

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingeniería**

**Vibration Energy Harvester**

**Erick Ismael Alarcón Valencia**

**José Javier Andrade Sosa**

**Josué Andrés Solís García**

**Kirman Amílcar Vega Vega**

**Ingeniería Mecánica**

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniero Mecánico

Quito, 23 de diciembre de 2021

# **UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingeniería**

## **HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Vibration Energy Harvester**

**Erick Ismael Alarcón Valencia**

**José Javier Andrade Sosa**

**Josué Andrés Solís García**

**Kirman Amílcar Vega Vega**

**Nombre del profesor, Título académico:**

**Juan Sebastián Proaño, PhD.**

Quito, 23 de diciembre de 2021

## © DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Erick Ismael Alarcón Valencia

Código: 00201073

Cédula de identidad: 1726959677

Lugar y fecha: Quito, 23 de diciembre de 2021

## © DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: José Javier Andrade Sosa

Código: 00200246

Cédula de identidad: 1718553447

Lugar y fecha: Quito, 23 de diciembre de 2021



## © DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos:	Kirman Amílcar Vega Vega
Código:	00203023
Cédula de identidad:	1400877146
Lugar y fecha:	Quito, 23 de diciembre de 2021

## **ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN**

**Nota:** El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

## **UNPUBLISHED DOCUMENT**

**Note:** The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

## RESUMEN

En este informe se presenta la construcción de un dispositivo generador de energía por medio de vibraciones producidas por ganado vacuno. Dicho dispositivo se plantea como respuesta a la falta de autonomía energética que proveen las baterías ya que se deben cambiar o recargar cada cierto tiempo. Las vibraciones son fuentes de energía poco exploradas y con el apoyo de la empresa “NBC Maschinenbau” se ha evaluado y considerado la generación eléctrica mediante vibraciones como una oportunidad de desarrollo e innovación energética-tecnológica. Por lo tanto, la solución consiste en un sistema oscilatorio que funciona bajo las leyes de un péndulo físico, al cual se le incorporó imanes de neodimio en una masa rotativa y bobinas de cobre en un cuerpo fijo, gracias al vaivén producido por los movimientos de los animales se genera una interacción electromagnética entre el campo magnético de imanes con las bobinas produciendo así una corriente eléctrica. La generación del mecanismo fue probada tanto en laboratorio como en campo y la señal generada ha sido analizada pudiendo así caracterizar la potencia generada y relacionarla con la actividad del animal. Con relación a los resultados obtenidos en campo y con el perfil de consumo del microprocesador ESP32, se puede establecer una deficiencia de producción energética del mecanismo con respecto a la demanda del electrónico, pues no logra ser una fuente continua de alimentación para el chip, siendo insuficiente a pesar de las mejoras en inercia realizadas en el rotor. Debido a esto se determinó que el mecanismo va a operar a modo de fuente auxiliar el cual alimentará constantemente una fuente de almacenamiento con el fin de prolongar su carga.

**Palabras Clave:** Dispositivo generador de energía, masa excéntrica, vibraciones, autoalimentado, vaca.

## ABSTRACT

This report presents the construction of a device that generates energy employing vibrations produced by cattle. This device is proposed as an alternative to the lack of energy autonomy provided by conventional batteries due to it must be changed or recharged from time to time. Vibrations are little-explored sources of energy. With the support of the company “NBC Maschinenbau,” it has been evaluated and considered electricity generation through vibrations as an opportunity for development and energy-technological innovation. Therefore, the solution consists of an oscillating system that works under the laws of a physical pendulum, to which neodymium magnets are incorporated in the rotating mass and copper coils in the steady body. Thanks to the oscillation produced by the movements of the animals, it generates an electromagnetic interaction between the magnetic field of magnets with coils, thus generating electric current. The mechanism generation was tested in lab as well as in the field and the generated signal has been analyzed in order to define the power provided and relate it with animal activity. Concerning the results obtained in the field and consumption profile for the ESP32 microprocessor, these indicate an energy deficiency of the generation mechanism for the electronic needs, since it cannot be a continuous power source for the chip, being insufficient despite the inertia improvements performed in the rotor. Due to this, the mechanism will operate as an auxiliary source that will constantly feed a energy storage to achieve energy autonomy and prolong it’s charge.

**Key words:** Vibration energy harvesting, eccentric mass, vibrations, self-powered, cow.

## Índice General

RESUMEN .....	8
ABSTRACT.....	9
Índice General.....	10
Índice de Figuras.....	11
Índice de Tablas .....	12
<b>1. Resumen ejecutivo .....</b>	<b>14</b>
<b>2. Declaración de problema y especificación del proyecto .....</b>	<b>15</b>
<b>3. Conceptos y selección de diseño.....</b>	<b>18</b>
<b>4. Gestión del proyecto .....</b>	<b>26</b>
<b>5. Normas Ingenieriles Seleccionadas.....</b>	<b>28</b>
<b>6. Selección del material y componentes .....</b>	<b>30</b>
<b>7. Diseño de Manufactura .....</b>	<b>34</b>
<b>8. Informe de diseño.....</b>	<b>53</b>
<b>9. Análisis ingenieril.....</b>	<b>65</b>
<b>10. Plan de pruebas del prototipo .....</b>	<b>92</b>
<b>11. Seguridad a través del diseño.....</b>	<b>99</b>
<b>12. Manual de operación y Mantenimiento .....</b>	<b>103</b>
<b>13. Resultados, Discusión y Conclusiones.....</b>	<b>111</b>
<b>14. Trabajo Futuro.....</b>	<b>118</b>
<b>15. Bibliografía y Referencias .....</b>	<b>120</b>
<b>16. Apéndices.....</b>	<b>124</b>

## Índice de Figuras

Figura 1. Arquitectura general del proyecto.....	24
Figura 2. Cronograma inicial para el desarrollo del proyecto.....	26
Figura 3. Cronograma actualizado para el desarrollo del proyecto.....	27
Figura 4. Diagrama con los subsistemas que conforman al dispositivo por diseñar.....	30
Figura 5. Simbología usada en los diagramas de procesos de fabricación.....	35
Figura 6. Diagrama de proceso de la fabricación de la masa de Zinc.....	37
Figura 7. Diagrama de proceso de la fabricación del eje de acero.....	39
Figura 8. Diagrama de proceso de la fabricación de las tapas y estator.....	40
Figura 9: Diagrama de proceso de la fabricación del rotor.....	41
Figura 10. Calendario de Manufactura.....	45
Figura 11. Diagrama de ruta para la fase de diseño.....	53
Figura 12. Plano del estator.....	54
Figura 13. Plano del Rotor.....	55
Figura 14. Plano Masa Zinc.....	56
Figura 15. Plano Tapa Inferior.....	57
Figura 16. Plano Tapa Superior.....	58
Figura 17. Plano Elevador.....	59
Figura 18. Plano Masa de Bronce.....	60
Figura 19. Plano Eje.....	61
Figura 20. Plano de la Carcasa.....	62
Figura 21. Plano Base Carcasa.....	63
Figura 22. Plano de conjunto del Vibration Energy Harvester.....	64
Figura 23. Diagrama del movimiento para el sistema general.....	66
Figura 24. Diagrama de cuerpo libre para el rotor.....	68
Figura 25. Resultados de mediciones de frecuencia en animales.....	72
Figura 26: Geometrías propuestas para incrementar la inercia del rotor.....	74
Figura 27: Acople de la masa oscilante junto al rotor.....	75
Figura 28: Registro de la masa del acople.....	76
Figura 29. Diagrama de imán cilíndrico. Fuente: Supermagnete.....	77
Figura 30. Diagrama de imán cilíndrico. Fuente: Supermagnete.....	78
Figura 31. Vista isométrica de Ensamble de imanes dentro del rotor.....	79
Figura 32. a) Configuración de imanes alternando los polos. b) Configuración de imanes con el mismo polo.....	80
Figura 33. Densidad de flujo magnético superficial y las líneas de campo magnético para la configuración de polos externos iguales.....	81
Figura 34. Modos de consumo del microprocesador ESP32.....	82
Figura 35. Características de consumo máximo en el ESP32. Fuente: Last Minute Engineers.....	83
Figura 36. Características de consumo en Deep sleep del ESP32. Fuente: Last Minute Engineers.....	84
Figura 37. Perfil de consumo ESP 32 en una hora.....	86
Figura 38: Circuito LRC.....	88
Figura 39. Señal de voltaje capturada con el osciloscopio.....	90

Figura 40: Parámetros empleados en el ensayo de compresión de la carcasa. ....	95
Figura 41: Carcasa antes y después del ensayo de compresión. ....	95
Figura 42: Ensayo de hermeticidad con sulfato de aluminio. ....	96
Figura 43: Ensayo de hermeticidad con talco cosmético. ....	97
Figura 44: Ensayo de hermeticidad de líquidos, inmersión total en agua. ....	98
Figura 45: Ensayo de hermeticidad de líquidos, exposición a chorros en varias direcciones. ....	98
Figura 46: Numeración de partes mecánicas. ....	104
Figura 47: Esquema de la carcasa protectora. ....	105
Figura 48: Señal de voltaje generado en pruebas experimentales. Primera región. ....	112
Figura 49: Señal de voltaje generado en pruebas experimentales. Segunda región. ....	113

## Índice de Tablas

Tabla 1. Subsistema 1: Generación. ....	21
Tabla 2. Soluciones propuestas para el mecanismo de transducción. ....	22
Tabla 3. Criterios de Valoración para el mecanismo de generación y la prioridad de cada una de las soluciones frente a cada criterio. ....	22
Tabla 4. Criterios ponderados para selección de mecanismo de transducción. ....	22
Tabla 5. Selección de la opción prioritaria para el mecanismo de generación utilizando el método de criterios ponderados. ....	23
Tabla 6. Precio estimado del mecanismo basado en proformas. ....	26
Tabla 7. Subsistema 2: Almacenamiento. ....	30
Tabla 8. Soluciones propuestas para el almacenamiento. ....	31
Tabla 9. Criterios de Valoración para el almacenamiento y la prioridad de cada una de las soluciones frente a cada criterio. ....	31
Tabla 10. Criterios ponderados para selección de unidad de almacenamiento. ....	31
Tabla 11. Selección de la opción prioritaria utilizando el método de criterios ponderados. ....	32
Tabla 12. Subsistema 3: Gestión de Potencia. ....	32
Tabla 13. Subsistema 4: Estructura. ....	33
Tabla 14. Soluciones propuestas para la estructura del prototipo. ....	33
Tabla 15. Criterios de Valoración para la estructura del prototipo y la prioridad de cada una de las soluciones frente a cada criterio. ....	33
Tabla 16. Criterios ponderados para selección estructura externa del prototipo. ....	34
Tabla 17. Selección de la opción prioritaria para la estructura utilizando el método de criterios ponderados. ....	34
Tabla 18. Lista de componentes a fabricar. ....	35
Tabla 19. Plan de inspección para masa de zinc. ....	43
Tabla 20. Plan de inspección para eje de acero. ....	43
Tabla 21. Plan de inspección tapas y estator. ....	44
Tabla 22. Plan de inspección para rotor. ....	44
Tabla 23. Datos, plano y tareas ejercidas en el eje. ....	46
Tabla 24. Descripción de actividades, área de control y área de condiciones de mecanizado para el eje. ....	46
Tabla 25. Área de tiempos y costes para mecanizado del eje. ....	47

Tabla 26. Datos, plano y tareas ejercidas en la masa de zinc. ....	47
Tabla 27. Descripción de actividades, área de control y área de condiciones de mecanizado para la masa de zinc. ....	48
Tabla 28. Área de tiempos y costes para mecanizado de la masa de zinc. ....	48
Tabla 29. Datos, plano y tareas ejercidas en el rotor. ....	49
Tabla 30. Descripción de actividades, área de control y área de condiciones de mecanizado para el rotor. ....	49
Tabla 31. Área de tiempos y costes para mecanizado del rotor.....	50
Tabla 32. Datos, plano y tareas ejercidas en el estator. ....	50
Tabla 33. Datos, plano y tareas ejercidas en la tapa inferior.....	50
Tabla 34. Datos, plano y tareas ejercidas en la tapa superior. ....	51
Tabla 35. Datos, plano y tareas ejercidas en la tapa superior. ....	51
Tabla 36. Datos, plano y tareas ejercidas en la tapa superior. ....	52
Tabla 37. Datos registrados para cada geometría y resultados del cálculo de la frecuencia. ....	76
Tabla 38. Propiedades Magnéticas en Imanes grado N52. Fuente: Arnold Magnetic Technologies. ....	78
Tabla 39. Datos de consumo del microprocesador ESP32.....	84
Tabla 40. Perfil del consumo para el ESP32-Datos tabulados. ....	85
Tabla 41. Resultados de Consumo. ....	87
Tabla 42. Potencia promedio. ....	90
Tabla 43. Plan de prueba del prototipo. ....	92
Tabla 44. Primera cifra grado de protección IP. ....	94
Tabla 45. Segunda cifra grado de protección IP. ....	94
Tabla 46. Valoración Cualitativa. ....	99
Tabla 47. Valoración Cuantitativa. ....	99
Tabla 48. Listado de piezas VEH.....	103
Tabla 49. Listado de piezas VEH.....	105
Tabla 50. Información de Seguridad VEH. ....	106
Tabla 51. Información de Seguridad 2 VEH.....	107
Tabla 52. Variables operacionales del generador.....	108

## 1. Resumen ejecutivo

El presente proyecto planteado por la empresa NBC Maschinenbau analiza el diseño y manufactura de un prototipo transductor de energía mecánica a eléctrica que aprovecha las vibraciones de animales con el fin de alimentar un rastreador.

El proyecto surge debido a que la empresa NBC está dedicada, entre varias otras actividades, al internet de las cosas (IoT) en la industria ganadera a razón de permitir transferir datos de geolocalización en tiempo real de vacas a través de un dispositivo GPS, pero todos los dispositivos al ser inalámbricos dependen de baterías para ser alimentados. Una vez la energía se agota, reemplazar estos reservorios energéticos presenta una tarea repetitiva al poseer una población numerosa.

El prototipo construido funciona con el principio de inducción electromagnética al inducir corriente sobre embobinados colocados en un estator al variar el campo magnético sobre ellos con imanes colocados en una masa oscilante. El estudio se enfoca en análisis ingenieril para la obtención de un mecanismo eficiente empleando la metodología de criterios ponderados para la selección de la mejor alternativa que solucione el problema y utilizando normas ingenieriles; además, se orienta en el diseño planos de taller, conjunto, planes de manufactura y presupuesto para la construcción del dispositivo con simulaciones respectivas y su manual de operación y mantenimiento. Como resultado se obtuvo que el prototipo tiene una potencia estimada de 1.2[mW] lo cual no abastece de manera directa el GPS, pero prolongará el tiempo de uso de la batería, por ende a futuro se trabajará en desarrollar un sistema que opere en 3 dimensiones y no solo en 2 como es el caso de este estudio para que se aprovechen de mejor manera cualquier tipo de vibraciones producidas por el animal; la mejora de fuentes de almacenamiento de energía como

super capacitores o baterías recargables de litio y utilizar inductores con impedancia menor a fin de aumentar la potencia y eficiencia del sistema.

## **2. Declaración de problema y especificación del proyecto**

La tecnología es una herramienta de gran potencial y puede ser aplicada en cualquier campo. Su versatilidad permite a los distintos usuarios monitorear los eventos dentro de un área en específico además de influir en la toma de decisiones. Estas tareas suelen ser realizadas mediante la aplicación de sensores o dispositivos especializados encargados de recopilar algún tipo de información ya sea: tiempo, ubicación o temperatura por mencionar algunos.

El sector ganadero ha evidenciado los beneficios de implementar distintas tecnologías para sus procesos. Una de ellas es el uso de rastreadores en el ganado vinculado al internet de las cosas (IoT), lo cual permite conocer el lugar en donde se encuentran los animales. El principal problema que enfrentan los usuarios de estos sistemas es la limitada capacidad de autonomía energética. Al igual que cualquier dispositivo electrónico los rastreadores dependen de una batería con carga limitada (por lo general ion de Litio) para funcionar, esto significa que en algún punto dichos reservorios energéticos requerirán ser recargados o reemplazados. Esto implica una tarea tediosa y complicada en casos donde la población animal monitoreada sea numerosa. Por este motivo, se han explorado varias alternativas con el objetivo de obtener energía a partir de fuentes no contaminantes.

Una fuente de energía poco explorada es la vibración. Este fenómeno ocurre de manera natural o es causada por distintos medios. Representa una oportunidad dentro de la generación eléctrica. Gracias a esto, es posible aprovechar las vibraciones ocasionadas por los animales al momento de caminar, correr, comer o simplemente estar en reposo, transformando las señales en un generador de modo que pueda proveer la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de los

rastreadores y enviar la señal a la red. Para almacenar la energía existe la posibilidad de emplear super capacitores dentro de estos sistemas y optimizar los ciclos de carga-descarga.

NBC Maschinenbau es la empresa detrás de este proyecto. Sus actividades principalmente se centran en planificación, diseño y tecnologías relacionadas a las comunicaciones además del mundo informático. Dentro de la organización han evaluado y considerado la generación eléctrica mediante vibraciones como una oportunidad de desarrollo e innovación tecnológica.

Dicha empresa ha impulsado este trabajo y como cliente ha estipulado una serie de parámetros a cumplir, uno de ellos es el desarrollo de un mecanismo que aproveche vibraciones y movimiento de vacas y caballos para la generación eléctrica mediante modelos piezoeléctricos, electromagnético o híbridos. Dicho mecanismo debe lograr generar un voltaje de 3.3 voltios e incorporar tecnologías emergentes como Super capacitores. Es crucial para el cliente que el modelo diseñado pueda operar de forma normal sin verse afectado por factores ambientales como condiciones ambientales adversas y a su vez que resista impactos producidos por los animales que pueden llegar a ocurrir.

En el trabajo se discutirán y evaluarán los mecanismos para obtener energía eléctrica a través de vibraciones, que son una forma prometedora de superar las desventajas de recarga de baterías convencionales. Además, se seleccionará el sistema más adecuado de acuerdo con el análisis de criterios ponderados para la fabricación del prototipo. Las aplicaciones típicas de recolección de energía por medio de vibraciones usan diferentes tecnologías de flujo inducido de vibraciones las cuales se dividen en: electromagnético, piezoeléctrico, electrostático, dieléctrico y triboeléctrico; Mateu y Moll (2005) emplean un artefacto de vigas piezoeléctricas dentro de un zapato para transformar parte de la energía mecánica que se emplea normalmente al caminar, Trapanese (2008) utiliza un dispositivo electromagnético para captar energía de manera

óptima de las olas del mar. A su vez Ando, et al. (2012) proponen una metodología para recuperar energía de vibraciones de baja frecuencia mediante osciladores biestables que usan a favor la fuerza repulsiva de dos magnetos permanentes colocados en los extremos de dos voladizos en paralelo, que son excitados por la fuerza inercial proveniente de vibraciones ambientales que actúan en conjunto con las fuerzas lineales no elásticas debido a las interacciones magnéticas de los dos voladizos.

Las técnicas alternativas de recolección energética se han venido explorando en los últimos años, dado que son fuentes limpias con potencial para encender electrónicos de tamaño reducido. Hou et al. (2019), presentan un estudio desarrollado sobre péndulos rotacionales que aprovechan el movimiento de las personas para encender dispositivos electrónicos mediante generadores triboeléctricos, al aprovechar vibraciones producidas por actividades humanas con frecuencias menores a 10 Hz.

En los últimos tiempos, con el vertiginoso progreso de las redes de sensores inalámbricos y el internet de las cosas (IoT), se ha utilizado una amplia variedad de dispositivos electrónicos pequeños, como: identificación por radiofrecuencia, sistemas de posicionamiento global, sensores infrarrojos y otros dispositivos electrónicos de baja potencia para conectar todos los elementos a una misma red, para una fácil gestión e identificación. Con un bajo consumo de energía, estos pequeños componentes electrónicos pueden funcionar con baterías convencionales. Sin embargo, es difícil o incluso imposible recargar las baterías en los pequeños dispositivos electrónicos cuando están distribuidos en lugares de difícil acceso o se presentan en cantidades grandes.

### 3. Conceptos y selección de diseño

Antes de diseñar o realizar cálculos se debe seleccionar una opción de generación para el mecanismo de entre las opciones que existen. Tras investigar y analizar la bibliografía correspondiente las alternativas de generación eléctrica más conocidas y aplicables al proyecto son las siguientes:

- **Mecanismo piezoeléctrico**

Los materiales piezoeléctricos son un subconjunto de un grupo de materiales conocidos como ferroeléctricos, que contienen un dipolo eléctrico debido a su estructura molecular que crea una separación de carga local cuando el material se filtra (Dong, et al., 2019).

El enfoque de recolección de energía “piezoeléctrico” basado en vibraciones, utiliza las propiedades piezoeléctricas de una cierta clase de materiales multifuncionales, lo que da como resultado una carga eléctrica que se produce cuando el material se deforma mecánicamente. Además, este mecanismo, puede convertir las vibraciones mecánicas directamente en energía eléctrica sin una fuente externa para iniciar la conversión de energía. El escalado de la potencia con el volumen también favorece a los recolectores de energía piezoeléctrica en escalas más pequeñas.

Sin embargo, los desafíos de implementar el enfoque piezoeléctrico están en que limita el rendimiento general de los recolectores de energía piezoeléctricos a pequeña escala. Además, la eficiencia para la recolección de energía piezoeléctrica está limitada en última instancia por las propiedades piezoeléctricas de los materiales empleados, y la impedancia de salida de los recolectores de energía piezoeléctrica es típicamente muy alta ( $> 100 \text{ k}\Omega$ ), lo que corresponde a corrientes eléctricas bajas, aunque el método piezoeléctrico es capaz de producir voltajes de salida relativamente altos (Dagdeviren, Li, & Wang, 2019).

*Ventajas:*

- Convierte las vibraciones mecánicas directamente en energía eléctrica.
- Estructura simple.
- Densidad energética alta.
- No se necesita una fuente de voltaje separada.
- No se necesita topes mecánicos.
- Voltaje de salida alto.

- **Mecanismo electromagnético**

Basado en el principio fundamental de la ley de inducción electromagnética de Faraday, los recolectores de energía electromagnética se diseñan utilizando el movimiento relativo de un conductor eléctrico en un campo magnético, de modo que el movimiento de un campo magnético en relación con una bobina conductora hace que la corriente fluya en la bobina (Dong, et al., 2019).

Un recolector de energía electromagnética típico consiste en una bobina de alambre unida a la masa conectada a un resorte. Cuando la carcasa rígida vibra, la masa se mueve con respecto a la carcasa rígida de modo que la bobina se mueve a través del campo del imán permanente, que a su vez induce un voltaje en la bobina.

La principal ventaja de los recolectores de energía electromagnética es su rendimiento confiable, porque solo dependen de la velocidad relativa y el cambio en el flujo magnético para generar electricidad y el sistema se puede diseñar fácilmente sin la necesidad de contacto mecánico (Dagdeviren, Li, & Wang, 2019).

*Desventajas:*

- Acoplamiento deficiente (películas delgadas).
- Impedancia de salida alta.
- Corriente de salida baja.
- Fugas de carga.
- Eficiencia baja

Sin embargo, para la recolección de energía electromagnética es posible que no se reduzca favorablemente al tamaño micro porque la potencia está limitada por las interacciones de las bobinas y los imanes a medida que se reduce la escala. Esto se debe a que la energía mecánica en la energía electromagnética Los dispositivos están asociados con el movimiento de una masa a través de una cierta distancia, trabajando contra una fuerza de amortiguación.

*Ventajas:*

- Dispositivo más confiable.
- No se necesita una fuente de voltaje separada. Corriente de salida alta.
- No se necesita topes mecánicos.

*Desventajas:*

- Voltaje de salida bajo.
- Difícil de integrar con electrónica y microsistemas.

- **Mecanismo triboeléctrico**

El principio fundamental del generador triboeléctrico radica en la migración de cargas eléctricas entre dos materiales. Cuando dos materiales están en contacto, las cargas (por ejemplo, electrones, iones y / o moléculas) de uno pueden transferirse al otro para equilibrar su potencial electroquímico. Cuando los materiales se separan unos de otros, algunos átomos tienden a enviar electrones adicionales y otros tienden a retenerlos. Por lo tanto, se crea una diferencia de potencial eléctrico entre los dos materiales y las cargas triboeléctricas en las superficies dieléctricas se activan para formar una corriente de electrones para igualar la diferencia de potencial eléctrico (Dong, et al., 2019).

