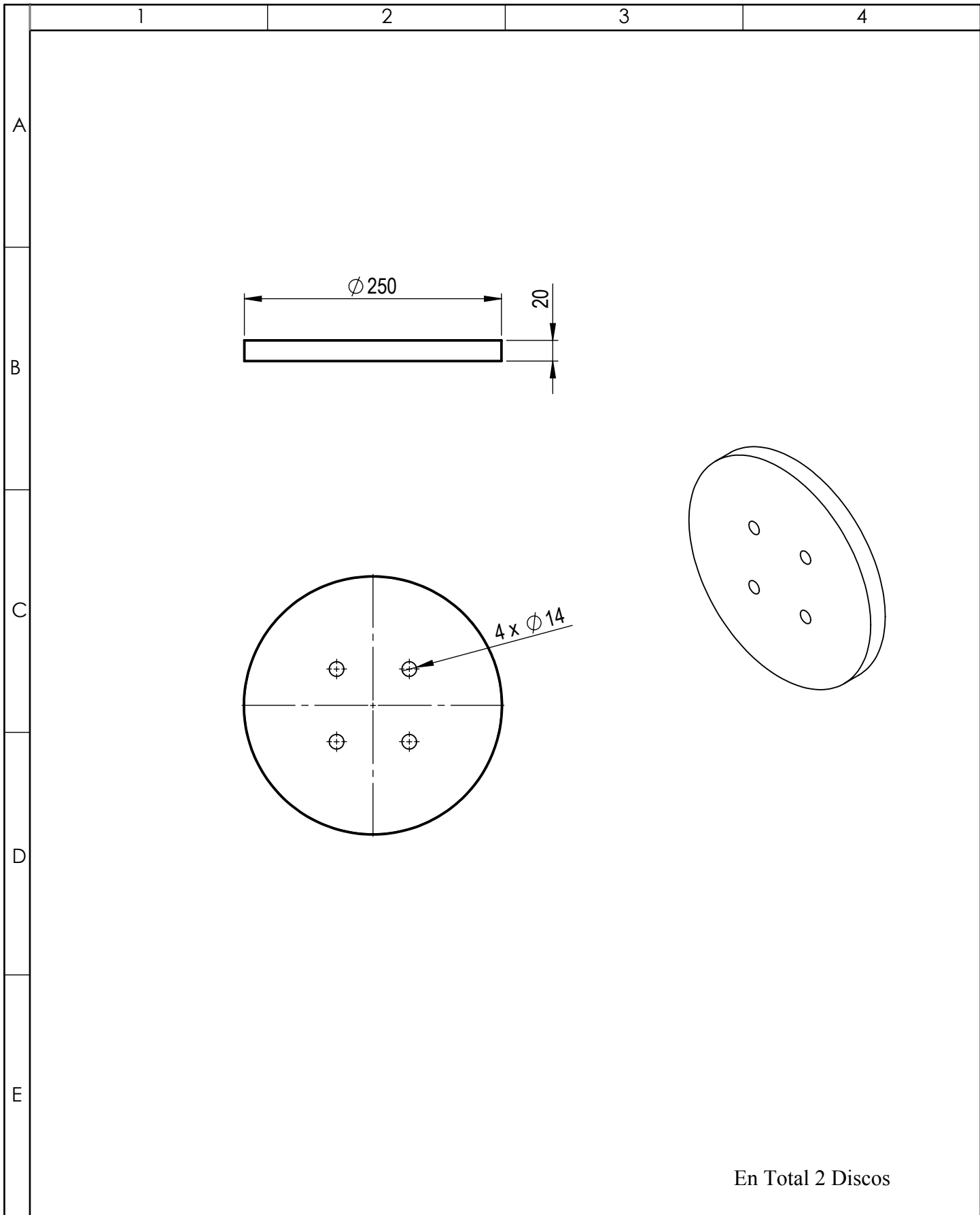


Sección	Cuerda C (mm)	Ángulo de curvatura Bi (°)	Longitud R del álabe (mm)
1	160,00	11,25	130
2	147,50	10,09	260
3	135,00	8,94	390
4	122,50	7,78	520
5	110,00	6,53	650
6	97,50	5,48	780
7	85,00	4,32	910
8	72,50	3,17	1040
9	60,00	2,01	1170
10	47,51	0,86	1300

En Total 3 Álaves  
Secciones equidistantes  
Acople mediante Discos de unión

Tolerancia:		(Peso)	Material:	
±0,1		667 g	MADERA LAUREL	
Fecha		Nombre	Denominación:	Escala:
Dibujó:	27/12/17	Aguilar Cristóbal		
Revisó:	25/08/17	Ing. Mayorga A.		
Aprobó:		25/08/17	Ing. Mayorga A.	1:5
UTA Ing. Mecánica			Número del dibujo:	REGISTRO:
			UTA-FICM-103 HOJA 12 DE 14	
			(Sustitución)	

Edición Modificación Fecha Nombre



				Tolerancia:	(Peso)	Material:			
				±0,1	1106.32 g	RESINA DE POLIÉSTER			
					Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:	
				Dibujó:	27/12/17	Aguilar Cristóbal			
				Revisó:	25/08/17	Ing. Mayorga A.			
				Aprobó:	25/08/17	Ing. Mayorga A.	DISCO DE UNIÓN DE LOS ÁLABES	1:5	
				Número del dibujo:					
				UTA			UTA-FICM-104 HOJA 13 DE 14		
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	Ing. Mecánica			(Sustitución)		