Dado que el dispositivo se basa en un efecto triboeléctrico que casi puede ocurrir, en diferente medida, entre dos materiales cualesquiera, existen abundantes opciones de material que se pueden

utilizar para construir el dispositivo. Esta gran selección de materiales permite que el dispositivo se utilice en una amplia gama de entornos, como en un entorno biológico vivo cuando se utiliza material biocompatible (Dagdeviren, Li, & Wang, 2019).

Además, no solo se puede reducir a microescala para proporcionar una fuente de energía para dispositivos electrónicos en miniatura, sino que también se ha demostrado que recolecta la energía de fuentes mucho más grandes.

Sin embargo, tiende a tener una menor durabilidad y estabilidad ya que depende del contacto físico entre dos superficies. Además, el rendimiento del dispositivo depende demasiado del entorno, como la humedad.

*Ventajas:*

- Alta eficiencia de conversión.
- Método de fabricación fácil y de bajo costo.
- Amplias opciones de materiales.

*Desventajas:*

- Menor durabilidad y estabilidad.
- Corriente de salida baja.
- Demasiado dependiente de factores ambientales como la humedad.

Para una buena selección se recurrió a la metodología de criterios ponderados para poder seleccionar la mejor opción basados en información presentadas con anterioridad.

*Tabla 1. Subsistema 1: Generación.*

Requerimiento	Especificación	Función	Opciones	Opción seleccionada
Generación	- 3.3 Voltios - 20 Wh/día	Generar energía eléctrica a partir de vibraciones de vacas y caballos	-Mecanismo Piezoeléctrico.  -Mecanismo electromagnético.  -Mecanismo triboeléctrico.	Mecanismo Electromagnético

En cuanto a lo que respecta a generación, consiste en la selección del método o mecanismo de transducción que se empleara para producir energía. Las opciones consisten en tres mecanismos: piezoeléctrico, electromagnético y triboeléctrico. Para la elección de cuál es el mecanismo que mejor se acopla a los parámetros, se utilizó criterios ponderados. Esto se muestra a continuación:

Tabla 2. Soluciones propuestas para el mecanismo de transducción.

<b>Solución A</b>	Piezoeléctrico
<b>Solución B</b>	Electromagnético
<b>Solución C</b>	Triboeléctrico

Tabla 3. Criterios de Valoración para el mecanismo de generación y la prioridad de cada una de las soluciones frente a cada criterio.

<u>Criterios de valoración</u>		<u>Prioridad</u>		
		<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>a</b>	Potencia máxima	3	2	1
<b>b</b>	Eficiencia	2	1	1
<b>c</b>	Voltaje de salida	2	1	3
<b>d</b>	Tamaño menor	1	2	3
<b>e</b>	Facilidad de manufactura	3	2	1
<b>f</b>	Costo bajo	3	1	2
<b>g</b>	Durabilidad	2	1	2

Tabla 4. Criterios ponderados para selección de mecanismo de transducción.

<i>Potencia máxima = Eficiencia &gt; Voltaje de salida = Durabilidad &gt; Tamaño = Facilidad de manufactura &gt; Costo</i>									
<b>Criterio</b>	<i>Potencia máxima</i>	<i>Eficiencia</i>	<i>Voltaje de salida</i>	<i>Durabilidad</i>	<i>Tamaño</i>	<i>Manufactura</i>	<i>Costo</i>	$\Sigma^+$	<i>Ponderada</i>
<i>Potencia máxima</i>		0.5	1	1	1	1	1	6.5	0.232
<i>Eficiencia</i>	0.5		1	1	1	1	1	6.5	0.232
<i>Voltaje de salida</i>	0	0		0.5	1	1	1	4.5	0.161
<i>Durabilidad</i>	0	0	0.5		1	1	1	4.5	0.161
<i>Tamaño</i>	0	0	0	0		0.5	1	2.5	0.089

<i>Facilidad Manufactura</i>	0	0	0	0	0.5		1	2.5	0.089
<i>Costo</i>	0	0	0	0	0	0		1	0.036
						Suma		28	1.000

### Opción Seleccionada

Debido a las aplicaciones amplias y eficientes en lo que consta al método electromagnético, por método de criterios ponderados se elige ese método para la obtención de energía.

*Tabla 5. Selección de la opción prioritaria para el mecanismo de generación utilizando el método de criterios ponderados.*

<b>Conclusiones</b>	<b>Potencia máxima</b>	<b>Eficiencia</b>	<b>Voltaje de salida</b>	<b>Durabilidad</b>	<b>Tamaño</b>	<b>Manufactura</b>	<b>Costo</b>	<b><math>\Sigma</math></b>	<b>Prioridad</b>
<i>solución A</i>	0.0387	0.0387	0.0402	0.0268	0.0298	0.0446	0.0060	0.2247	3
<i>solución B</i>	0.0774	0.0967	0.0804	0.0536	0.0446	0.0298	0.0179	0.4003	1
<i>solución C</i>	0.1161	0.0967	0.0402	0.0804	0.0149	0.0149	0.0119	0.3750	2

Una vez seleccionado el mecanismo de generación eléctrica en función de la tabla anterior se puede proceder con el diseño y cálculos correspondientes por lo que en la Figura 1 presentada a continuación se ejemplifica la arquitectura del proyecto de modo conceptual y prototipo que se busca producir.

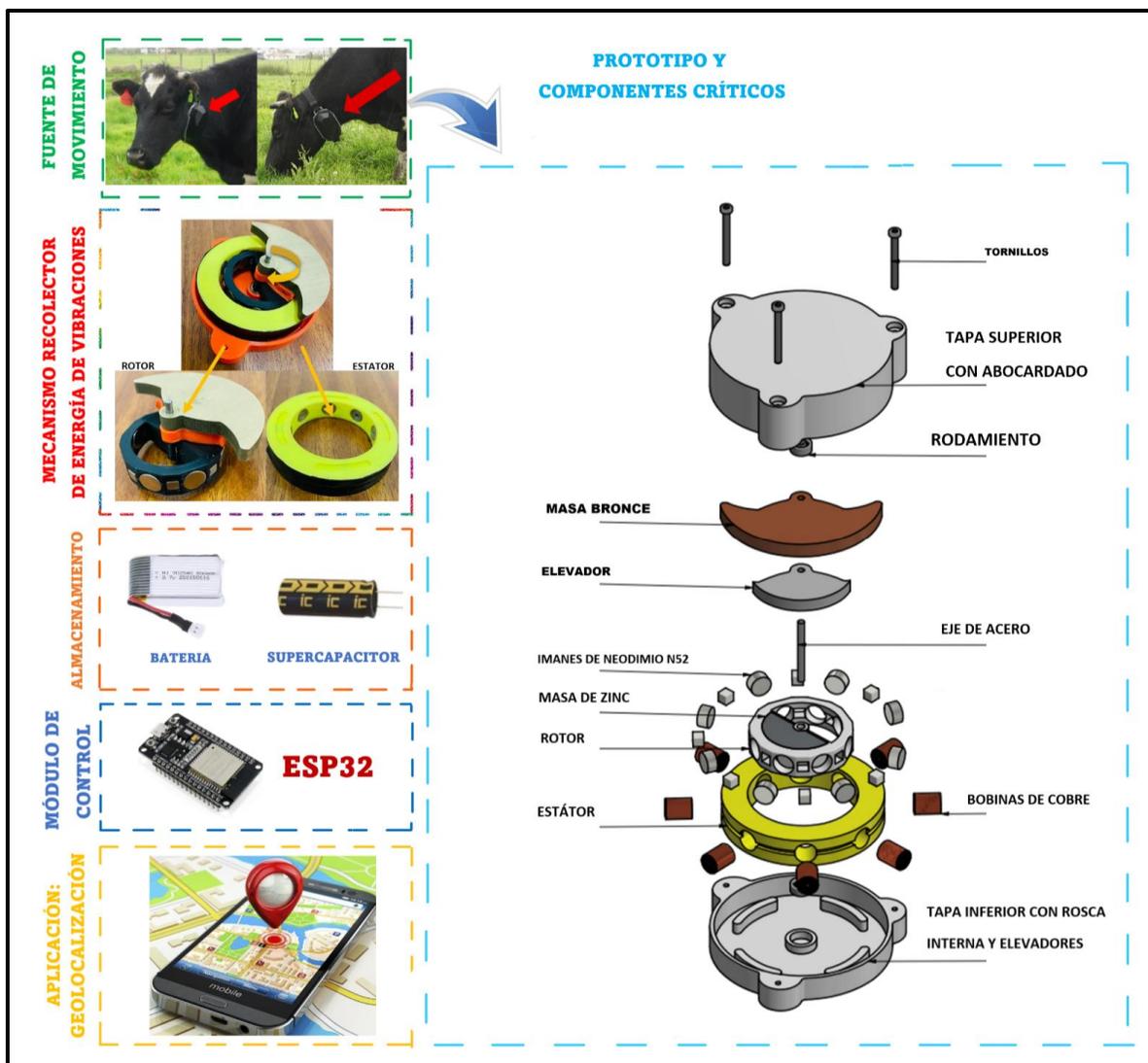


Figura 1. Arquitectura general del proyecto.

La solución propuesta a nivel conceptual consiste en un sistema rotativo que funciona bajo las leyes de un péndulo físico al cual ira incorporado imanes en la masa rotativa y bobinas en el cuerpo fijo. Gracias al vaivén producido por los movimientos de los animales se genera una interacción electromagnética entre el campo magnético de imanes con bobinas produciendo así una corriente eléctrica. Dicha energía se almacena y se distribuye al microprocesador encargado de la geolocalización.

Dicho mecanismo tiene como componente crítico a la masa rotativa o rotor debido a que la eficacia del proyecto depende de este componente, en este elemento debe adaptarse imanes en una posición que maximice la interacción electromagnética, también contiene una masa externa que debe proporcionar el suficiente peso para que el rotor gire, pero a su vez este no debe excederse dado que el péndulo se mantendría estático. Adicionalmente el ajuste con el eje siempre debe ser el adecuado y el material a elegir debe satisfacer los requerimientos del cliente.

Otro componente crítico del mecanismo son las bobinas, estas son fundamentales para la generación eléctrica dado que debe tener las vueltas exactas para alcanzar la resistencia requerida, pero a su vez deben ser hechas en un calibre de alambre muy delgado lo cual dificulta su fabricación.

A su vez es importante la carcasa del mecanismo dado que este componente se encargará de mantener al sistema interior libre de polvo o líquido dado que su ingreso compromete la vida útil de los imanes o bobinas. Por lo cual el diseño y materia de esto es crítico.

En cuanto a tamaño este mecanismo será de tamaño portable, que no interferirá con las actividades del animal, planea colocarlo en la zona del cuello por lo que no debe interferir cuando esta zona gire o se estire. Se estima que el modelo a realizar en una fase de prototipo será un tipo cilindro que medirá alrededor de 10 cm de diámetro y 5 cm de alto. El peso sí es algo fundamental dado que de esto dependerá el confort del animal, de acuerdo con Zhang et al (2021) un animal puede soportar el 2% de su peso basado en una teoría heurística ampliamente aceptada. Dado que una vaca pesa en promedio 600 kilogramos (botanical online, 2021) este animal puede soportar 12 kilos en el cuello lo cual brinda un límite superior teórica al cual considerar en el diseño para no afectar al animal.

Respecto a costos, se han realizado varias proformas y se estima que la ejecución del mecanismo de generación eléctrica a partir de vibraciones animales tiene los siguientes costes:

Tabla 6. Precio estimado del mecanismo basado en proformas.

Componente	Precio [USD]	Proveedor
Rodamientos	6	Edwin Nasimba
Estructuras con impresión 3D	28	Oscar Morales
Eje en Acero Inoxidable	12	Jorge Sotomayor
Imanes de Neodimio N52	28	Jessica Zorrilla
Bobinas en alambre calibre 36	72.8	Industrias Logacho
<b>Total</b>	<b>146.8</b>	

Si se desea un detalle más a profundidad de los proveedores y precios en el apartado de apéndices se encuentra dichos documentos.

## 4. Gestión del proyecto

### Cronograma Inicial

En la Figura 2 se puede observar el Cronograma inicial para el desarrollo del proyecto:

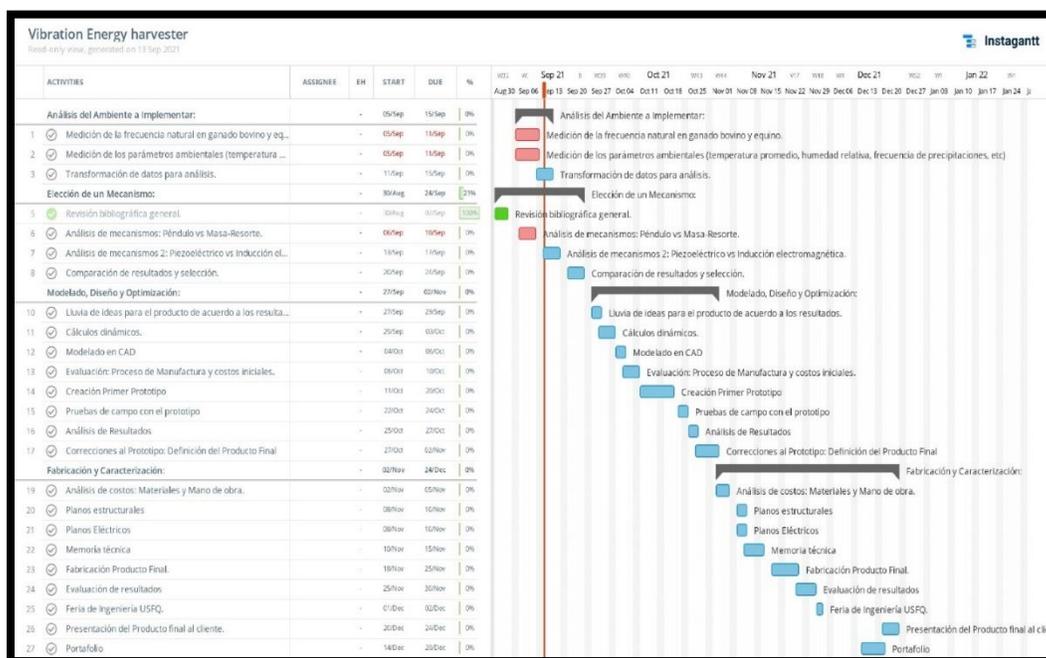


Figura 2. Cronograma inicial para el desarrollo del proyecto.

## Ruta Crítica

Tras analizar el diagrama de Gantt presentado en la figura anterior, se ha identificado que la tarea 14 la cual se refiere a la creación del primer prototipo es una actividad de riesgo potencial, dado que el desarrollo del proyecto a futuro depende de esta tarea en concreto. Los componentes utilizados para el ensamblaje respectivo son muy específicos y limitados, donde en la mayoría de los casos es necesaria realizar importaciones. En consecuencia, es necesario enlistar y priorizar los componentes que requieren ser importados y realizar los pedidos a tiempo, al igual que poseer varios proveedores para asegurarse de la disponibilidad de algún componente.

## Cronograma Actualizado

En la Figura 3, se puede observar el Cronograma actualizado para el desarrollo del proyecto:



Figura 3. Cronograma actualizado para el desarrollo del proyecto.

Como se puede observar de la figura anterior, se ha completado la mitad de las asignaciones. Además, se han actualizado las fechas de las tareas restantes debido a pequeños retrasos que se han tenido justamente por la ruta crítica anteriormente descrita. La creación del

prototipo hizo que se desfasen estas fechas, pero se continúa en un tiempo pertinente para completar el resto de las tareas. Lo cual se estima que el progreso vaya con las fechas actualizadas, para un buen desarrollo y finalización del proyecto.

### **Presupuesto**

El proyecto estará financiado por dos partes. La primera, es la Universidad San Francisco de Quito cuyo presupuesto es de \$300 dólares. Y, por otra parte, el cliente NBC Maschinenbau de igual forma otorgará un presupuesto de \$300 dólares. En total, se puede invertir un total de \$600 dólares.

## **5. Normas Ingenieriles Seleccionadas**

**IPC 7351:** Requisitos genéricos para el diseño de montaje en superficie y el estándar de patrón de terreno (INDUSTRIES, 2005).

Provee los tamaños, formas y tolerancias para el ensamblaje de electrónicos. Es aplicable al proyecto “Dispositivo generador de energía por medio de vibraciones” debido a que se requiere la fabricación de un prototipo de tamaño pequeño por lo que para lograrlo se utilizará un circuito impreso que cumpla con los estándares establecidos.

**ISO 9000:** Control de calidad y gestión de calidad aplicable a actividades orientadas a la producción de bienes o servicio (ISO, 2005).

Es adaptable al proyecto dado que se va a fabricar un producto que debe satisfacer los requerimientos del cliente y se debe considerar los estándares del mercado o productos que van en

la misma línea.

**INEN 003:** Esta norma establece las disposiciones referentes a la representación en dibujos de piezas mecánicas y sus conjuntos (Normalización., 2001).

El prototipo elaborado requerirá la elaboración de planos de taller para la fabricación de cada uno de los componentes y plano de conjunto para un correcto ensamble. Es por ello por lo que se necesita de esta norma, para poder representar de forma correcta en cada plano: detalles, secciones, cortes, dimensiones, entre otras. Que servirá para una clara interpretación del modelo diseñado.

**IEC:** Estándares internacionales para todas las tecnologías eléctricas, electrónicas y relacionadas (Commission, 2005).

El prototipo elaborado requerirá la elaboración de planos de taller para la fabricación de cada uno de los componentes y plano de conjunto para un correcto ensamble. Es por ello por lo que se necesita de esta norma, para poder representar de forma correcta en cada plano: detalles, secciones, cortes, dimensiones, entre otras. Que servirá para una clara interpretación del modelo diseñado.

**IEC 60529:** Norma de grados de protección proporcionados por los contenedores que resguardan los materiales eléctricos de un equipo (IEC, 2001)

Es aplicable porque se realizarán ensayos para determinar la hermeticidad de sólidos y líquidos de la envolvente.

## 6. Selección del material y componentes

El proyecto se divide en cuatro subsistemas que se presentan resumidos en un diagrama a continuación:

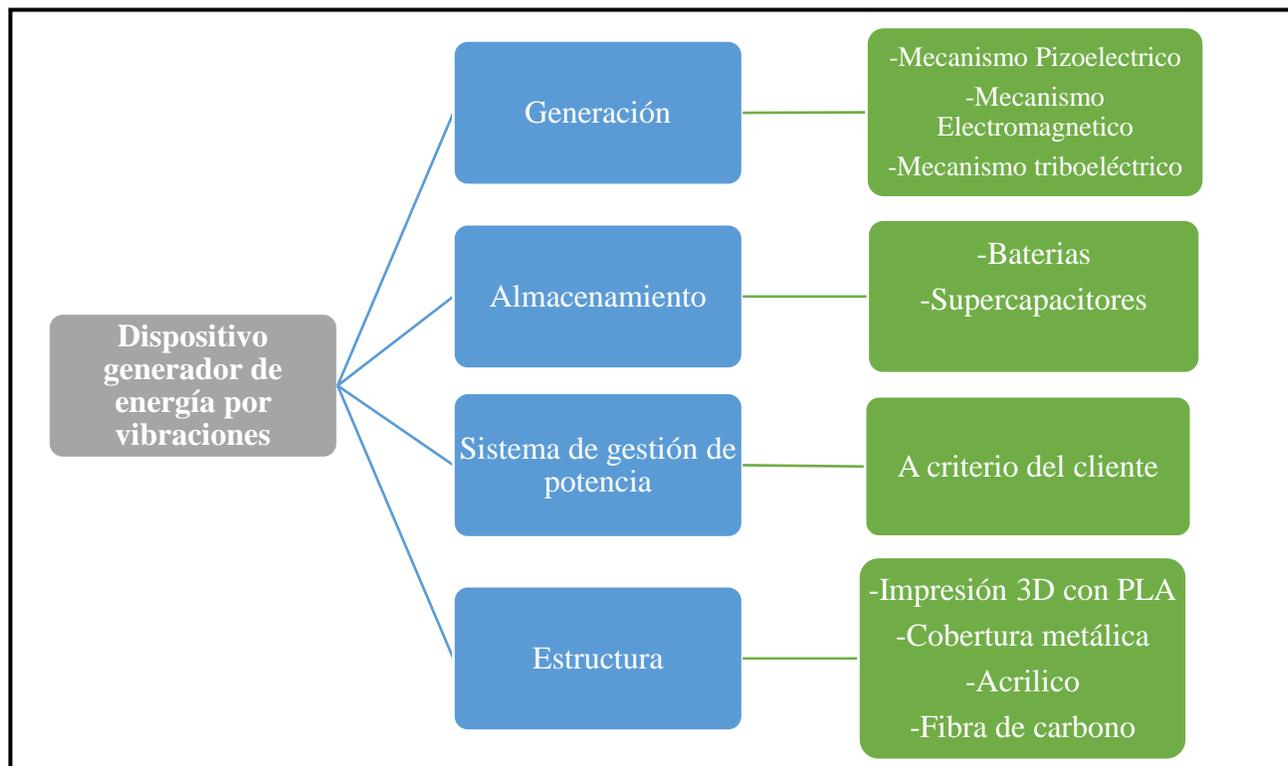


Figura 4. Diagrama con los subsistemas que conforman al dispositivo por diseñar.

En cuanto a la generación, como bien se describió en la sección de selección de diseño la opción a ser usada es el mecanismo electromagnético.

- **Almacenamiento**

Tabla 7. Subsistema 2: Almacenamiento.

Requerimiento	Especificación	Función	Opciones	Opción seleccionada
---------------	----------------	---------	----------	---------------------



		descarga						
Capacidad de almacenaje		1	1	1	1	1	6	0.286
Ciclos de carga y descarga	0		0.5	0.5	1	1	4	0.190
Densidad energética	0	0.5		0.5	1	1	4	0.190
Eficiencia	0	0.5	0.5		1	1	4	0.190
Costo	0	0	0	0		1	2	0.095
eco-friendly	0	0	0	0	0		1	0.048
						Suma	21	1.000

### Opción Seleccionada

Como se puede ver en la tabla 11, la Solución C (Supercapacitores) es la que presenta mayor ventaja. Estos componentes son diariamente usados en electrónicos como dispositivos portables.

Tabla 11. Selección de la opción prioritaria utilizando el método de criterios ponderados.

Conclusiones	Capacidad de almacenaje	Ciclos de carga y descarga	Densidad energética	Eficiencia	Costo	eco-friendly	$\Sigma$	PRIORIDAD
Solución A	0.0571	0.0476	0.0571	0.0476	0.0143	0.0071	0.2310	3
Solución B	0.1000	0.0762	0.0571	0.0476	0.0143	0.0143	0.3095	2
Solución C	0.0286	0.0190	0.0190	0.0190	0.0286	0.0071	0.1214	4
Solución D	0.1000	0.0476	0.0571	0.0762	0.0381	0.0190	0.3381	1

- **Sistema de Gestión de Potencia**

Este subsistema, está encargado el cliente “NBC Maschinenbau”. Debido a que es su área de especialización (Rectificar y estabilizar la señal).

Tabla 12. Subsistema 3: Gestión de Potencia.

Requerimiento	Especificación	Función	Opciones	Opción seleccionada
Sistema de gestión de potencia		Rectificar la señal.		A criterio del cliente.

	Rectificar y estabilizar la señal.	Distribuir la energía. Transformar de AC a DC.	A discreción del cliente.	
--	------------------------------------	---	---------------------------	--

- **Estructura**

*Tabla 13. Subsistema 4: Estructura.*

Requerimiento	Especificación	Función	Opciones	Opción seleccionada
Estructura	-Resistente a influencias ambientales.  -Resistente a golpes.	Proteger el mecanismo y componentes electrónicos	-Carcasa metálica  -Carcasa impresa con PLA.  -Carcasa de acrílico.  -Carcasa en fibra de carbono.	Carcasa de PLA

En el subsistema de estructura, se analiza el material que posee las mejores propiedades mecánicas para que la estructura en donde se almacena todo el dispositivo sea duradera y resistente a todo tipo de factor (golpe, climático, entre otras). A continuación, se muestra el método de criterios ponderados realizado para este subsistema:

*Tabla 14. Soluciones propuestas para la estructura del prototipo.*

<b>Solución A</b>	Acero inoxidable
<b>Solución B</b>	Acrílico
<b>Solución C</b>	PLA
<b>Solución D</b>	Fibra de carbono

*Tabla 15. Criterios de Valoración para la estructura del prototipo y la prioridad de cada una de las soluciones frente a cada criterio.*

<b>Criterios de valoración</b>		<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
<b>a</b>	Costo menor	3	1	2	4
<b>b</b>	Resistencia a la corrosión	2	1	1	1
<b>c</b>	Resistencia al desgaste	2	4	3	1
<b>d</b>	Densidad (menor)	4	2	3	1

<b>e</b>	Versatilidad	3	1	2	4
<b>f</b>	Resistencia al calor	1	4	3	2
<b>g</b>	Elasticidad	2	3	2	1

Tabla 16. Criterios ponderados para selección estructura externa del prototipo.

<i>Resistencia al desgaste = Resistencia a la corrosión &gt; Versatilidad = Costo &gt; Resistencia al calor = Elasticidad &gt; Densidad</i>									
<b>Criterio</b>	<i>Resistencia al desgaste</i>	<i>Resistencia a la corrosión</i>	<i>Versatilidad</i>	<i>Costo</i>	<i>Resistencia al calor</i>	<i>Elasticidad</i>	<i>Densidad</i>	$\Sigma+I$	<i>Ponderada</i>
<i>Resistencia al desgaste</i>		0.5	1	1	1	1	1	6.5	0.232
<i>Resistencia a la corrosión</i>	0.5		1	1	1	1	1	6.5	0.232
<i>Versatilidad</i>	0	0		0.5	1	1	1	4.5	0.161
<i>Costo</i>	0	0	0.5		1	1	1	4.5	0.161
<i>resistencia al calor</i>	0	0	0	0		0.5	1	2.5	0.089
<i>Elasticidad</i>	0	0	0	0	0.5		1	2.5	0.089
<i>Densidad</i>	0	0	0	0	0	0		1	0.036
							Suma	28	1.000

### Opción Seleccionada

Basado en el análisis de criterios ponderados la opción ganadora es la carcasa de PLA.

Tabla 17. Selección de la opción prioritaria para la estructura utilizando el método de criterios ponderados.

<b>Conclusiones</b>	<i>Desgaste</i>	<i>Corrosión</i>	<i>Calor</i>	<i>Elasticidad</i>	<i>Versatilidad</i>	<i>Densidad</i>	<i>Costo</i>	$\Sigma$	<b>PRIORIDAD</b>
<b>Solución A</b>	0.0696	0.0232	0.0357	0.0223	0.0321	0.0036	0.0321	0.2188	4
<b>Solución B</b>	0.0232	0.0696	0.0089	0.0089	0.0643	0.0223	0.0643	0.2616	2
<b>Solución C</b>	0.0696	0.0696	0.0179	0.0223	0.0482	0.0357	0.0482	0.3116	1
<b>Solución D</b>	0.0696	0.0696	0.0268	0.0357	0.0161	0.0223	0.0161	0.2563	3

## 7. Diseño de Manufactura

### Listado de Componentes

A continuación, se listan los componentes que se requieren fabricar para poder llevar a cabo el proyecto:

Tabla 18. Lista de componentes a fabricar.

Componente	Numero	Tecnología empleada para la manufactura	Material Empleado
Rotor	1	Impresión 3D	Filamento PLA
Estátor	1	Impresión 3D	Filamento PLA
Tapa superior	1	Impresión 3D	Filamento PLA
Tapa Inferior	1	Impresión 3D	Filamento PLA
Eje de Acero	1	Torno	Acero K10
Masa del rotor	1	Fundición en molde de arena	Zinc
Carcasa	1	Impresión 3D	Filamento PLA
Base Carcasa	1	Impresión 3D	Filamento PLA

### Diagramas de Flujo de Componentes

Antes de describir cada proceso de fabricación se presenta la simbología a utilizar en los diagramas de proceso de fabricación y que representa cada una.



Figura 5. Simbología usada en los diagramas de procesos de fabricación.

- **Masa de Zinc**

Para fabricar este componente se inicia obteniendo la materia prima, en este caso el Zinc se obtuvo de los contrapesos empleados en los neumáticos para alinearlos y balancearlos los cuales fueron adquiridos en una vulcanizadora; luego se transporta el material al laboratorio

en donde se realiza la extracción de un componente de acero con el que cuenta la pesa que sirve de aditamento para el aro, esto con la finalidad de obtener zinc puro y evitar materiales ferromagneticos en la fundición. Luego se entra en un proceso de espera mientras a la par se prepara el molde de arena para la fundición; empleando como primer paso un molde prefabricado de madera con el que se cuenta en el laboratorio, al cual se lo limpia y se prepara una mezcla de arena gruesa y areana fina en una proporción de 80:20 respectivamente. A la mezcla se le incorpora agua y se inicia la compactación dentro del molde hasta obtener la cavidad de la pieza a fundir. Una vez que la arena esta firme se procede a introducir el molde en el horno, encenderlo y esperar a que la temperatura llegue a 100 °C y permanezca en ese nivel un tiempo de 30 minutos para extraer el molde. Hecho esto se retira el objeto, se comprueba la calidad y nivel optimo del proceso de fundición, caso contrario se recomienda descartar y preparar otro molde con los pasos previamente mencionados. Continuando con el esquema se procede a solicitar permisos, informar y coordinar con los profesores para perpetuar el procedimiento. Con el respectivo visto bueno se inicia el proceso de fundición empleando el zinc procesado y el molde de arena. Realizada la fundición y con la seguridad del caso se verifica la pieza en busca de errores que no puedan ser corregidos con un proceso de maquinado posterior, con el fin de no volver a repetir nuevamente el proceso desde el inicio y conseguir su aprobacion; para posteriormente iniciar con el maquinado esmerilando donde se retira cualquier exceso o protuberancia encontrada en la pieza, es decir se realiza un trabajo grueso que una vez hecho es verificado pero al no ser apto para continuar debido a un desvaste excesivo se debe repetir la función; caso contrario si la pieza es optima se pasa al proceso de fresado en donde se trata el sobre dimensionamiento considerando la contracción del metal rebajándole a la altura y dimensiones requeridas. Acto seguido se procede a verificar el proceso

de fresado mediante medición para no descartar la pieza y repetir la función; dando continuidad al trabajo se realiza con el taladrado un medio orificio el cual si no es realizado con éxito se debe repetir los pasos previos. A partir de aquí se entra al trabajo fino en donde con una herramienta rotativa/dremel y el accesorio de desvaste se procede a corregir cualquier imperfección que no permita a la masa de Zinc entrar en la cavida del rotor para la cual fue diseñada y se verifica medidas y geometría. Si llega a existir un sobremaquinado que afecte gravemente a la masa nuevamente se debe repetir todo. Si la pieza es aprobada se pasa al pulido estetico que se lo realiza con lijas de grano mediano a fino repitiendo hasta que la masa obtenga un óptimo resultado y se termine el proceso.

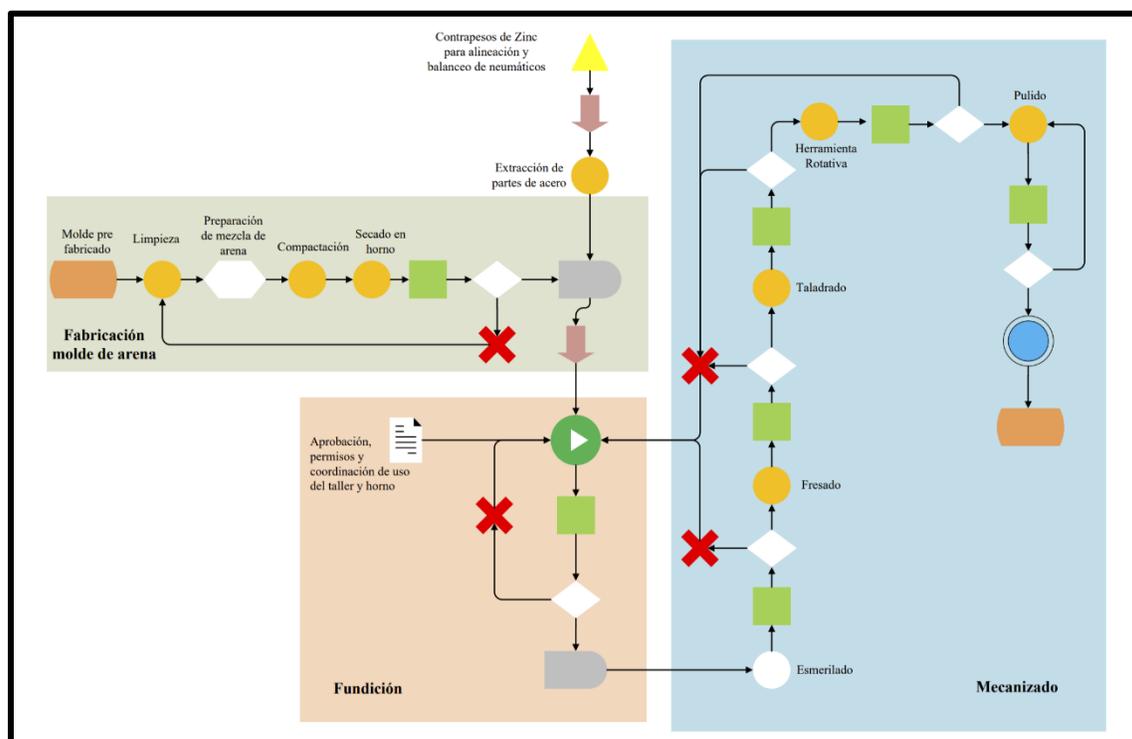


Figura 6. Diagrama de proceso de la fabricación de la masa de Zinc.

- **Eje de Acero**

Para realizar la fabricación del eje se requiere una barra de acero k10 debido a su disponibilidad en el mercado y buenas propiedades anticorrosivas; se transporta al taller y se entra en una fase de espera mientras se coordina con los profesores los permisos, horarios y uso del torno CNC. Una vez aprobado se procede a programar la actividad en el torno con los parámetros requeridos. Se inicia con un proceso de refrentado para que el extremo del eje sea uniforme y se eliminen cualquier imperfección producida en la fabricación o en el transporte. Se verifica que el procedimiento haya sido hecho con éxito caso contrario se lo repite. Si es exitoso se procede a realizar el clindrado de acuerdo al diámetro deseado y sus tolerancias para que entre en el rodamiento que se planea. Al acabar el procedimiento se verifica con calibrador o micrometro y se determina si se debe seguir maquinado o si existe un exceso de maquinado se debe repetir todo de nuevo. Si se tiene éxito y el maquinado cumple con lo deseado el proceso termina y se obtiene una pieza terminada.

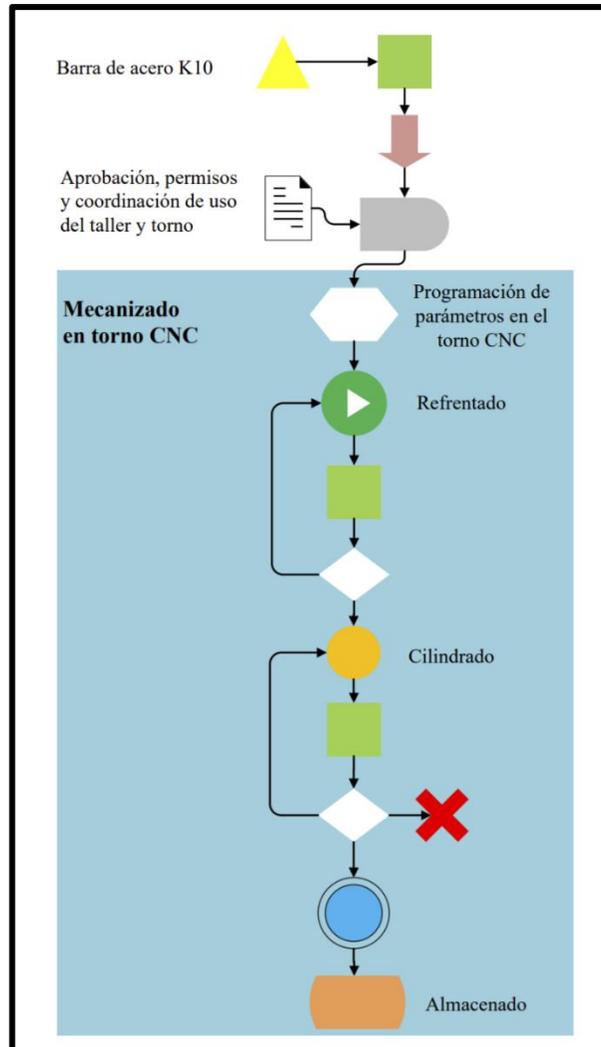


Figura 7. Diagrama de proceso de la fabricación del eje de acero.

- **Tapas, Estator, Carcasa y Base de Carcasa**

Tanto las tapas como el estátor llevan el mismo procedimiento. Para empezar, se consigue filamento para impresión en este caso se usó PLA. Este se lo transporta hasta el área de impresión y se entra en una fase de espera. A la par los diseños y modelos CAD son exportados a un formato compatible con la impresora. Una vez listo esto se realiza una prueba para determinar el nivel de contracción de la pieza, esto se lo realiza dado que usualmente cuando se imprime agujeros estos resultan más pequeños debido a que el plástico caliente a la salida del extrusor al enfriarse se

contrae, es por ello por lo que se debe sobre dimensionar ciertas geometrías. Una vez que se hacen las pruebas entra en fase de verificación, si las medidas que se imprimen no son las mismas que las del diseño requerido se procede a modificar el CAD hasta obtener las dimensiones solicitadas. Una vez realizadas las pruebas se procede a imprimir las piezas deseadas y una vez listas se verifica, si por alguna cuestión (accidente, mala operación, interrupción) el resultado no es lo esperado se debe repetir la impresión. Caso contrario, la fabricación ha finalizado.

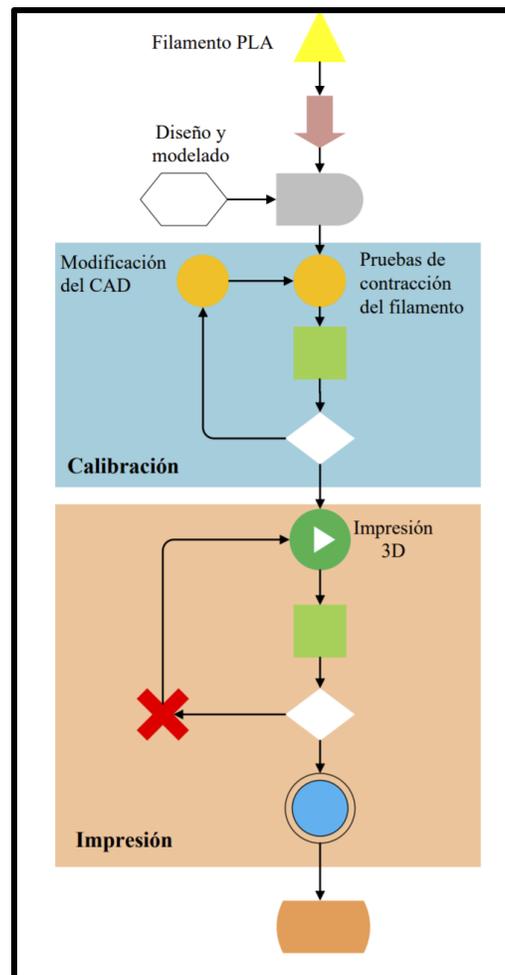


Figura 8. Diagrama de proceso de la fabricación de las tapas y estator.

- **Rotor**

Para la fabricación del rotor se tiene un procedimiento exactamente igual que las tapas y el estator. Se debe conseguir el filamento PLA, transportarlo al área de impresión y se entra en

fase de espera hasta que el diseño de rotor sea exportado al formato aceptado por la impresora, usualmente STL. Se entra en fase de pruebas para determinar el nivel de contracción del material, se realiza una prueba y se la verifica con calibrador. Si está mal se modifica el modelo del CAD hasta que se tenga una correcta disposición entre lo que se obtiene y lo que se diseña en software. Si todo está bien se procede a imprimir el rotor y una vez listo se verifica sus medidas e imperfecciones con calibrador. Si lo que se obtuvo no es lo esperado se repite la impresión. Si es lo esperado se entra en fase de maquinado. El rotor se diferencia de las demás piezas porque cuenta con varios agujeros de una medida específica para colocar los imanes, pero la impresora 3D no puede imprimir en el aire por lo que es necesario imprimir en estas zonas soportes y estos pueden resultar un tanto difíciles de extraer; razón por la cual se emplea una máquina rotativa dremel para limpiar los agujeros de los soportes y dejarlos a la medida exacta para que quepan los imanes. Una vez hecho esto se procede con la verificación, si se ha excedido con el maquinado la pieza es rechazada y debe repetirse la impresión nuevamente. Si todo está en orden este es el fin del proceso y se obtiene una pieza terminada.

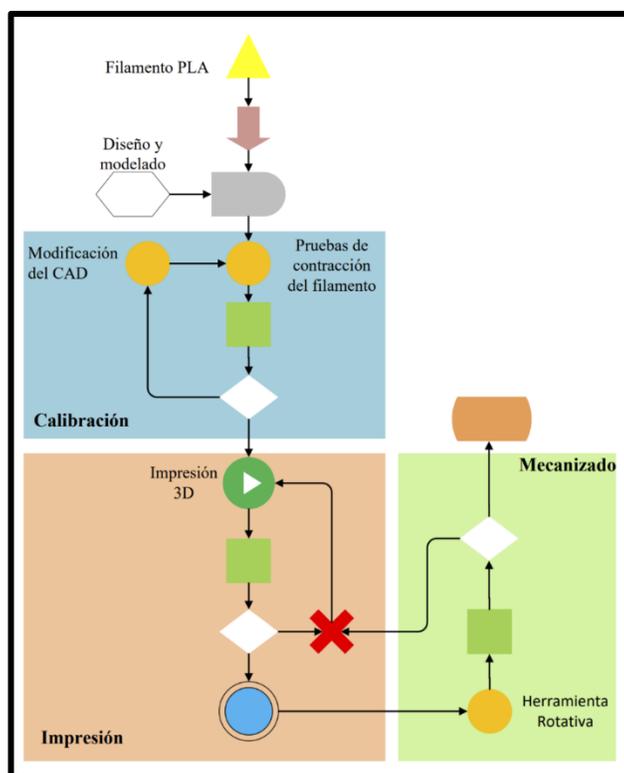


Figura 9: Diagrama de proceso de la fabricación del rotor.

## **Plan de Verificación de Tolerancias y Dimensiones de Manufactura**

Como se pudo ver en los diagramas de proceso siempre después de realizar una operación se pasa por una etapa de verificación o inspección en donde se mide y verifica si los resultados son aceptables.

Las practicas realizadas para la verificación y validación en estas etapas son:

- Modelado y Ensamble en Software

Esto es previo a la fabricación o puede considerarse en las fases de preparación. Se diseña cada uno de los componentes tomando en cuenta sus dimensiones, geometría e interacción con otras piezas y se los ensambla virtualmente para obtener una concepción del producto final en conjunto.

- Inspección visual y tacto

Tras cada operación se observa meticulosamente lo producido en donde se busca hallar cualquier imperfección o disconformidad que haga que la pieza sea rechazada debido a evidentes alteraciones de dimensiones o de forma afectando así a la funcionalidad de la pieza o de otra en la que influya.

- Medición tradicional y de precisión

Se mide la pieza y se comprueba las dimensiones con flexómetro, regla, etc. Pero en piezas que lo requieres se utiliza instrumentos de precisión como calibradores vernier o micrómetros.

Masa de Zinc

Tabla 19. Plan de inspección para masa de zinc.

Operación	Tipo de Inspección	Instrumento	Descripción	Notas
Preparación del Molde	Inspección Visual	Vista	Mediante tacto se siente la compactación de la arena buscando que esta al agruparla no se deshaga y mantenga una formapermante. Una vez secado en el Horno se busca una textura rígida en las paredes donde será vertido el metal.	
Fundición	Inspección Visual y Medición tradicional	Vista y Regla	Una vez fundida la pieza se busca que no exista presencia de burbujas o vacios en la pieza y que la geometría sea similar a la planeada. Se verifica medidas espedando tener el suficiente material para poder ser reducido en el mecanizado dado que la fundición se realiza con un sobredimensionamiento debid a la esperada contracción del metal.	
Esmerilado	Medición de precisión	Calibrador Vernier	Se retira cualquier protuberancia de metal producida por la fundición y se le da a la masa de zinc una forma de medio circulo de radio 18 mm en donde se permite 1-2 mm de sobredimensionamien en el mecanizado acabado para ser corregido con el dremel en el acabado fino	
Fresado	Medición de precisión	Calibrador Vernier	Se reduce la altura de la pieza a 11 mm en dodne el mecanizado debe ser con precisión dado que no se puede perdermucha masa. Se acepta 0.5 mm de tolerancia.	
Taladrado	Medición de precisión	Calibrador Vernier	Se busca un agujero de 3.5 mm que sea concéntrico al eje por lo que sobredimensionarlo 1 o 2 mm es aceptable dado que puede ser perfeccionado con el acabado fino	
Herramienta rotativa	Medición de precisión	Calibrador Vernier	Se busca obtener las medidas exactas a las diseñadas y la herramienta lo permite con la inserción de tiempo necesaria. Se acepta '0.5 mm de error en el desvastado. No puede hacer tolerancia positiva dado que no entraria en la pieza a la que va a estar dispuesta.	
Pulido	Inspección Visual	Vista	Se busca una buena aparicia superficial a la vista y al tacto.	

Eje de Acero

Tabla 20. Plan de inspección para eje de acero.

Operación	Tipo de Inspección	Instrumento	Descripción	Notas
Refrentado	Inspección Visual	Vista	Se busca una supercie de la cara del extremo del eje que sea uniforme en donde se elimine cualquier imperfección por golpe o defecto de fábrica	
Cilindrado	Inspección Visual y Medición de precisión	Calibrador vernier y micrómetro	Se busca obtener un cilindro de 33 mm de alto y 3 mm de diametro el cual tiene una tolerancia de $\pm 0.3$ mm	

Tapas y Estator

Tabla 21. Plan de inspección tapas y estator

Operación	Tipo de Inspección	Instrumento	Descripción	Notas
Calibración: Pruebas de contracción	Medición de precisión	Calibrador vernier	Se busca imprimir un cuerpo agujerado pequeño de muestra y medir que tan contraído se encuentra el agujero en relación al diseño. Se modificará e imprimirá la muestra hasta que la dimensión sea lo más exacta posible. No existe una tolerancia fija debido a que este efecto se produce a causa de varios factores.	
Impresión 3D final	Medición de precisión	Calibrador vernier	Se busca una pieza exacta o lo más cercana a la ideada en CAD en medidas exteriores. En agujeros se permite una tolerancia de + 0.5 mm como máximo, no existe tolerancia inferior debido a que no entrarían los componentes que van a ocupar esos orificios.	

Rotor

Tabla 22. Plan de inspección para rotor.

Operación	Tipo de Inspección	Instrumento	Descripción	Notas
Calibración: Pruebas de contracción	Medición de precisión	Calibrador vernier	Se busca imprimir un cuerpo agujerado pequeño de muestra y medir que tan contraído se encuentra el agujero en relación al diseño. Se modificará e imprimirá la muestra hasta que la dimensión sea lo más exacta posible. No existe una tolerancia fija debido a que este efecto se produce a causa de varios factores.	
Impresión 3D final	Medición de precisión	Calibrador vernier	Se busca una pieza exacta o lo más cercana a la ideada en CAD en medidas exteriores. En agujeros se permite una tolerancia de + 0.5 mm como máximo, no existe tolerancia inferior debido a que no entrarían los componentes que van a ocupar esos orificios.	
Herramienta Rotativa	Medición de precisión	Dremel con herramienta de pulido radial	Se busca eliminar cualquier imperfección de forma que no permita el montaje de las piezas que irían dentro de los orificios. Es decir residuos de elevadores o filamentos sueltos. Las tolerancias se mantienen respecto a el paso previo.	

Cabe mencionar que los responsables de cada tarea de verificación son el grupo entero debido a que muchas veces la medición o inspección es subjetiva entre individuos, es por ello por lo que las inspección y validación son realizadas por todos los integrantes.

## Calendario de Manufactura

La Figura 10 presenta el calendario de manufactura de cada uno de los componentes fabricados para la ejecución del proyecto con fechas, duración, inputs y responsables de las tareas en cada proceso y subproceso. Para la manufactura los indicadores de desempeño empleados fueron: Rendimiento, a razón de determinar la cantidad de productos que se podrían producir con las máquinas en un periodo de tiempo determinado; Horas-hombre/unidad, el cual es el cálculo de cuantas horas-hombre fueron invertidas en la producción de cada uno de los componentes del prototipo; Calidad, para determinar que el producto final sea capaz de cumplir con las especificaciones requeridas para un correcto ensamble sin retraso o retrabajo de los componentes.

## Hojas de proceso

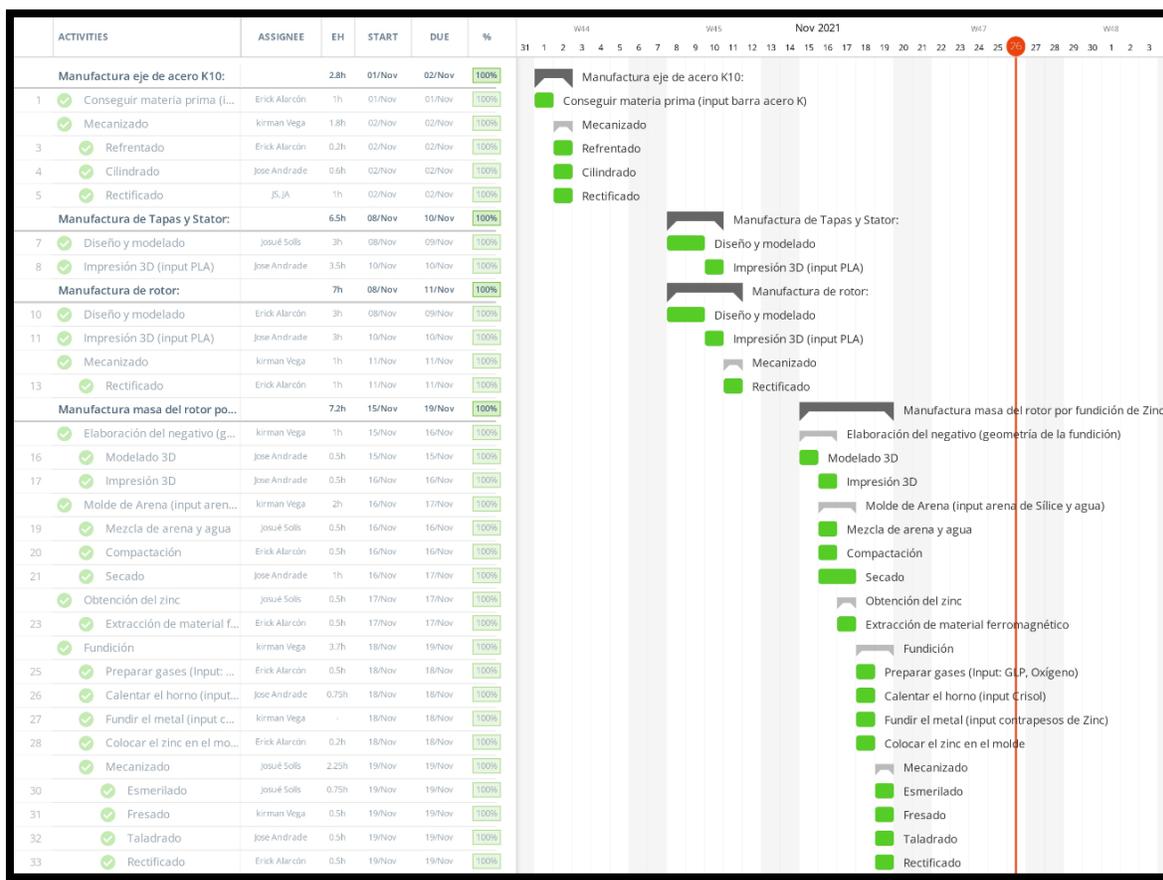


Figura 10. Calendario de Manufactura.

A continuación, se presentan las hojas de proceso de cada uno de las piezas. Las Tablas 23, 26, 29, 32, 34, 35 y 36 presentan el área de datos con los planos de las partes del producto con las tareas realizadas sobre cada componente, las herramientas empleadas y los responsables. Las Tablas 25, 28 y 31 son el área de descripción de los mecanizados realizados en las piezas sobre las superficies establecidas que lo necesiten con su respectiva herramienta de control y las condiciones de mecanizado, por ende, piezas que no requieran mecanizado no poseen esta área de descripción; y finalmente, las Tablas 8, 11 y 14 representan los tiempos y costes de los mecanizados empleados.

### Eje de acero

Tabla 23. Datos, plano y tareas ejercidas en el eje.

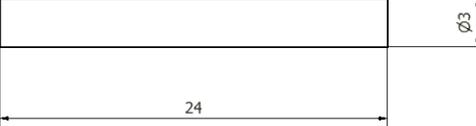
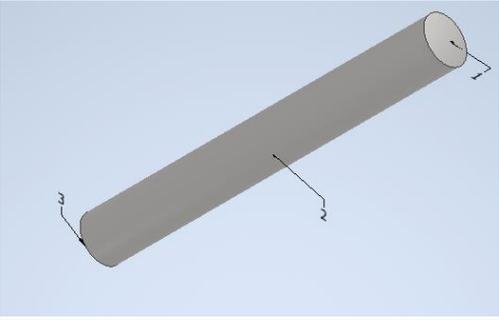
HOJA DE PROCESOS					
Conjunto	1	Material:	Acero K10		
Plano:	8	Dimensiones en bruto:			
Realizado	Josué Solís	Comprobado:	José Andrade		
Fecha:	01/11/2021	Código	2021.VEH8		
Cantidad:	1	Lugar de Fabricación	Taller mecánico		
Tareas		Herramientas		Operario	
Refrentar		Torno		Kirman Vega	
Cilindrar		Torno		Erick Alarcón	
Rectificar		Herramienta rotativa		José Andrade	

Tabla 24. Descripción de actividades, área de control y área de condiciones de mecanizado para el eje.

Esquema						
	Descripción			Pasada	Velocidad	Avance

Operación	Mecanizado	Superficie	Tipo	Herramienta de control	Herramienta de mecanizado	n°	A_p	Vg	N	Av
1	Refrentado	1	Desbaste	Calibrador	Torno CNC	1	1.5	220	420	0.1
2	Cilindrado	2	Acabado	Calibrador	Torno CNC	2	4	200	420	0.1
3	Refrentado	3	Desbaste	Calibrador	Torno CNC	1	1.5	220	420	0.1
4	Rectificado	2	Acabado	Calibrador	H. rotativa	10+	1.5	150	300	0.2

Tabla 25. Área de tiempos y costes para mecanizado del eje.

Operación	Tiempo (h)						Coste
	Tiempo de Máquina	Tiempo de acercamiento	Tiempo de cambio de condiciones	Tiempo de cambio de herramienta	Tiempo de verificación	Tiempo de preparación	
1	0.1	0.05	0.01	0	0.01	0	\$ 0.99
2	0.6	0.05	0.01	0	0.1	0	\$ 4.42
3	0.1	0.05	0.01	0	0.01	0	\$ 0.99
4	1	0.01	0	0	0.1	0	\$ 1.84
Total							\$ 8.24

### Masa de Zinc

Tabla 26. Datos, plano y tareas ejercidas en la masa de zinc.

HOJA DE PROCESOS			
Conjunto	1	Material:	Zinc
Plano:	3	Dimensiones en bruto:	
Realizado	Kirman Vega	Comprobado	Erick Alarcón
Fecha:	19/11/21	Código:	2021.VEH3
Cantidad:	1	Lugar de Fabricación	Taller mecánico

Tareas	Herramientas	Operario
--------	--------------	----------

Imprimir	Impresora 3D	Erick Alarcón
Preparar molde	Martillo, horno	Kirman Vega
Fundir	Horno, pinzas	José Andrade
Desbastar	esmeril, fresadora	Josué Solís
Cortar	Amoladora, cizalla	José Andrade
Perforar	Taladro	Kirman Vega
Rectificar	Herramienta rotativa	Josué Solís

Tabla 27. Descripción de actividades, área de control y área de condiciones de mecanizado para la masa de zinc.

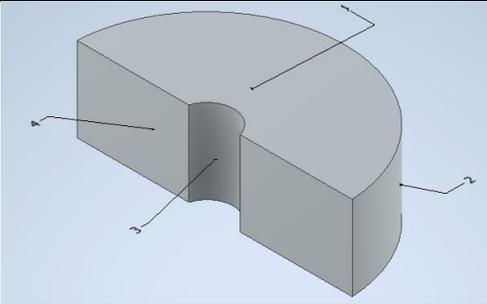
Esquema										
operación	Descripción			Herramienta de control	Herramienta de mecanizado	Pasada		Velocidad		Avance
	Mecanizado	Superficie	Tipo			n°	A_P	Vg	N	Av
1	Esmerilado	1,2,4	Desbaste	Calibrador	Esmeril	10+	1.5	220	350	0
2	Fresado	1	Desbaste	Calibrador	Fresa	1	4	200	420	0.1
3	Taladrado	3	Desbaste	Calibrador	Taladro	1	1.5	200	400	0.2
4	Rectificado	1,2,4	Acabado	Calibrador	Rotativa	10+	1.5	150	300	0.2

Tabla 28. Área de tiempos y costes para mecanizado de la masa de zinc.

	Tiempo (h)						Coste
	Tiempo de Máquina	Tiempo de acercamiento	Tiempo de cambio de condiciones	Tiempo de cambio de herramienta	Tiempo de verificación	Tiempo de preparación	
1	0.8	0.05	0.01	0	0.1	0	\$ 1.82
2	0.5	0.05	0.01	0	0.1	0	\$ 3.84
3	0.5	0.05	0.01	0	0.01	0	\$ 2.28
4	0.5	0.01	0.01	0.01	0.1	0	\$ 1.05

Total	\$ 8.99
-------	---------

## Rotor

Tabla 29. Datos, plano y tareas ejercidas en el rotor.

HOJA DE PROCESOS			
Conjunto	1	Material:	PLA
Plano:	2	Dimensiones en bruto:	
Realizado:	José Andrade	Comprobado:	Josué Solís
Fecha:	19/11/2021	Código:	2021.VEH2
Cantidad:	1	Lugar de Fabricación	Taller mecánico
Tareas		Herramientas	Operario
Imprimir		Impresora 3D	Josué Solís
Rectificar		Herramienta rotativa	Erick Alarcón

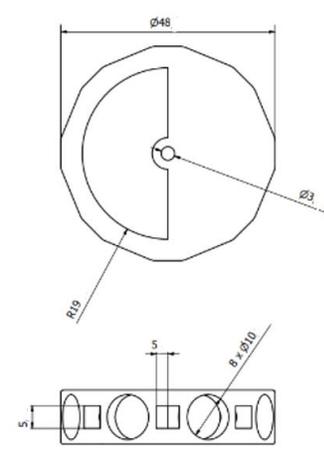


Tabla 30. Descripción de actividades, área de control y área de condiciones de mecanizado para el rotor.

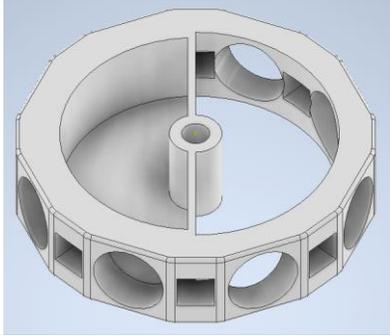
Esquema										
operación	Descripción			Herramienta de control	Herramienta de mecanizado	Pasada		Velocidad		Avance
	Mecanizado	Superficie	Tipo			n°	A_p	Vg	N	Av
1	Rectificado	Toda	Acabado	Calibrador	Rotativa	10+	1.5	150	300	0.2

Tabla 31. Área de tiempos y costes para mecanizado del rotor.

		Tiempo (h)					
	Tiempo de Máquina	Tiempo de acercamiento	Tiempo de cambio de	Tiempo de cambio de herramienta	Tiempo de verificación	Tiempo de preparación	Coste
1	0.5	0.01	0.01	0.01	0.1	0	\$ 1.05
						Total	\$ 1.05

Estator

Tabla 32. Datos, plano y tareas ejercidas en el estator.

HOJA DE PROCESOS			
Conjunto	1	Material:	PLA
Plano:	1	Dimensiones en bruto:	
Realizado:	José Andrade	Comprobado:	Josué Solís
Fecha:	19/11/2021	Código:	2021.VEH1
Cantidad:	1	Lugar de Fabricación	Taller mecánico
Tareas		Herramientas	Operario
Imprimir		Impresora 3D	Erick Alarcón

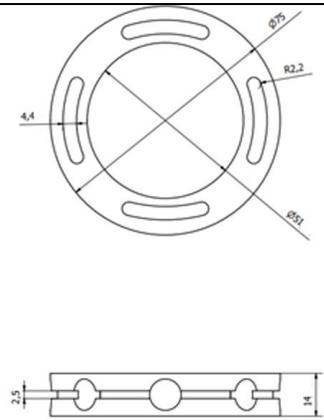
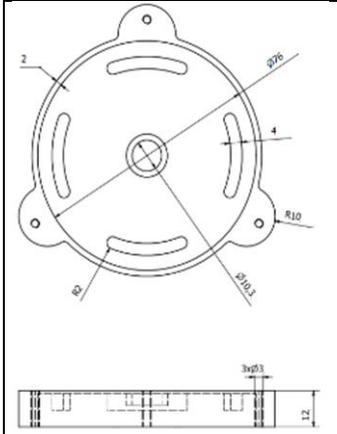

Tapa Inferior

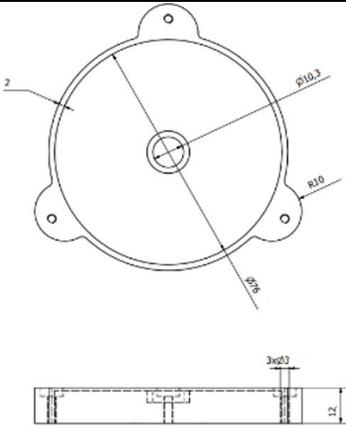
Tabla 33. Datos, plano y tareas ejercidas en la tapa inferior.

HOJA DE PROCESOS			
Conjunto	1	Material:	PLA
Plano:	4	Dimensiones en bruto:	
Realizado:	José Andrade	Comprobado:	Josué Solís
Fecha:	19/11/2021	Código:	2021.VEH4

Cantidad:	1	Lugar de Fabricación	Taller mecánico	
Tareas		Herramientas		Operario
Imprimir		Impresora 3D		José Andrade

### Tapa superior

Tabla 34. Datos, plano y tareas ejercidas en la tapa superior.

HOJA DE PROCESOS				
Conjunto	1	Material:	PLA	
Plano:	5	Dimensiones en bruto:		
Realizado:	José Andrade	Comprobado:	Josué Solís	
Fecha:	19/11/2021	Código:	2021.VEH5	
Cantidad:	1	Lugar de Fabricación	Taller mecánico	
Tareas		Herramientas		Operario
Imprimir		Impresora 3D		Kirman Vega

### Base carcasa de protección

Tabla 35. Datos, plano y tareas ejercidas en la tapa superior.

HOJA DE PROCESOS			
Conjunto	2	Material:	PLA
Plano:	10	Dimensiones en bruto:	
Realizado:	Erick Alarcón	Comprobado:	Kirman Vega

Fecha:	10/12/2021	Código:	2021.VEH10	
Cantidad:	1	Lugar de Fabricación	Taller mecánico	
Tareas		Herramientas	Operario	
Imprimir		Impresora 3D	Erick Alarcón	

### Carcasa de protección

Tabla 36. Datos, plano y tareas ejercidas en la tapa superior.

HOJA DE PROCESOS				
Conjunto	2	Material:	PLA	
Plano:	11	Dimensiones en bruto:		
Realizado:	Erick Alarcón	Comprobado:	Kirman Vega	
Fecha:	19/11/2021	Código:	2021.VEH11	
Cantidad:	1	Lugar de Fabricación	Taller mecánico	
Tareas		Herramientas	Operario	
Imprimir		Impresora 3D	Erick Alarcón	

## 8. Informe de diseño

En esta sección, se detallarán las principales dimensiones del prototipo además del diseño de los subcomponentes. Explicando su funcionalidad y detalles en cada componente. Adicionalmente, se marcará una ruta respecto al análisis ingenieril para el dispositivo.

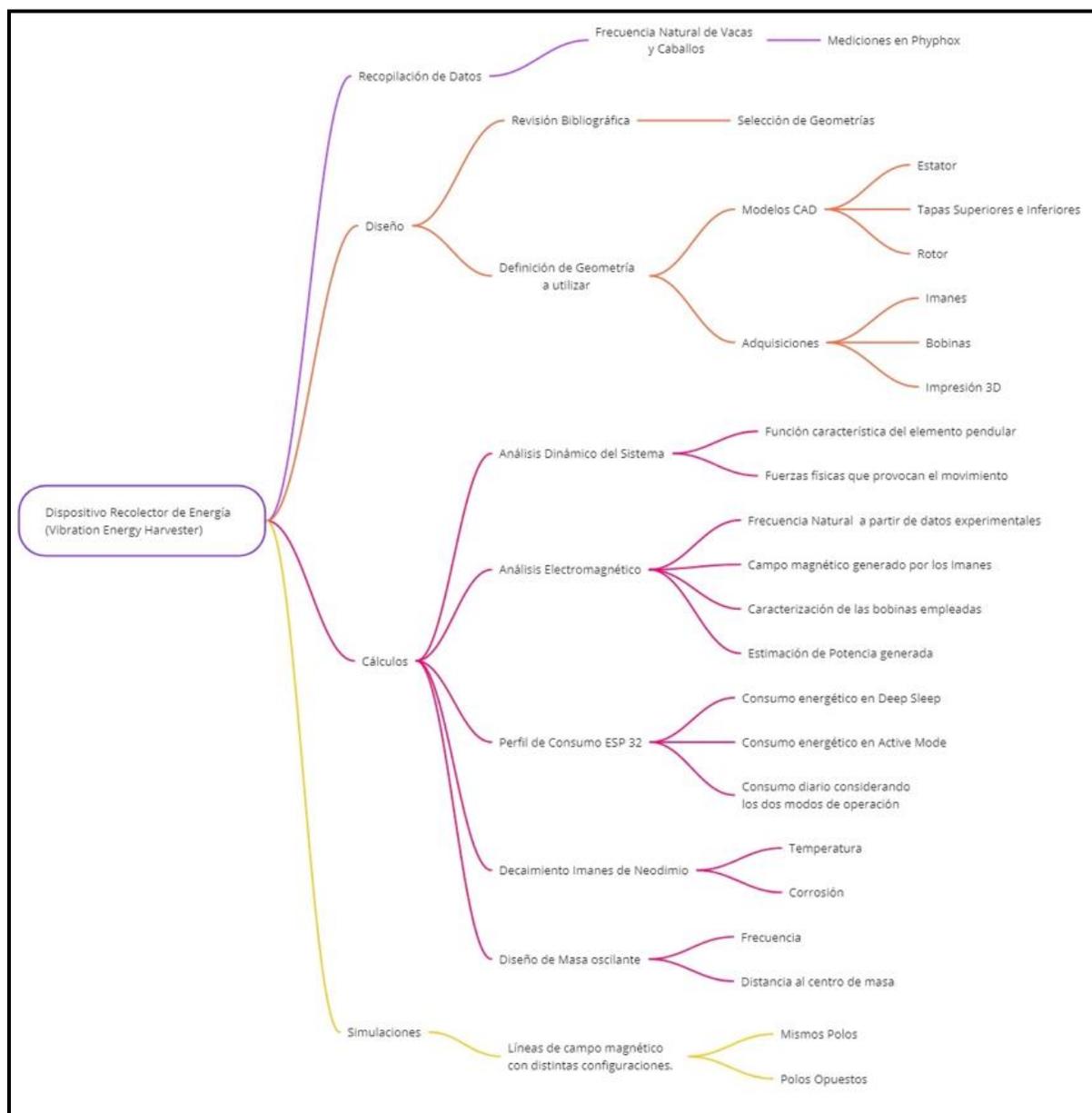


Figura 11. Diagrama de ruta para la fase de diseño.

- **Estator**

En la Figura 12, se muestra el estator, con apariencia de anillo. El estator tiene 8 agujeros de 10 mm de diámetro con 0.3 mm de tolerancia (teoría de ajustes), donde se alojarán las bobinas. Adicionalmente tiene una canaleta al exterior del diseño debido a que por ahí se va a realizar las conexiones eléctricas de las bobinas. Y finalmente se realizó 4 ranuras para colocar el estator sobre la tapa inferior y que permanezca fijo.

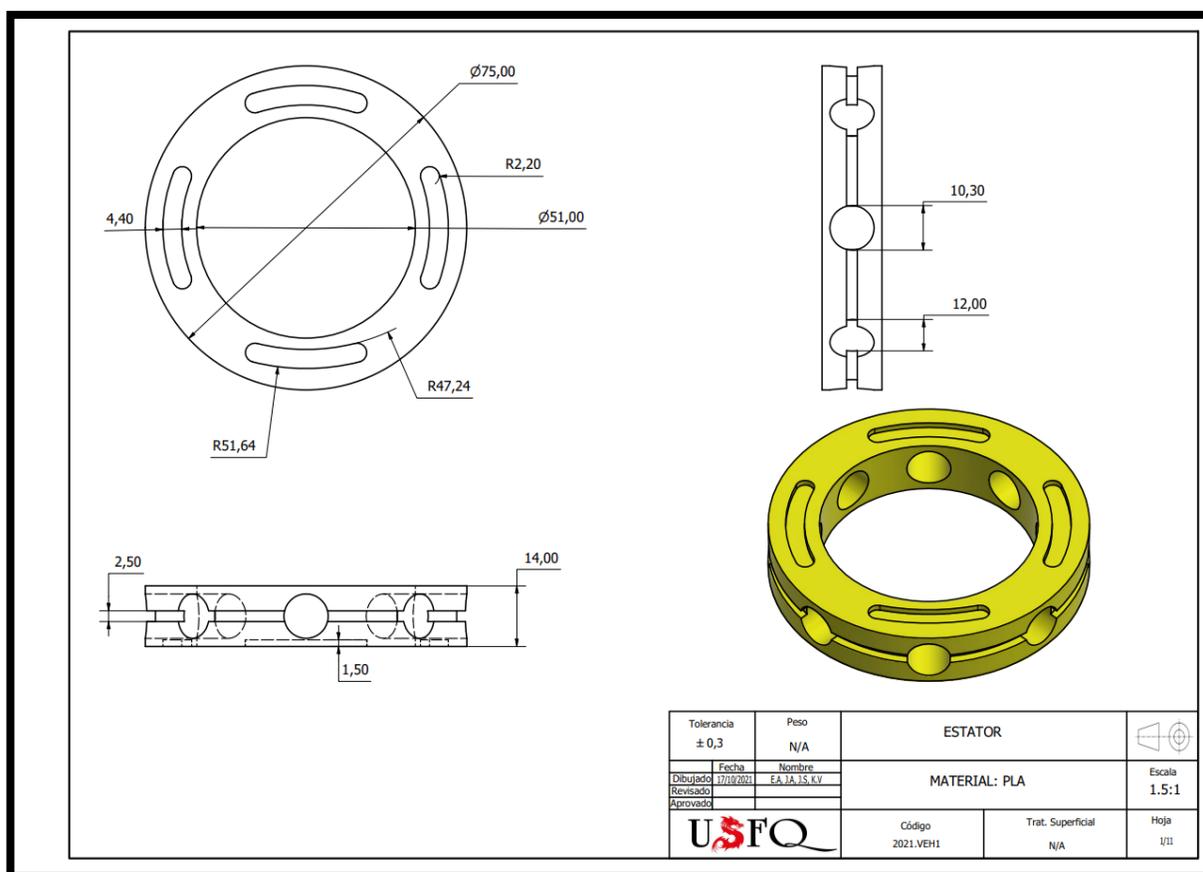


Figura 12. Plano del estator.

- **Rotor**

En la Figura 13, se muestra el rotor. Este consta de 8 agujeros de 10 mm de diámetro ( $+0,3$  mm de tolerancia), donde se alojarán imanes cilíndricos de neodimio N52, y además 8 agujeros cúbicos de dimensiones 5x5x5 mm donde se colocarán imanes cúbicos de neodimio N52. Debido a que se busca tener masa excéntrica, se modeló un agujero en donde se colocará un objeto denso y pesado (zinc) para suplir dicha finalidad. Por último, en el centro del rotor, se encuentra incorporado un agujero de 3mm de diámetro en donde pasará un eje y se ajustará con dos rodamientos en el lado inferior y superior.

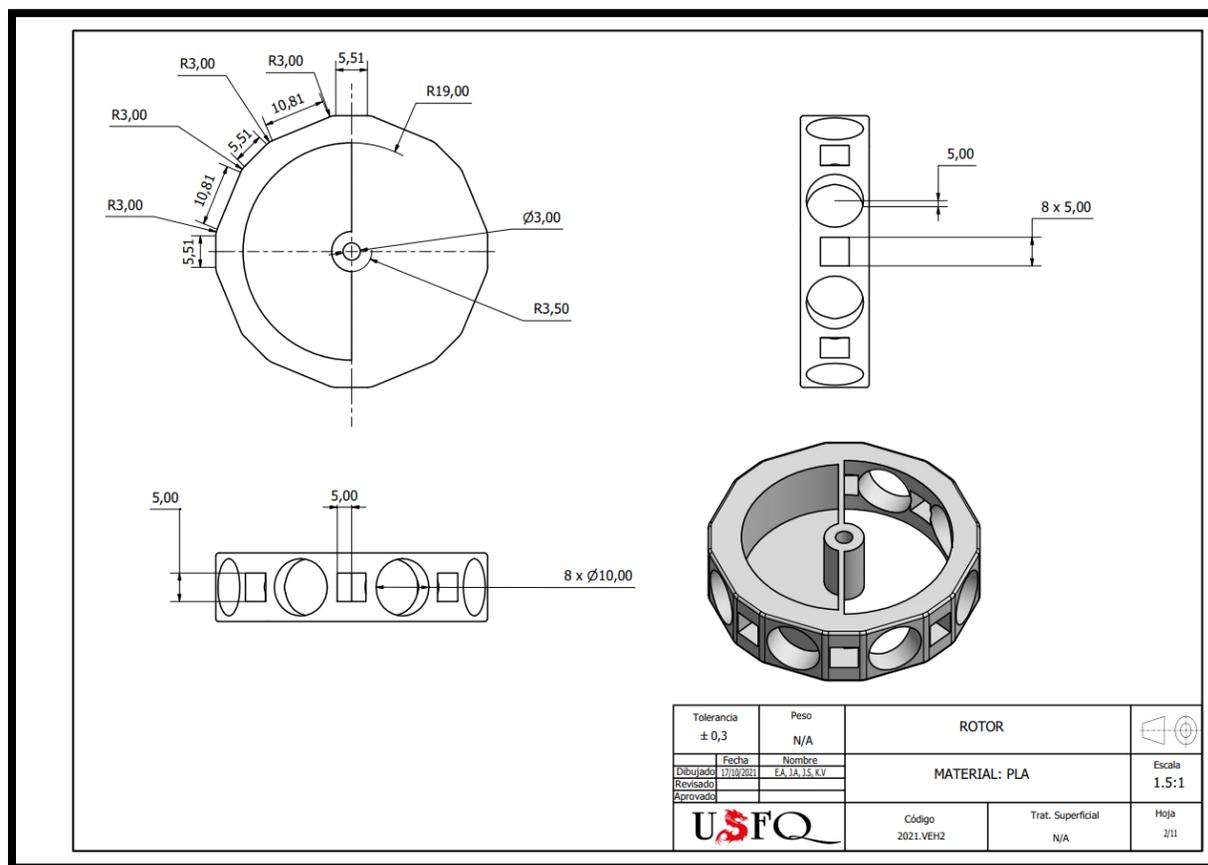
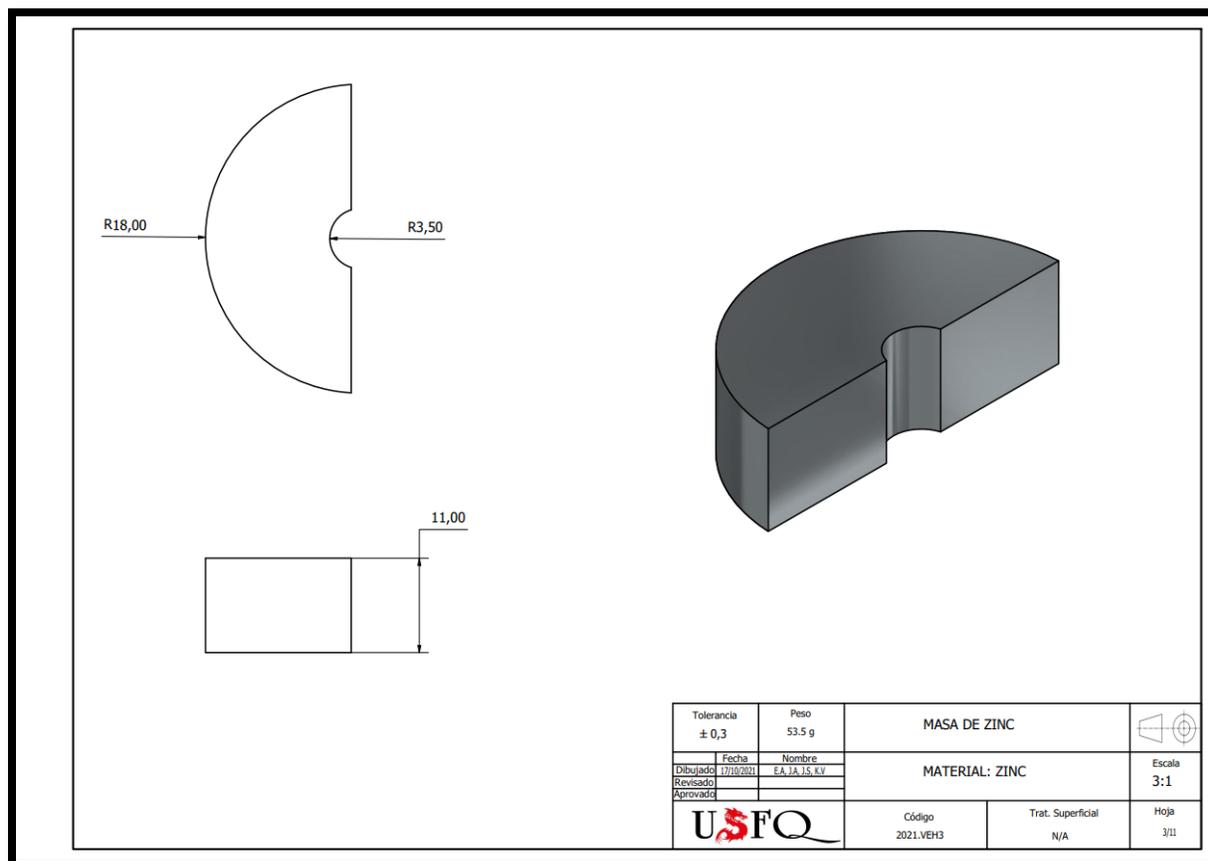


Figura 13. Plano del Rotor.

- **Masa de Zinc**

En la figura 14, se muestra la masa de zinc. Se realizó por proceso de fundición y posteriormente a proceso de maquinado. Las dimensiones para su fabricación se pueden obtener del siguiente plano.



*Figura 14. Plano Masa Zinc.*

- **Tapa Inferior**

En la Figura 15, se muestra la tapa inferior. Su diseño tiene la finalidad de cubrir los elementos internos para que no haya interferencia o daños en el funcionamiento del dispositivo. Se diseño un agujero de 10 mm de diámetro en donde estará asentado el rodamiento superior. Adicionalmente se crearon tres elementos semicirculares (tipo orejas), con agujeros de 3 mm de diámetro donde irán colocados tornillos hexagonales M3 y 30 mm de largo. Lo último se realiza con la finalidad de tener un acoplamiento fijo de las tapas. Y finalmente se ensamblaron 3 elevadores para asentar el estator con la tapa inferior.

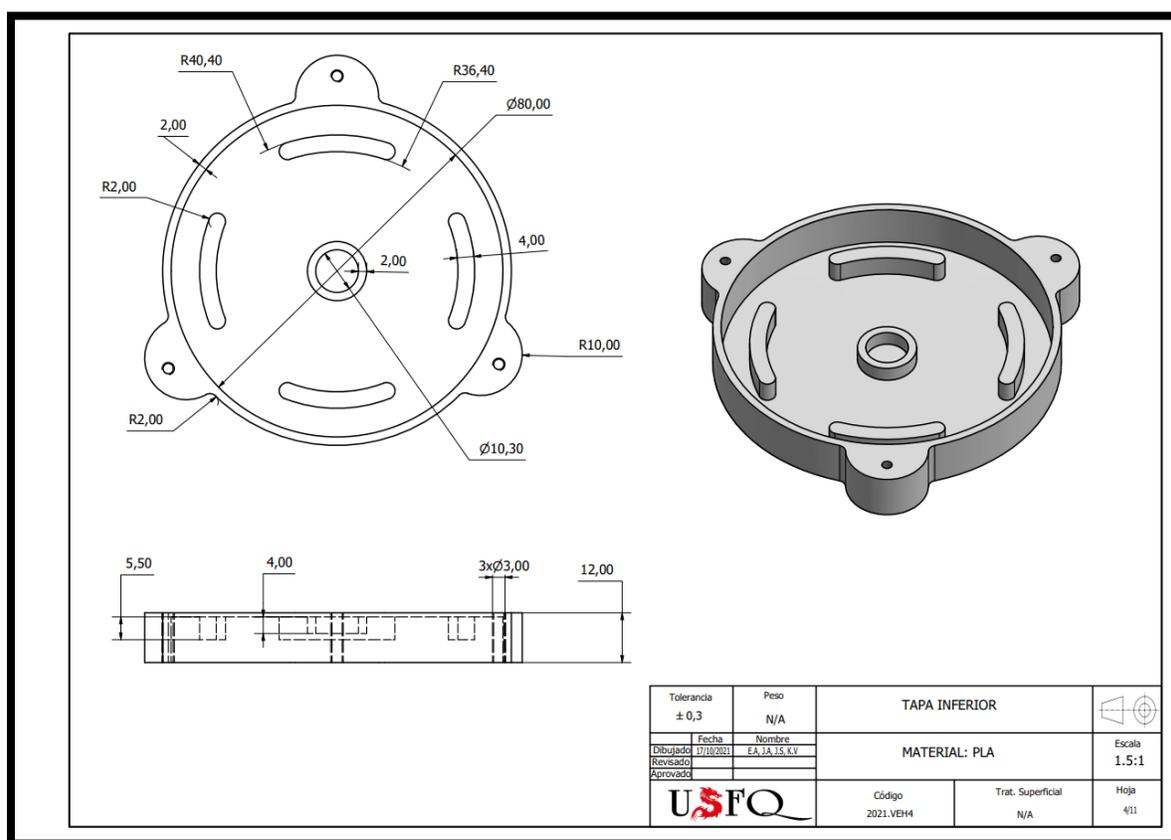


Figura 15. Plano Tapa Inferior.

- **Tapa Superior**

En la Figura 16, se muestra el plano de la tapa superior. Su diseño tiene la misma geometría que la tapa inferior. Lo único en lo que difiere es que no existen los elevadores para acoplar el estator, ya que no es necesario.

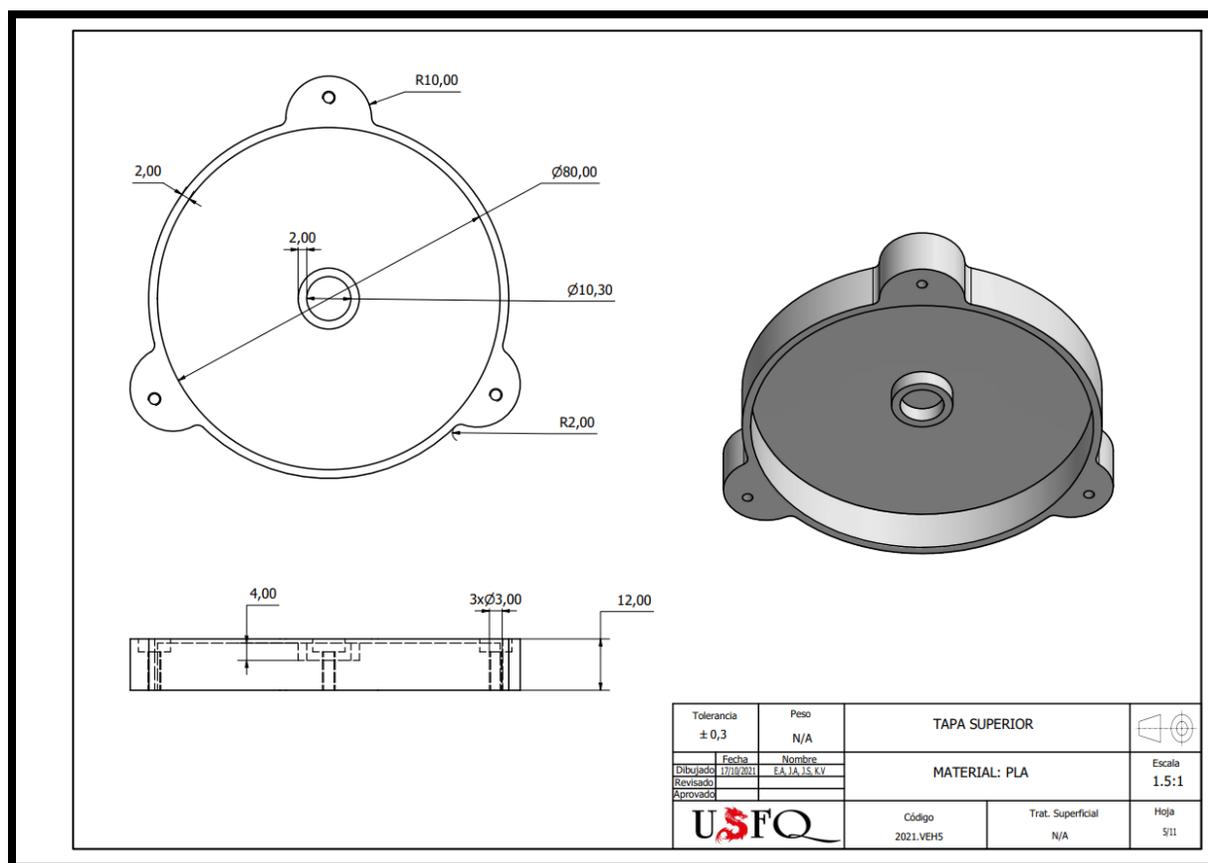


Figura 16. Plano Tapa Superior.

- **Elevador**

En la Figura 17, se observa el plano del elevador. Este tiene la funcionalidad de elevar y soportar una masa de bronce situada sobre el estator.

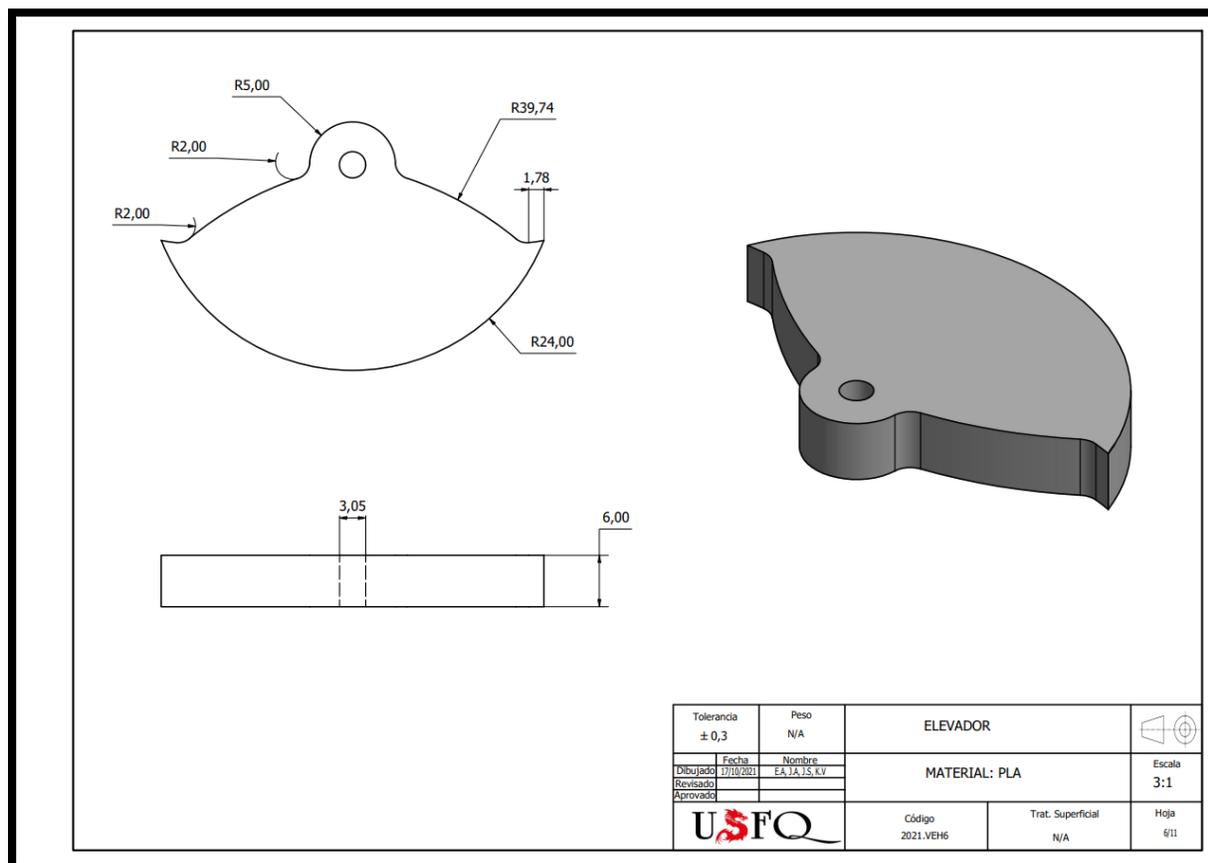


Figura 17. Plano Elevador.

- **Masa de Bronce**

En la Figura 18, se muestra el plano de la masa de bronce. Se realizó mediante cortadora de hilo, y tiene forma de ancla. Su función es aumentar la inercia al dispositivo.

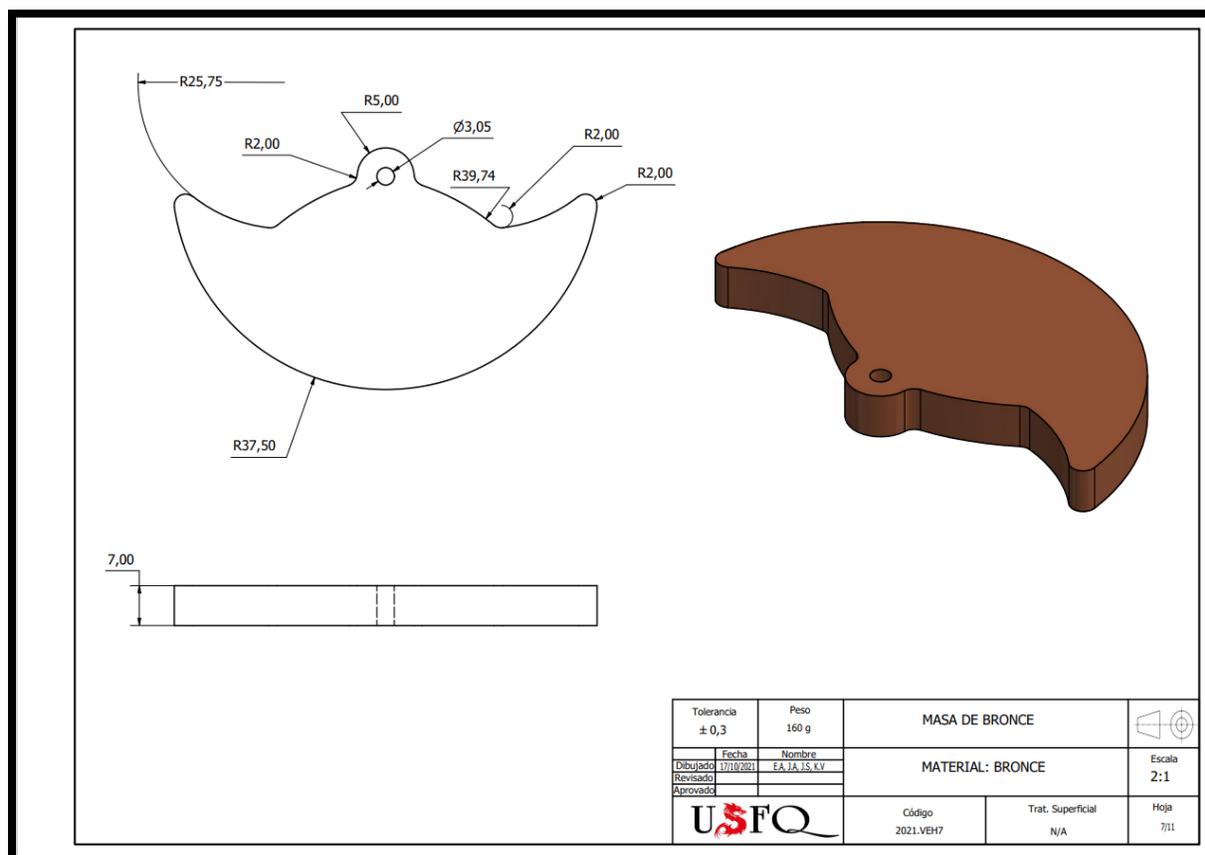


Figura 18. Plano Masa de Bronce.

- **Eje**

En la Figura 19, se muestra el plano del eje. Se mandó a fabricar en acero K100, en un torno. Sus medidas son 33 mm de largo y de diámetro 3 mm. En el eje se van a acoplar todos los componentes mencionados anteriormente.

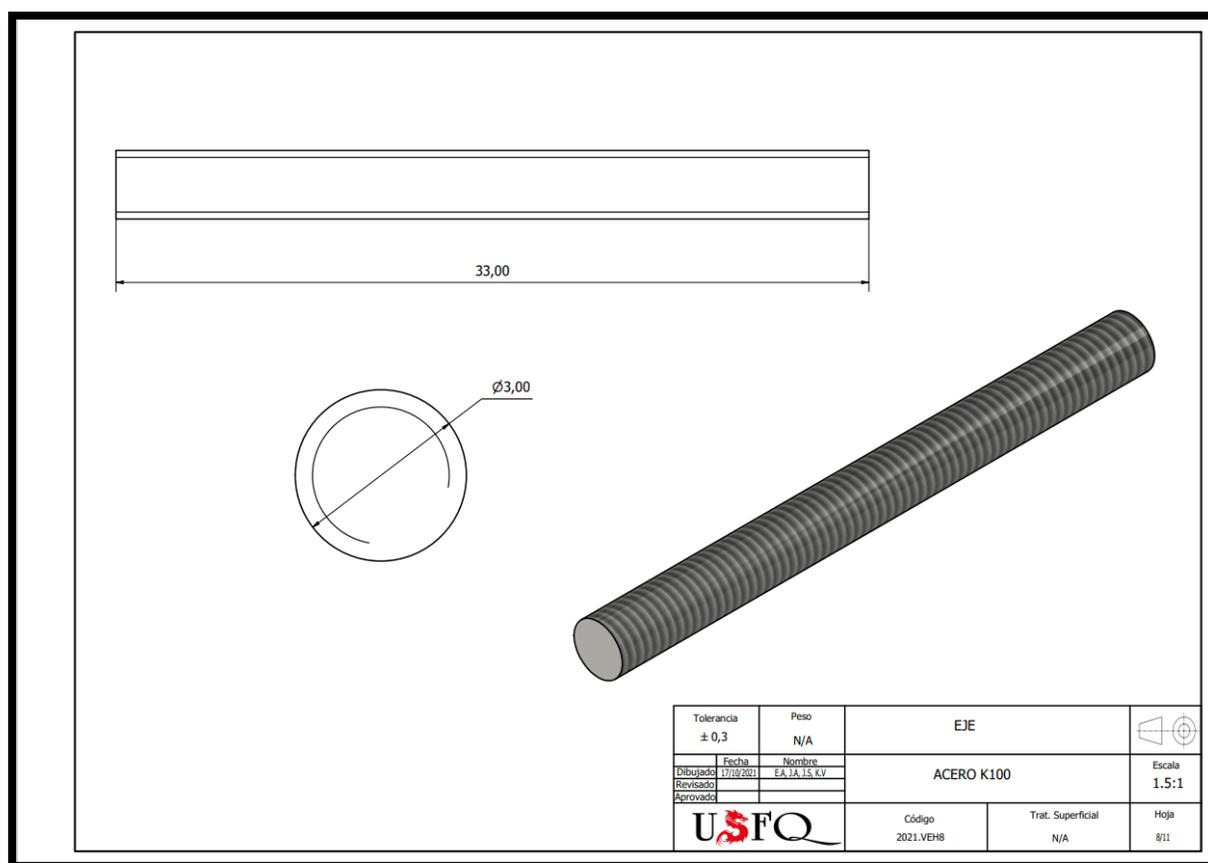


Figura 19. Plano Eje.

- **Carcasa**

Componente dedicado a la protección del mecanismo generador de energía ante impactos, polvo y agua.

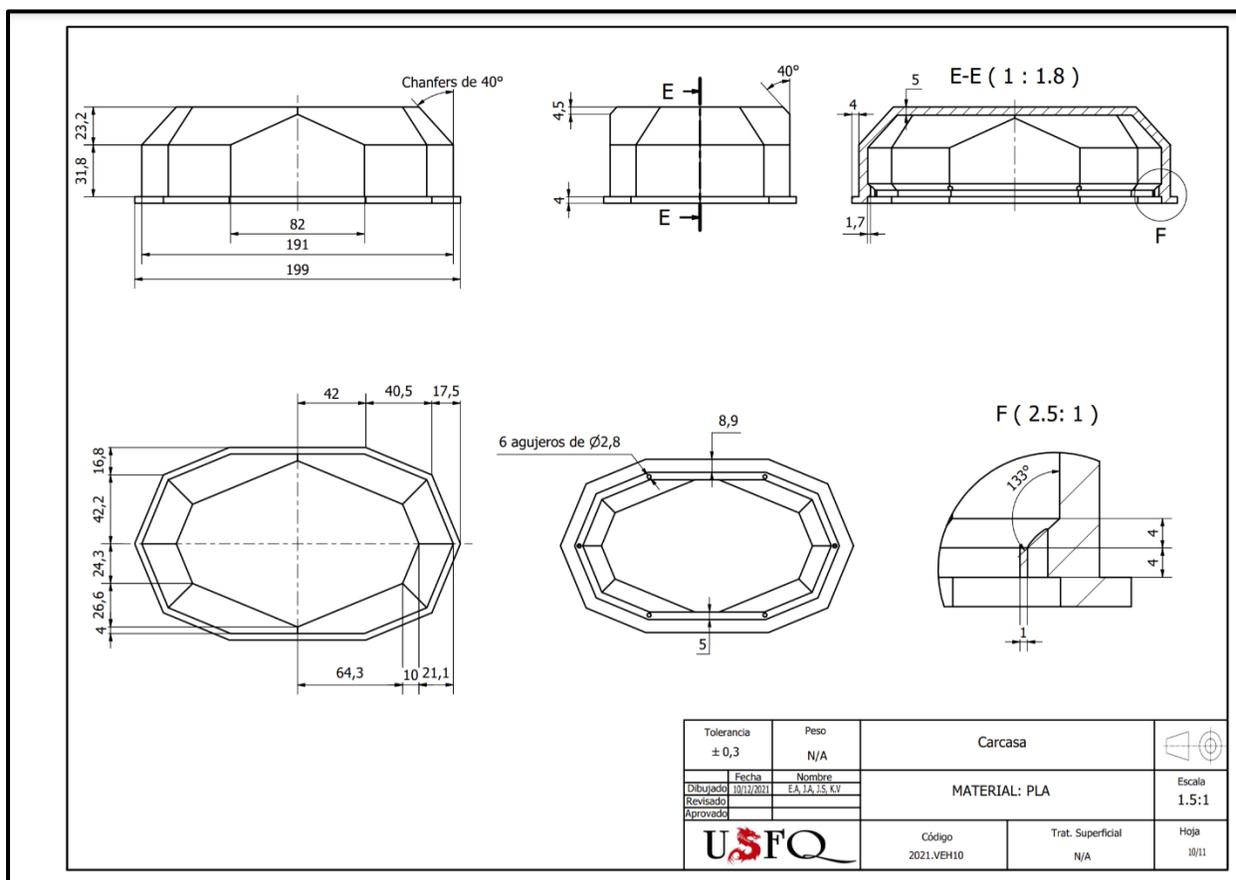


Figura 20. Plano de la Carcasa.

- **Base carcasa**

Componente dedicado a la sujeción de los componentes como el mecanismo generador y los electrónicos a ser usados. Además, a este componente se sujeta el collar de la vaca y se emperna a la carcasa protectora.

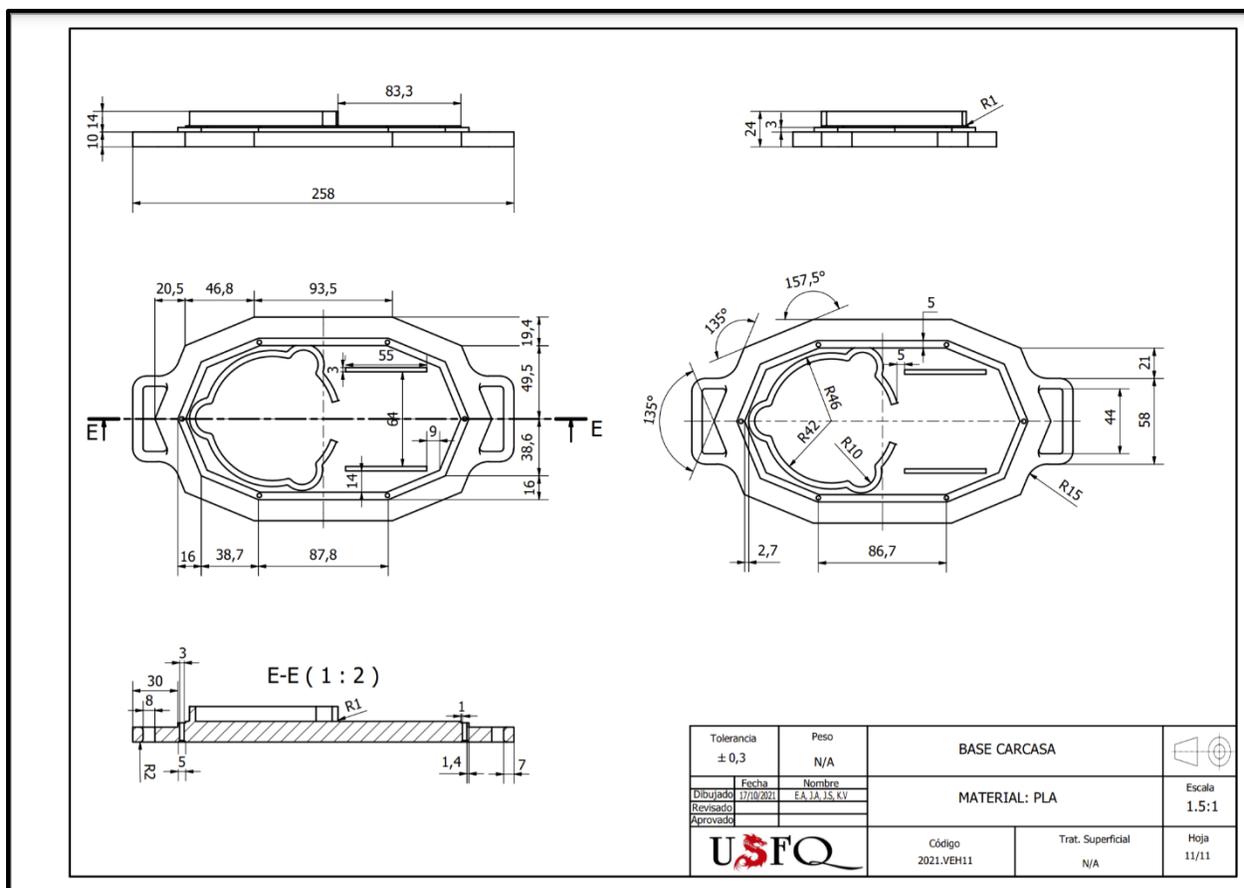


Figura 21. Plano Base Carcasa.

- **Ensamble (Plano de Conjunto)**

En la Figura 22, se muestra el plano de conjunto del dispositivo generador de energía mediante vibraciones. El diseño está constituido por una tapa superior, dos rodamientos de bola ( $\text{Ø}3 \text{ mm}$  interno), un rotor, un eje ( $\text{Ø}3 \times 33 \text{ mm}$ ), un estator, una masa de zinc, un elevador, 8 imanes N52 cilíndricos, 8 imanes N52 cúbicos, 8 bobinas, una masa de bronce, una tapa inferior y tres tornillos ( $\text{M}3 \times 30 \text{ mm}$ ).

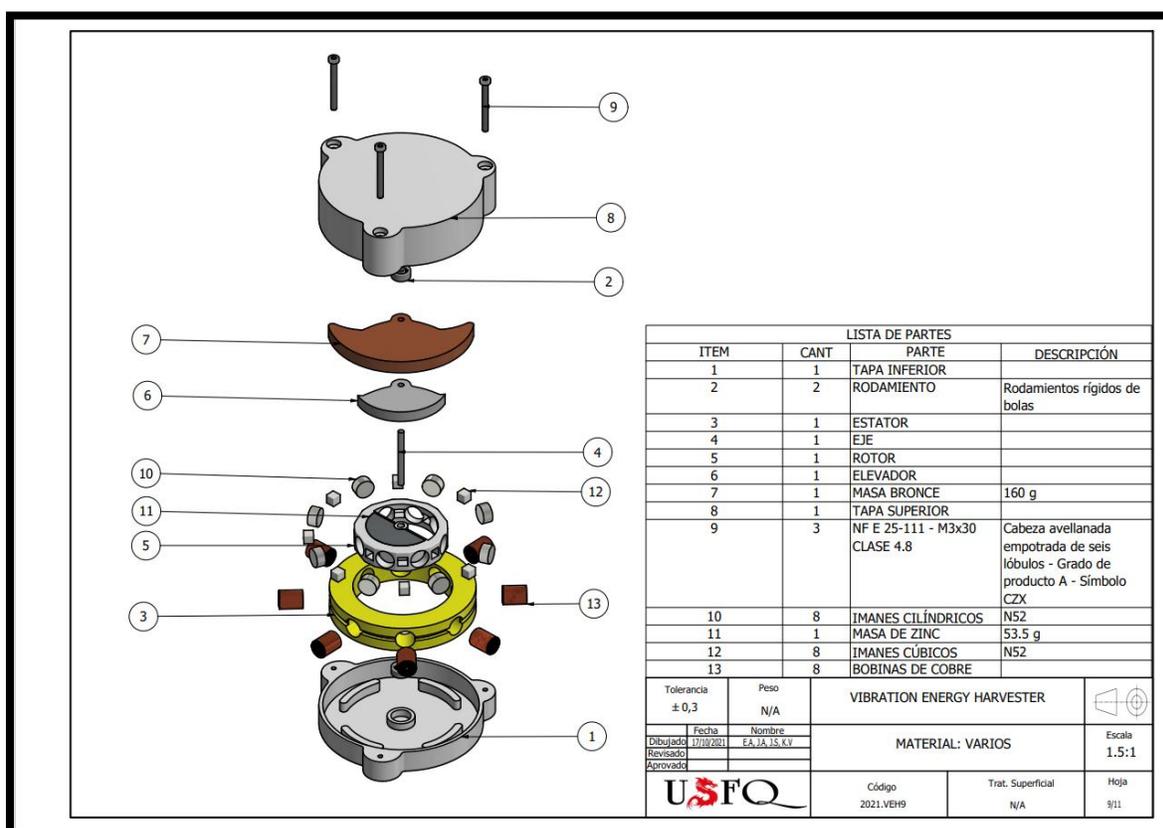


Figura 22. Plano de conjunto del Vibration Energy Harvester.

## 9. Análisis ingenieril

### Nomenclatura Empleada

$L$	longitud a la que se coloca el dispositivo
$M$	masa del dispositivo
$m$	masa excéntrica del rotor
$f$	fuerza impulsora de inercia generada por factores externos
$f_e$	fuerza de amortiguamiento electromagnético
$f_m$	fuerza impulsora de inercia generada por fuerza de amortiguamiento debido a fricción
$x_1, y_1$	coordenadas del eje central
$\dot{x}_1, \dot{y}_1$	velocidad del punto O
$\ddot{x}_1, \ddot{y}_1$	aceleración del punto O
$v_0$	velocidad en el punto A
$a_0$	aceleración en el punto A
$x, y$	coordenadas del centro de gravedad
$\dot{x}, \dot{y}$	velocidad del punto B
$\ddot{x}, \ddot{y}$	aceleración del punto B
$F$	fuerza de excitación armónica simple
$I$	momento de inercia del rotor excéntrico
$n$	número de imanes
$R$	distancia desde la superficie exterior del imán hasta el eje central
$r$	radio del eje central
$N$	número de vueltas del embobinado
$B$	densidad de campo magnético
$L^*$	distancia efectiva del embobinado cuando es atravesado por las líneas de inducción
$I(t)$	corriente inducida
$R_c$	impedancia del embobinado
$E(t)$	voltaje de salida

$c^*$  coeficiente de amortiguamiento rotacional

$l^*$  longitud característica

$g$  gravedad

### Letras griegas

$\alpha$  aceleración angular

$\theta$  ángulo de oscilación del rotor relativo al sistema de coordenadas fijo

$\dot{\theta}$  velocidad de rotación angular del rotor excéntrico

$\ddot{\theta}$  aceleración de rotación angular del rotor excéntrico

$\omega$  velocidad angular

$\omega_n$  frecuencia natural

$\varphi$  ángulo de oscilación en relación con el sistema de coordenadas fijas

### **Análisis dinámico del sistema**

El sistema propuesto, de manera general, adopta su comportamiento al de un péndulo compuesto. Para determinar una ecuación del sistema completo, es necesario encontrar las distintas expresiones matemáticas.

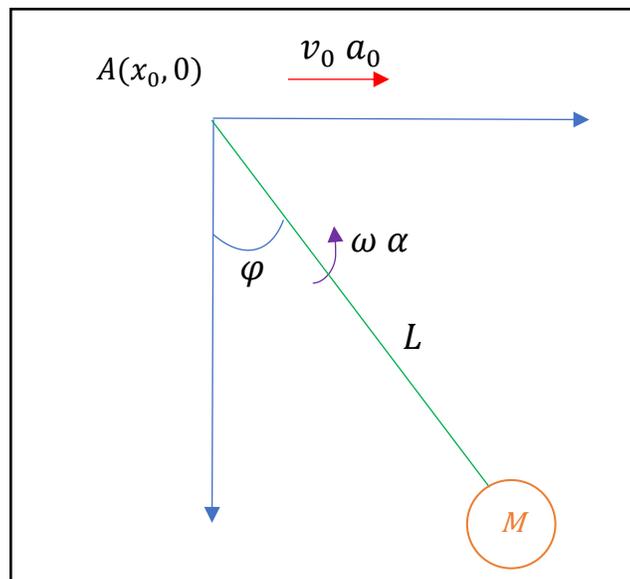


Figura 23. Diagrama del movimiento para el sistema general.

En la figura 23, se presenta un diagrama aproximado en la disposición del sistema. A partir de esta imagen, se puede obtener la posición tanto en  $x$  e  $y$ . De acuerdo a Zhang et al., 2021. Dentro de un sistema de estas características, el movimiento en el eje  $x$  se encuentra limitado y por el eje en el cual gira, existe un ligero desplazamiento. Por lo tanto, las ecuaciones de posición para el mecanismo a un ángulo  $\varphi$  aleatorio, quedan de la siguiente forma:

$$x_1 = x_0 + L \sin(\varphi) \quad (1)$$

$$y_1 = -L \cos(\varphi) \quad (2)$$

A partir de estas ecuaciones, es posible obtener tanto la velocidad como la aceleración del sistema. Las cuales se presentan a continuación:

$$\dot{x}_1 = v_0 + L\omega \cos(\varphi) \quad (3) \quad \ddot{x}_1 = a_0 + L\alpha \cos(\varphi) - L\omega^2 \quad (5)$$

$$\dot{y}_1 = L\omega \sin(\varphi) \quad (4) \quad \ddot{y}_1 = L\alpha \sin(\varphi) + L\omega^2 \cos(\varphi) \quad (6)$$

Las primeras derivaciones realizadas permiten obtener el movimiento desde la extremidad del animal o punto de aplicación del mecanismo desarrollado hasta una posición aleatoria. A partir de esto, es necesario determinar las expresiones desde el eje del dispositivo hasta el centro de la masa excéntrica. El diagrama de la segunda sección se encuentra detallado dentro de la siguiente imagen.

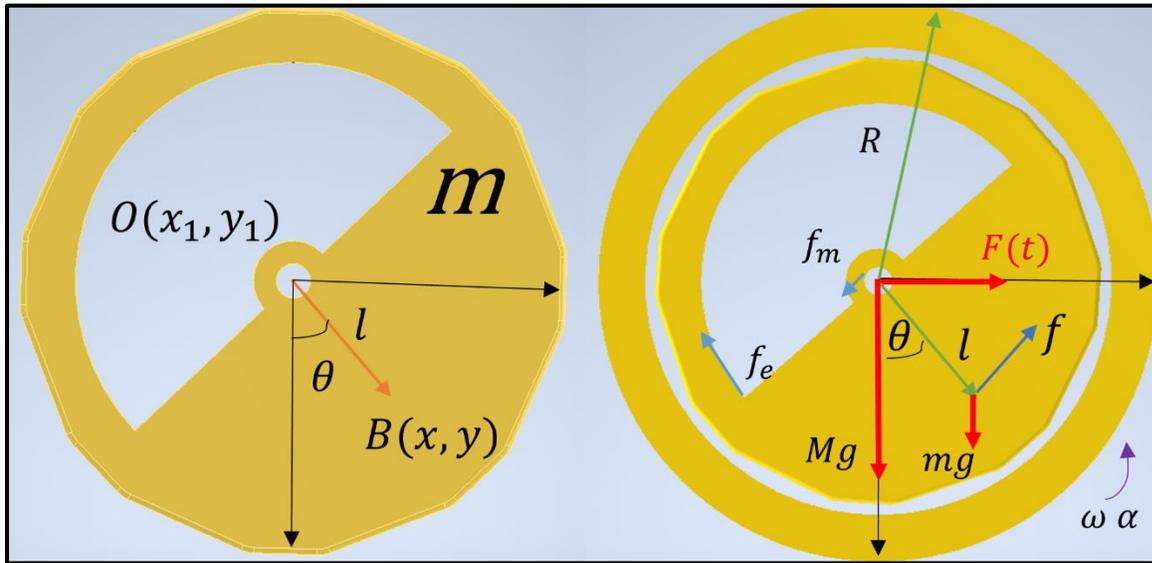


Figura 24. Diagrama de cuerpo libre para el rotor.

De modo que se pueda obtener una expresión generalizada, las ecuaciones determinadas a partir de este punto tendrán un término  $x_1$  e  $y_1$  añadido a la fórmula. Esto considera las expresiones del apartado anterior junto a la contribución de la masa excéntrica.

$$x = x_1 + l \sin(\theta) \quad (7)$$

$$y = y_1 - l \cos(\theta) \quad (8)$$

$$\dot{x} = v_0 + L\omega \cos(\varphi) + l\dot{\theta} \cos(\theta) \quad (9)$$

$$\dot{y} = L\omega \sin(\varphi) + l\dot{\theta} \sin(\theta) \quad (10)$$

$$\ddot{x} = a_0 + L\alpha \cos(\varphi) - L\omega^2 \sin(\varphi) + l\ddot{\theta} \cos(\theta) - l\dot{\theta}^2 \sin(\theta) \quad (11)$$

$$\ddot{y} = L\alpha \sin(\varphi) + L\omega^2 \cos(\varphi) + l\ddot{\theta} \sin(\theta) + l\dot{\theta}^2 \cos(\theta) \quad (12)$$

La importancia de obtener las ecuaciones listadas con anterioridad tiene la finalidad de encontrar la ecuación del sistema en función de la fuerza aplicada. Para ello, al conocer las masas además de aceleraciones en las distintas direcciones y así aplicar la segunda ley de Newton se llega a la siguiente expresión:

$$M\ddot{x}_1 + m\ddot{x} = F(t) \quad (13)$$

$$(M + m)(a_0 + L\alpha \cos(\varphi) - L\omega^2 \sin(\varphi)) + m(l\ddot{\theta} \cos(\theta) - l\dot{\theta}^2 \sin(\theta)) = F_0 \sin(\omega_0 t) \quad (14)$$

La ecuación 14 es la forma final de la ecuación que modela al sistema. La fuerza en función del tiempo se analizará tras asumir a la masa excéntrica empleada como péndulo en movimiento armónico simple.

En cuanto a la ecuación dinámica, se hace referencia a la figura 24. En este diagrama, se encuentran todas las fuerzas que influyen en el movimiento del sistema pendular. El término  $f_e$  destaca la fuerza electromagnética provocada por los imanes y arreglo de bobinas dispuesto.  $f_r$  es la fuerza de fricción entre el eje y el rodamiento empleado y  $f$  es la fuerza ocasionada por la acción inercial de la masa junto con las fuerzas externas. Del mismo modo, se considera el torque en un sistema pendular.

$$(I + ml^2)\ddot{\theta} + nf_e R + f_m r + mgl \sin(\theta) = fl \quad (15)$$

A partir de este punto, las ecuaciones presentadas a continuación son necesarias para determinar el valor de los términos  $f_e$ ,  $f$  y  $f_r$  respectivamente. Estos valores serán de gran valor a futuro al momento de determinar aspectos como la potencia generada y la eficiencia del mecanismo.

Para encontrar los valores de la fuerza de inducción y estimar la potencia generada, las leyes de inducción electromagnética de Faraday y Ley de Lenz son herramientas útiles. Las ecuaciones que se presentan a continuación son adaptaciones de las expresiones presentadas por Raymond A. Serway, John W. Jewett, 2009.

$$f_e = NBI(t)L^* \quad (16)$$

$$E(t) = NBL^*R\dot{\theta} \quad (18)$$

$$I(t) = \frac{E(t)}{R_c} \quad (17)$$

$$f_e = \frac{(N^2 B^2 L^2 R \dot{\theta})}{R_c} \quad (19) \quad f_m = m c^* \theta \quad (20)$$

$$\dot{\theta} = 2 * \pi * \omega_n \quad (21)$$

En lo que corresponde a las fuerzas inerciales que actúan sobre el centro de gravedad de la masa excéntrica, se aplica la siguiente expresión. Derivada a partir de la segunda ley de Newton y aplicando un módulo a las dos direcciones del sistema coordenado establecido.

$$f = m(\ddot{x} \cos(\theta) + \ddot{y} \sin(\theta)) \quad (22)$$

$$f = m(l\ddot{\theta} + a_0 \cos \theta + L\alpha \cos \varphi - L\omega^2 \sin \varphi \cos \theta + L\alpha \sin \varphi \sin \theta + L\omega^2 \cos \varphi \sin \theta) \quad (23)$$

Reemplazando términos en la ecuación 14, se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} \frac{I}{ml} \ddot{\theta} + \left( \frac{n(NBL^*R)^2}{mR_0 l} + \frac{c^* r}{l} \right) \dot{\theta} + g \sin \theta = a_0 \cos \theta + L\alpha \cos \varphi \cos \theta - L\omega^2 \sin \varphi \cos \theta \\ + L\alpha \sin \varphi \sin \theta + L\omega^2 \cos \varphi \sin \theta \end{aligned} \quad (24)$$

### Ecuación característica del sistema

La ecuación 23 puede reducirse al reemplazar el primer término con la siguiente expresión correspondiente a la longitud característica. Así, la ecuación del sistema se indica en la fórmula 25.

$$l^* = \frac{I}{ml} \quad (25)$$

$$l^* \ddot{\theta} + \left( \frac{n(NBL^*R)^2}{mR_0 l} + \frac{c^* r}{l} \right) \dot{\theta} + (g - L\omega^2 \cos(\varphi)) \theta = -L\omega^2 \sin(\varphi) \quad (26)$$

De la ecuación 26, al despejar los términos correspondientes, se obtiene la expresión de la frecuencia natural para la masa excéntrica. La cual se asemeja a la frecuencia natural para un péndulo simple.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{(g - L\omega^2 \cos \varphi)}{l^*}} \quad (27)$$

### **Análisis electromagnético para estimación de potencia generada**

La generación de energía se da mediante inducción electromagnética tras la interacción entre imanes y bobinas. Por esta razón, la estimación de potencia obtenida obedece las ecuaciones correspondientes al magnetismo citadas con anterioridad. La ecuación 28 indica la relación entre el número de bobinas empleadas y la resistencia de estas.

$$P(t) = \frac{nE^2(t)}{R_c} \quad (28)$$

Reemplazando las ecuaciones 18 y 21 dentro de 28, se obtiene una expresión más detallada. Así, se conoce con exactitud toda la información necesaria para la estimación de potencia.

$$P(t) = \frac{n(NBL^*R * (2 * \pi * \omega_n))^2}{R_c} \quad (29)$$

### **Medición de frecuencia natural en los animales.**

Uno de los parámetros necesarios para estimar la potencia que el mecanismo puede generar es la frecuencia natural de los animales. El movimiento tanto de vacas como de caballos son los responsables de generar estímulos que provocan el giro del rotor y consecuentemente la interacción entre bobinas e imanes. Por consiguiente, es necesario realizar pruebas de campo con los especímenes en cuestión para así identificar un valor promedio de frecuencia natural.

Los experimentos realizados se llevaron a cabo mediante la aplicación *Phyphox*. Esta aplicación desarrollada por el segundo instituto de física en RWTH Aachen University permite al usuario utilizar el smartphone como una herramienta útil para distintos fines ya sea para medir la intensidad de la luz, cómo barómetro, aplicaciones de acústica o giroscopio. (Stacks et al., n.d.). Dentro de la aplicación existe la aplicación *espectro de aceleración*, la

cual utiliza los giroscopios presentes en el dispositivo móvil y mediante una transformada rápida de Fourier permite al usuario conocer los picos de frecuencia sobre un tiempo específico.

Una vez en el campo, se colocaron los smartphones en distintas partes de los animales empleando carcasas protectoras y correas principalmente. Posteriormente se configuró la aplicación y se tomaron datos por 30 minutos. Una vez finalizado el periodo de adquisición de datos, el programa despliega una pantalla con toda la información relevante del experimento. Las imágenes que se indican a continuación presentan las frecuencias máximas y mínimas obtenidas tras el ensayo.

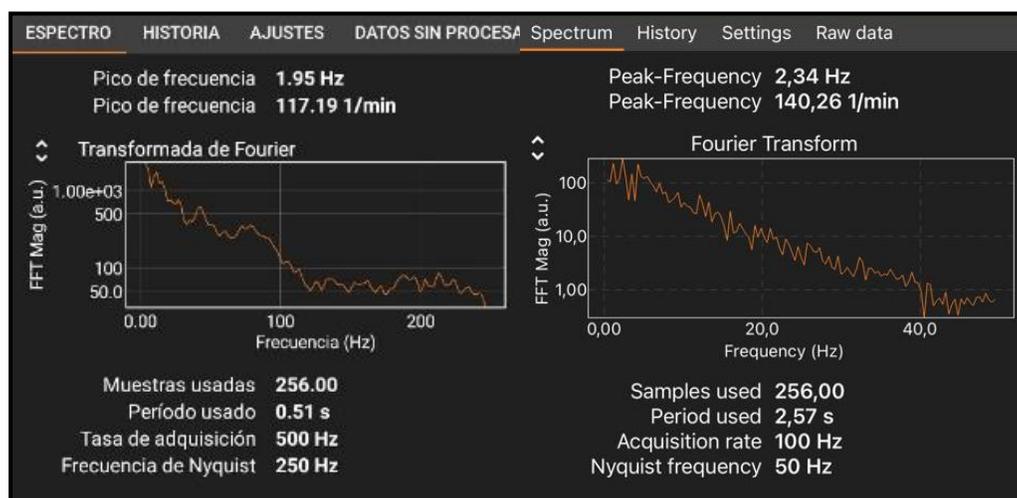


Figura 25. Resultados de mediciones de frecuencia en animales.

De tal forma que en los cálculos se consideren los valores máximos y mínimos, se decidió obtener el promedio de las frecuencias presentes en la figura anterior. Dicho valor es de 2.145 [Hz].

### Incremento de Inercia

Para incrementar la inercia del rotor, y, por ende, aprovechar al máximo la generación de potencia tras el movimiento del animal, se ha desarrollado una masa oscilante externa que se

encuentra acoplada al rotor. Este disco cuya geometría se asemeja a un ancla, se inspiró con base en los relojes mecánicos como Seiko Kinetic y Swatch Autoquarz por mencionar algunos.

Dichos dispositivos se encuentran diseñados de tal forma que el peso se concentra en la circunferencia externa del mecanismo con el fin de extender el momento de inercia. Una vez se mueve, gira sobre su eje y mediante un tren de engranajes, transmite la energía cinética a un resorte dentro del módulo el cuál conforma al reloj, permitiendo su funcionamiento. (Muratore & Dalla Guerra, 2021).

Con esto en mente, y una vez visualizados los movimientos reales de las masas oscilantes junto con su funcionamiento en relojes, se procedió al diseño de 7 geometrías, entre las cuales se encuentran adaptaciones de los objetos empleados por algunos fabricantes relojeros, modificaciones en geometrías conocidas además del centro de giro para determinar cuál provee mejor momento de inercia en el rotor. Cabe mencionar que la frecuencia actual del rotor se aproxima a los 1.81 [Hz].

Para el diseño, se consideraron 3 aspectos fundamentales en base al diagrama existente del dispositivo VEH:

- El diámetro de la masa oscilante no debe superar al radio del estator.
- El centro de masa debe estar lo más alejado del pivote.
- La frecuencia del rotor compuesto debe ser alta.

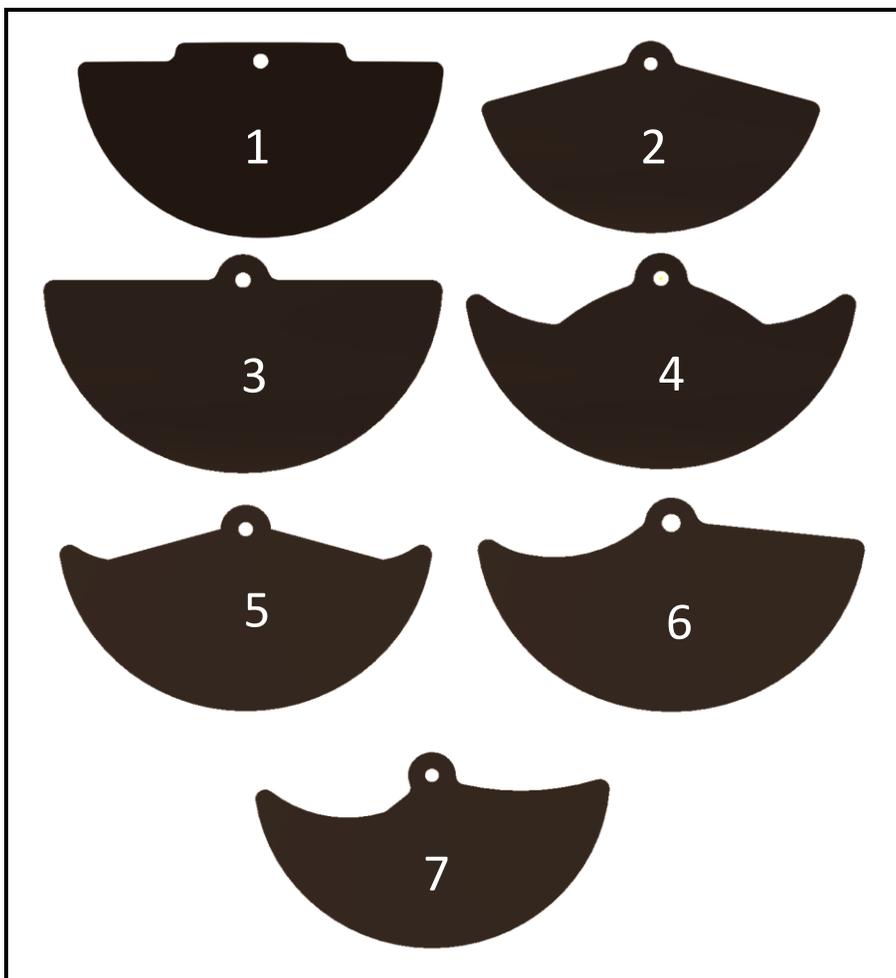
De acuerdo con los planos que se indican en la figura 12 se conoce que el radio del estator es de 75 [mm]. Para el acople de modo que funcione como un solo cuerpo con el rotor, se coloca un elevador de 6 [mm] y ambas constan de una perforación de 3 [mm] para el paso del

eje. Finalmente, para su fabricación se ha decidido realizar mediante corte por hilo en planchas de bronce cuyo espesor es de 7 [mm].

La fabricación de las piezas en bronce se decidió considerando los siguientes aspectos:

- Es un material de fácil adquisición, cuyo proceso de fabricación y manufactura en nuevas piezas no representa un peligro a la salud.
- El bronce presenta una alta resistencia a la corrosión, es un elemento no magnético y su densidad es ideal para la aplicación en cuestión.

A continuación, se presentan las distintas geometrías consideradas para incrementar la inercia del rotor:



*Figura 26: Geometrías propuestas para incrementar la inercia del rotor.*

Finalmente, para realizar la selección de la geometría apropiada que permite maximizar la generación de energía tras el movimiento animal, se realiza un análisis de frecuencias basado en un péndulo físico.

De acuerdo con la teoría respectiva en cuanto a péndulos físicos, la frecuencia de estos sistemas está definida por la siguiente expresión:

$$\omega = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{mgh}{I}} \quad (30)$$

*Donde:*

*m es la masa del rotor*

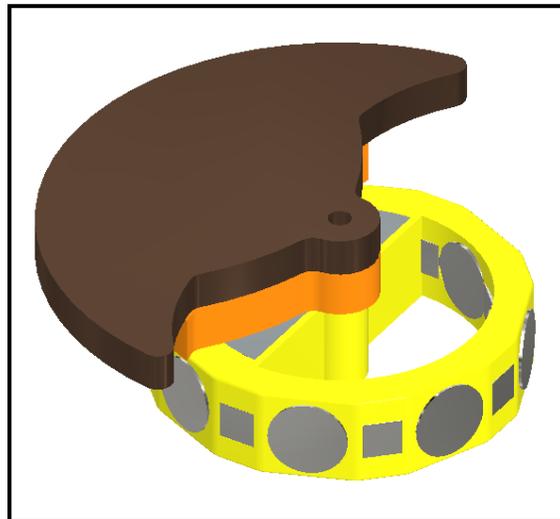
*g es la gravedad*

*h es la distancia desde el pivote hasta el centro de masa*

*I es la inercia del objeto*

(Lumen Learning, s. f).

Tras realizar el acople como un solo cuerpo junto al rotor, se registraron los datos necesarios para hallar la frecuencia con cada figura. Para determinar la masa, se registró dicho valor con cada figura empleando una balanza digital. El proceso se muestra a continuación:



*Figura 27: Acople de la masa oscilante junto*



Figura 28: Registro de la masa del acople.

Dentro del programa Autodesk Inventor, se puede obtener los valores respecto a la inercia y distancia desde el pivote hacia el centro de masa una vez realizado el ensamble. Tras recopilar toda la información correspondiente, los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 37. Datos registrados para cada geometría y resultados del cálculo de la frecuencia.

Figura	Masa [g]	Distancia al centro de masa [mm]	Inercia [kg*mm <sup>2</sup> ]	Frecuencia [Hz]
1	192.1	10.19	73.171	2.577
2	171.4	10.47	62.764	2.664
3	186.8	10.23	72.207	2.563
4	167.5	11.45	63.326	2.742
5	174.1	11.33	67.184	2.699
6	147.7	8.81	44.231	2.702
7	169.8	11.29	67.423	2.656

Tras los cálculos realizados, cuyos resultados se indican en la tabla anterior, es evidente cómo la geometría 4 cumple con los parámetros especificados para selección. El acople de esta forma entrega una mayor distancia al centro de masa desde el pivote. A pesar de que la

inercia del conjunto es menor, la frecuencia de 2.74 [Hz] permitirá generar una mayor cantidad de energía aprovechando todo tipo de impulsos.

### Determinar el campo magnético generado por los imanes

Debido a los límites físicos existentes para el diseño del generador, se buscaron elementos de alto rendimiento además de tamaño reducido. Por esta razón, se decidió emplear imanes de neodimio grado N52 para la inducción electromagnética. La geometría de los objetos ferromagnéticos es variada, contando con 8 cilindros de 10 [mm] de diámetro y 5 [mm] de espesor junto con 8 cubos de 5 [mm] por cada lado. Esta decisión se dio con el objetivo de incrementar el campo magnético y así obtener una mayor cantidad de energía aprovechando el movimiento de los animales. A partir de los planos, se conoce que la distancia disponible entre imanes y bobinas es de 2.2 [mm] aproximadamente.

*Supermagnete* es una empresa alemana especializada en la venta y asesoramiento en imanes de gran capacidad. En su sitio web presentan fórmulas para calcular la densidad de flujo magnético  $B$  en distintas geometrías de imanes disponibles en el mercado.

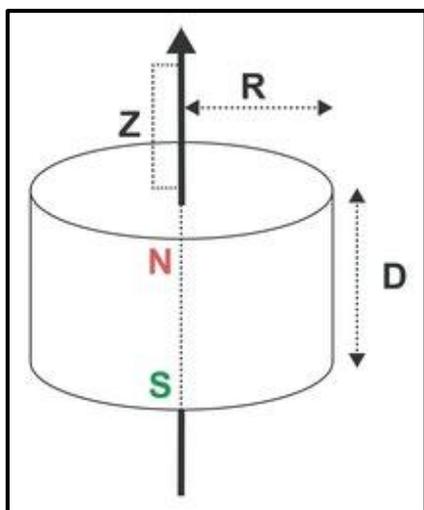


Figura 29. Diagrama de imán cilíndrico. Fuente: Supermagnete.

$$B_{cyl} = \frac{Br}{2} \left( \frac{D+z}{\sqrt{R^2 + (D+z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{R^2 + z^2}} \right) \quad (31)$$

Dónde:

- Br es el campo magnético remanente (disponible en *datasheets*)
- R es el radio del imán
- D es el espesor del imán
- Z es la distancia entre el polo y la superficie.

(Información obtenida de Supermagnete)

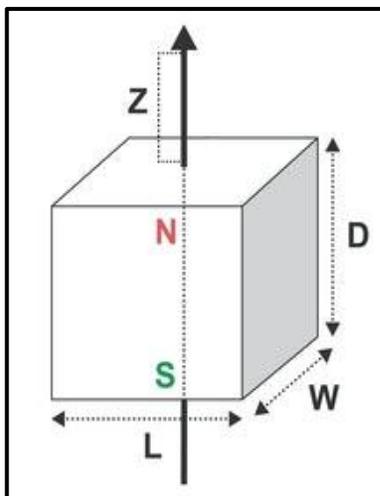


Figura 30. Diagrama de imán cilíndrico. Fuente: Supermagnete.

$$B_{cub} = \frac{Br}{\pi} \left[ \arctan \left( \frac{LW}{2z\sqrt{4z^2 + L^2 + W^2}} \right) - \arctan \left( \frac{LW}{2(D+z)\sqrt{4(D+z)^2 + L^2 + W^2}} \right) \right] \quad (32)$$

Dónde:

- Br es el campo magnético remanente (disponible en *datasheets*)
- L es la base del imán
- W es el espesor del imán
- D es la altura del imán
- Z es la distancia entre el polo y la superficie.

(Información obtenida de Supermagnete)

El valor de  $Br$  se puede determinar de las hojas de datos para los imanes respectivos. Arnold Magnetic technologies ofrece esta información resumida en la siguiente tabla:

Tabla 38. Propiedades Magnéticas en Imanes grado N52. Fuente: Arnold Magnetic Technologies.

Magnetic Properties	Characteristic	Units	min.	nominal	max.
	<b>Br</b> , Residual Induction		Gauss	14,200	14,500
		mT	1420	1450	1480
<b>H<sub>cB</sub></b> , Coercivity		Oersteds	10,500	12,300	14,100
		kA/m	836	979	1122
<b>H<sub>cJ</sub></b> , Intrinsic Coercivity		Oersteds	11,000		
		kA/m	875		
<b>BHmax</b> , Maximum Energy Product		MGOe	49	51	53
		kJ/m <sup>3</sup>	390	406	422

Aplicando las fórmulas 31 y 32, se obtiene el valor del campo magnético para cada geometría.

$$B_{cyl} = 0.3035 [T]$$

$$B_{cub} = 0.2265 [T]$$

Sumando estos resultados, se obtiene el valor de campo total.

$$B_T = 0.53 [T]$$

### Simulación del modelo dinámico

Para seleccionar la posición más favorable en cuanto a los polos de los imanes al momento de colocarlos en el rotor como se muestra en la Figura 31, se simuló dos configuraciones empleando el software *COMSOL Multiphysics* y así utilizar el arreglo que presente una mayor densidad de campo magnético con líneas de campo magnético que beneficien la inducción sobre los embobinados colocados en el estator.

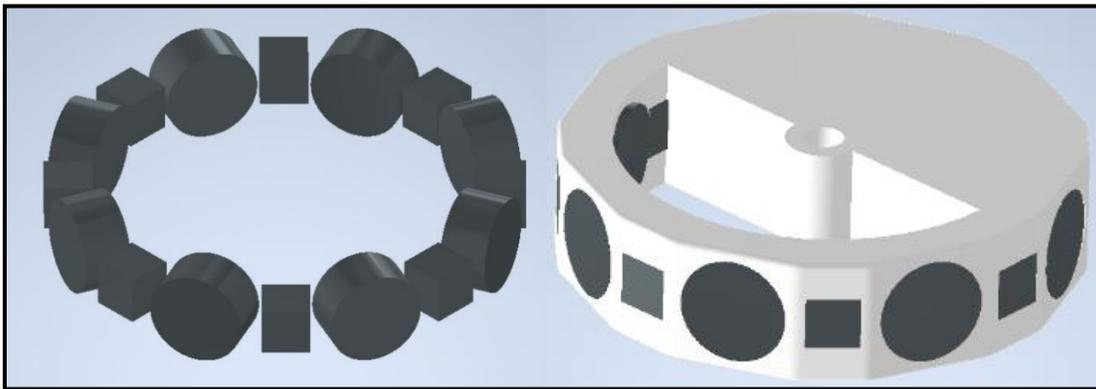
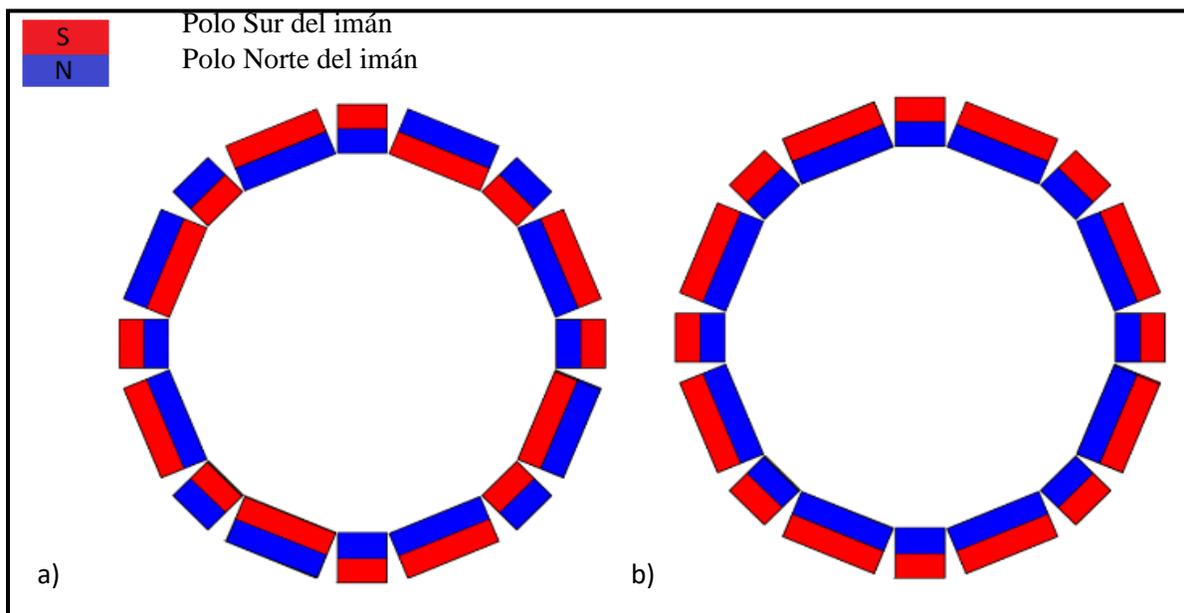


Figura 31. Vista isométrica de Ensamble de imanes dentro del rotor.

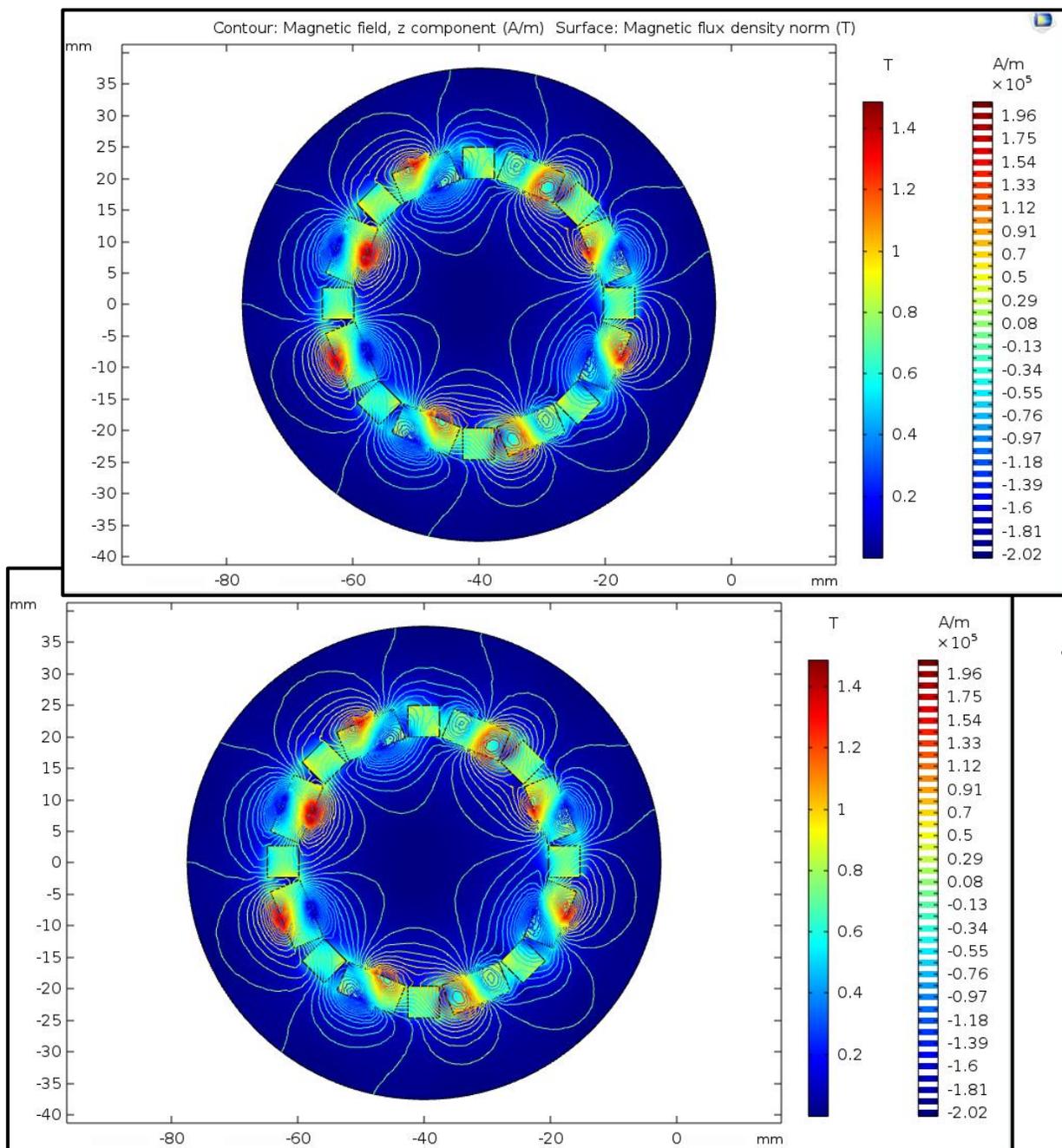
Las configuraciones fueron: polos de los imanes alternados alrededor del rotor como se observa en la Figura 32 (a) y con los polos de todos los imanes iguales en la misma dirección radial Figura 32 (b).



*Figura 32. a) Configuración de imanes alternando los polos. b) Configuración de imanes con el mismo polo.*

Para la simulación se consideró un estudio 3D estacionario de campos magnéticos sin corrientes en la que la geometría de los imanes fue diseñada dentro de una atmósfera; los materiales tanto para imanes y atmósfera fueron asignados: N52 y aire respectivamente. Se emplearon coordenadas cilíndricas por la conveniencia del caso ya que la densidad de flujo remanente se encuentra en la dirección radial: dirección que será negativa en el caso de que la polaridad del imán externo sea sur y positiva si la polaridad es norte. Después de seleccionar el mallado adecuado se desarrolla la simulación por análisis elementos finitos. Se realizó un plano de corte situado en la mitad de los imanes para visualizar los resultados; en dicho plano se graficó la densidad de flujo magnético superficial y las líneas de campo magnético como se observa en la Figura 33, donde los colores en la superficie de los imanes representan un valor de densidad de flujo magnético cuantificado por la leyenda continua que posee unidades T; y las líneas de color en el contorno de los imanes representan la distribución del campo

magnético cuyo valor viene dado en la leyenda derecha de las imágenes.



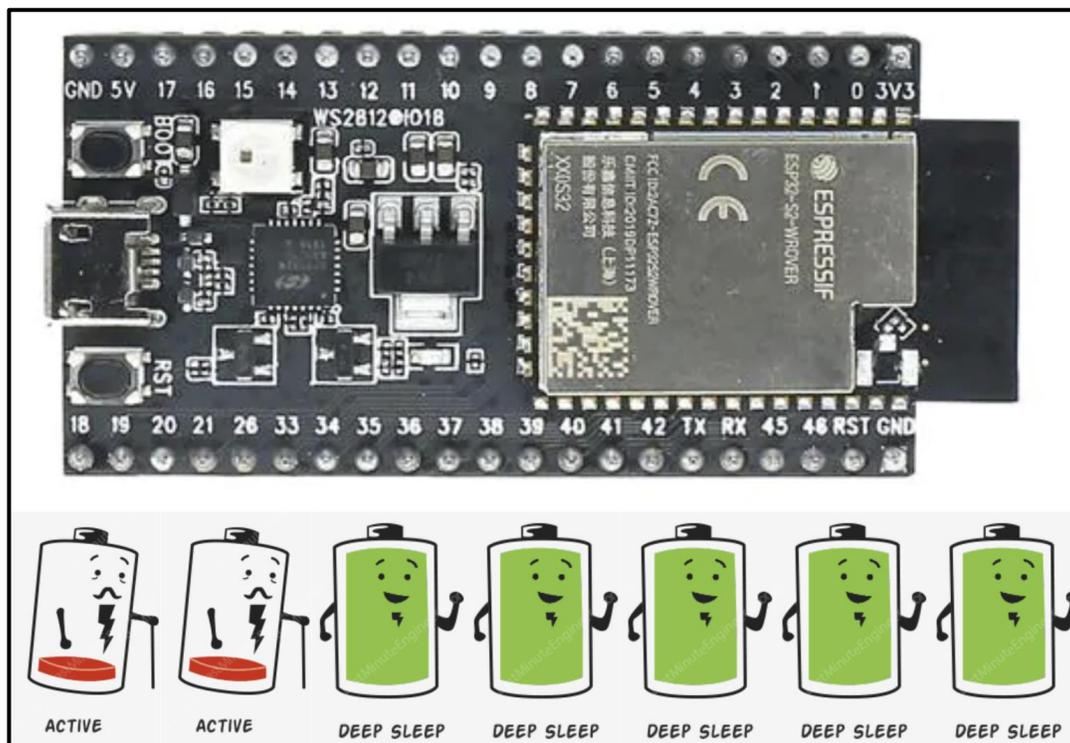
Resultado para la configuración de polos alternados.

b) Resultado para la configuración de polos externos iguales.

Figura 33. Densidad de flujo magnético superficial y las líneas de campo magnético para la configuración de polos externos iguales.

### Cálculo demanda de energía del dispositivo o Perfil de consumo

Para realizar este cálculo de energía demandada se consultó al cliente el dispositivo electrónico que emplean para la geolocalización y de qué forma está programado. Supo informar que emplean un chip ESP32, el cual envía datos a través de wifi cada 5 minutos y le toma 2 minutos en realizar esta tarea.



*Figura 34. Modos de consumo del microprocesador ESP32.*

Mediante esta información se buscó en las hojas de datos del fabricante tanto especificaciones técnicas como perfiles de consumo. De lo cual se halló que el chip opera a 3.4 voltios y que podría encontrarse fluctuando entre dos modos de consumo que se ajustan a las especificaciones mencionadas por el cliente.

#### Modo Activo

El modo en el que se encontraría el chip al enviar los datos sería el modo Activo. En este modo todas las funciones del chip se encuentran activas todo el tiempo, es decir: el módulo de Wifi, los núcleos de procesamiento y otros módulos.

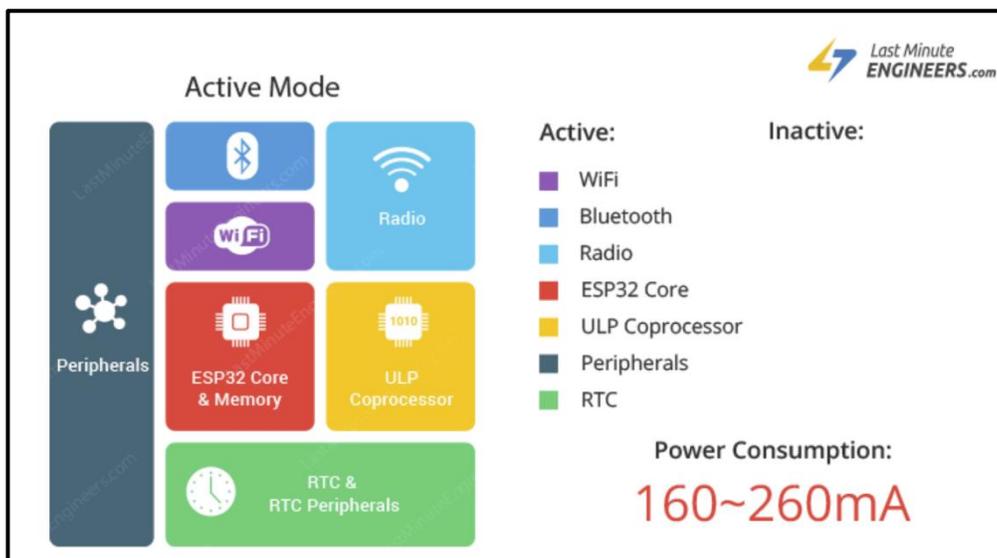


Figura 35. Características de consumo máximo en el ESP32. Fuente: Last Minute Engineers.

Como se puede ver este es el modo más ineficiente porque exige un mayor consumo de energía (Last minute Engineers, 2019).

### Modo Deep Sleep

El modo Deep Sleep o reposo profundo consiste en una alternativa de consumo de energía en el que el CPU, RAM y los periféricos digitales son apagados y solo se mantiene activo el controlador RTC, el coprocesador ULP y las memorias RTL.

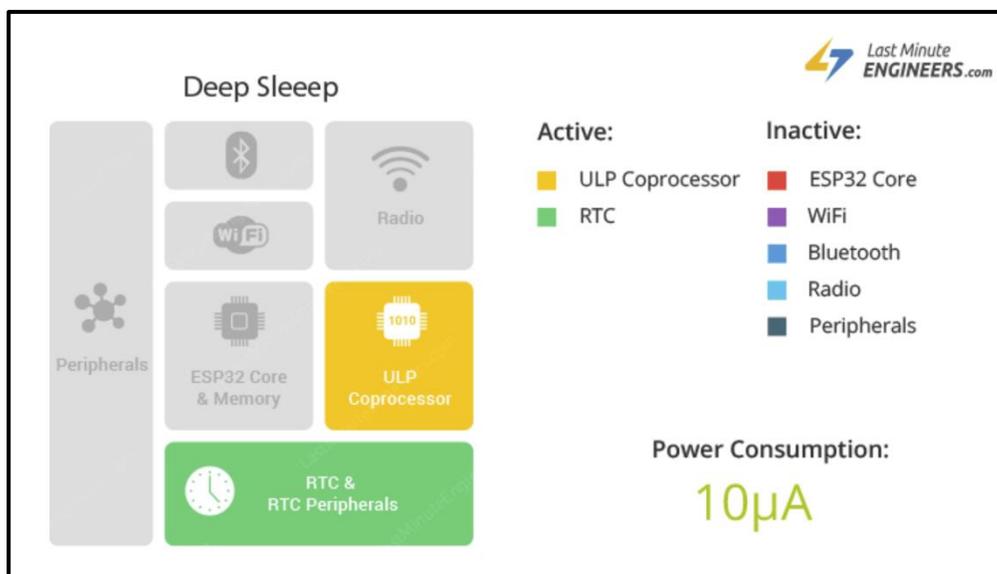


Figura 36. Características de consumo en Deep sleep del ESP32. Fuente: Last Minute Engineers.

Durante este modo el coprocesador ULP realiza las mediciones del sensor y despierta al sistema principal. También la memoria principal es desactivada y sus datos son bloqueados por seguridad, a pesar de ello la memoria RTC se mantiene encendida por lo que los contenidos se mantienen preservados en ella y pueden ser recuperados al despertar el sistema (Last minute Engineers, 2019).

Al saber estos datos de consume se puede estimar la demanda de energía requerida por el chip:

Tabla 39. Datos de consumo del microprocesador ESP32.

Datos de funcionamiento del dispositivo electrónico		
Voltaje	3.6	[V]
Corriente DEEP SLEEP	0.00001	[A]
Corriente ACTIVE	0.26	[A]

Al saber la corriente y el voltaje se puede obtener la potencia y de esta forma al saber también los tiempos en los que son activados cada modo se puede realizar un cálculo de energía.

#### Consumo modo Deep Sleep

$$3.6 [V] * 0.00001 [A] = 3.6 \times 10^{-5} [W]$$

$$3.6 \times 10^{-5} [W] * 5 [min] = 1.8 \times 10^{-4} [W * min]$$

$$1.8 \times 10^{-4} [W * min] \times \frac{60 s}{1 min} = 0.0108 [W * s]$$

Consumo modo Active

$$3.6 [V] * 0.26[A] = 0.936 [W]$$

$$3.6 \times 10^{-5} [W] * 2 [min] = 1.872 [W * min]$$

$$1.8 \times 10^{-4} [W * min] \times \frac{60 s}{1 min} = 112.32 [W * s]$$

Para mayor exactitud y rapidez se replicó el consumo de energía para cada minuto durante una hora de acuerdo con la información data por el cliente y obtenida del fabricante.

*Tabla 40. Perfil del consumo para el ESP32-Datos tabulados.*

Tiempo [min]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	Energía [W*m]	Energía [W*s]
1	3.6	0.00001	0.000036		
2	3.6	0.00001	0.000036		
3	3.6	0.00001	0.000036		
4	3.6	0.00001	0.000036		
5	3.6	0.00001	0.000036	0.00018	0.0108
6	3.6	0.26	0.936		
7	3.6	0.26	0.936	1.872	112.32
8	3.6	0.00001	0.000036		
9	3.6	0.00001	0.000036		
10	3.6	0.00001	0.000036		
11	3.6	0.00001	0.000036		
12	3.6	0.00001	0.000036	0.00018	0.0108
13	3.6	0.26	0.936		
14	3.6	0.26	0.936	1.872	112.32
15	3.6	0.00001	0.000036		
16	3.6	0.00001	0.000036		
17	3.6	0.00001	0.000036		
18	3.6	0.00001	0.000036		
19	3.6	0.00001	0.000036	0.00018	0.0108
20	3.6	0.26	0.936		
21	3.6	0.26	0.936	1.872	112.32
22	3.6	0.00001	0.000036		
23	3.6	0.00001	0.000036		

24	3.6	0.00001	0.000036		
25	3.6	0.00001	0.000036		

Para más información la tabla completa se encuentra anexada. Con los datos de la tabla al graficarlos se obtuvo un perfil de consumo para una hora, dado que el comportamiento es repetitivo esta tendencia continuara durante todo día.

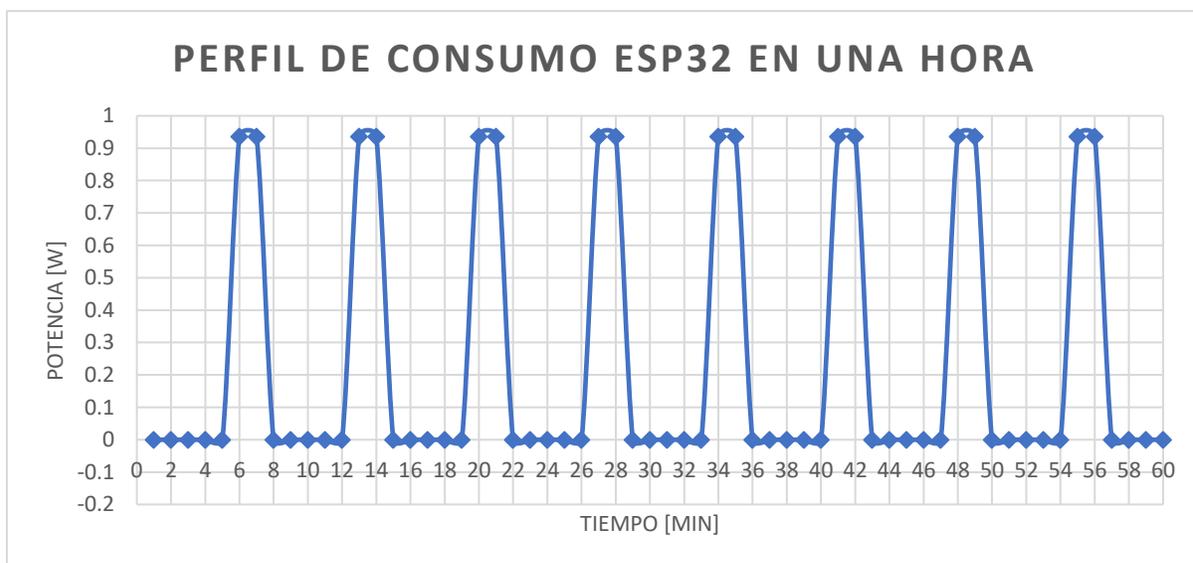


Figura 37. Perfil de consumo ESP 32 en una hora.

Como se puede ver se tiene picos de alto consumo debido al modo Active los cuales aparecen cada 5 minutos y duran por 2 minutos. Durante los 5 minutos de espera hasta enviar nuevos datos la gráfica muestra que los consumos están en cero debido a que el consumo es sumamente bajo gracias al modo Deep Sleep. Este consumo del ESP32 se mantendrá de esta forma durante todo el día debido a que así ha sido programado para operar.

A continuación, se muestra la demanda energética del chip en varias unidades para una hora y para un día de consumo. Esto será de ayuda para cálculos futuros para la determinación de una batería adecuada.

Tabla 41. Resultados de Consumo.

Resultados de Consumo		
<b>Energía en una hora</b>	14.977584	[W*min]
	898.65504	[W*s]
	0.2496264	[W*h]
<b>Energía en un día</b>	5.9910336	[W*h] al día

## Decaimiento de los imanes de Neodimio N52

Los imanes de neodimio son fabricados a partir de las llamadas tierras raras al contener Neodimio, Hierro y Boro. Este tipo de imán permanente es considerado de los más poderosos en relación con los clásicos imanes de ferrita o cerámica, se clasifica por grados desde el 35 al 52 siendo este último el que posee el mejor desempeño magnético.

Existen dos factores que afectarían el tiempo de vida de este tipo de imanes:

- Temperatura

Este tipo de imán cuenta con una buena resistencia a ser desmagnetizados por el paso del tiempo o por influencia de otros imanes al estar juntos, pero si estos imanes se encuentran en un ambiente cuya temperatura excede los 80[°C] estos se verán fuertemente afectados y perderán completamente su magnetismo si son calentados por encima de su temperatura de Curie de 310 grados Celsius (Imanes123, 2006).

- Corrosión

Si el enchapado del imán se ve afectado y fluidos como el agua llegan a su interior, este generará óxido y consecuentemente se deteriorará el desempeño magnético.

Razón por la cual este tipo de imán cuenta con un recubrimiento de triple capa de níquel y cobre para mejor protección contra oxidación y corrosión además de que sirve como refuerzo para el material que tiende a ser muy frágil (First 4 Magnets, 2020).

De acuerdo con First 4 Magnets los imanes de neodimio pueden perder una fracción de su fuerza entre 1% y 3% cada 10 años e incluso algunos textos indican que la pérdida no será mayor al 10% cada 100 años. Como se puede evidenciar la pérdida de magnetismo de los imanes N52 debido al tiempo no es un factor relevante que pueda afectar el desempeño de mecanismo de generación de energía, lo que sí es un factor que puede influenciar es la corrosión por lo que el diseño del mecanismo debe ser hermético para evitar este tipo de consecuencias que pueden averiar o reducir la vida útil del mecanismo.

### Estimación de Potencia del Sistema

A razón de estimar la potencia del sistema se lo examinará a éste como un circuito con tres elementos en serie: un inductor  $R$ , un capacitor  $C$  y una Resistencia  $R$  como se observa en la Figura 38.

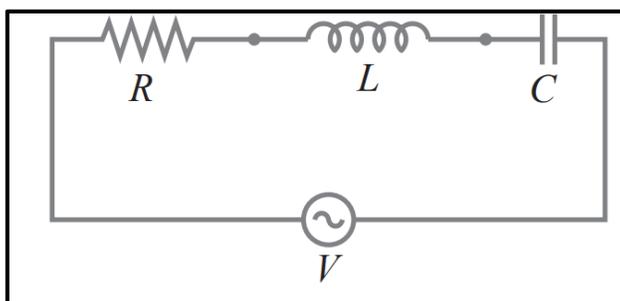


Figura 38: Circuito LRC.

La reactancia inductiva y capacitiva,  $X$ , establecida para los resistores, es la constante de proporcionalidad entre voltaje y corriente.

A través de un inductor:

$$V = IX_L \quad (33)$$

Y a través de un capacitor:

$$V = IX_C \quad (34)$$

La reactancia en un inductor aumenta con la frecuencia

$$X_L = 2\pi fL \quad (35)$$

Mientras que la reactancia de un capacitor disminuye con la frecuencia

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (36)$$

La corriente a través de un resistor siempre está en fase con el voltaje a través de él, pero en un inductor la corriente se atrasa al voltaje en  $90^\circ$ , y en un capacitor la corriente adelanta al voltaje en  $90^\circ$ . En un circuito LRC en serie, la impedancia total  $Z$  se define mediante el equivalente de  $V=IR$  para resistencia, a saber,

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{Z} \quad (37)$$

Donde:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (38)$$

Y así finalmente, la potencia promedio del sistema es determinada por:

$$\bar{P} = I_{rms}^2 R \quad (39) \quad (\text{Giancolli, 2009}).$$

Con las ecuaciones planteadas es posible calcular el valor de potencia. Empleando el instrumento de medida *Universal LCR Meter* se tomaron mediciones en los bornes del prototipo y se midieron los siguientes valores para el circuito RLC representado en la Figura 39

$$R = 198.5 [\Omega]$$

$$L = 12.54 [mH]$$

$$C = 282.1 [nF]$$

La señal obtenida de voltaje con el osciloscopio al momento de que el prototipo oscila es la que se presenta a continuación:

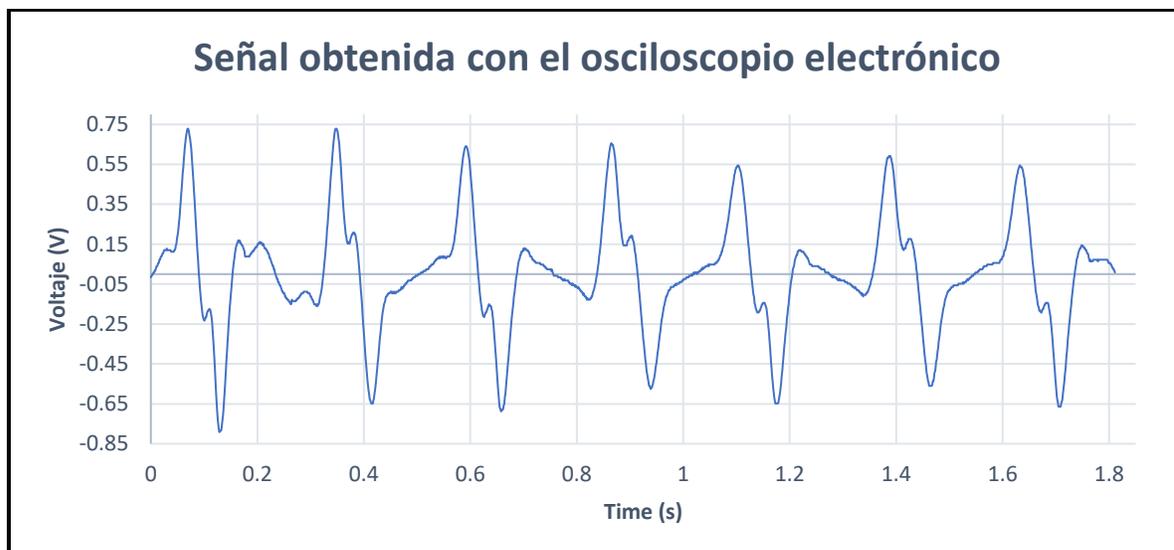


Figura 39. Señal de voltaje capturada con el osciloscopio.

Se obtuvo a una frecuencia de 1 kHz el voltaje pico de  $V_0 = 0.728$  [V] y  $V_{rms} = 0.5147$  [V]

Utilizando las ecuaciones 35-39 se encuentra que:

Tabla 42. Potencia promedio.

$Z$	223.7 [ $\Omega$ ]
$I_{rms}$	2.3 [mA]
$\bar{P}$	1.18 [mW]

**Estimación de Potencia del Sistema: ¿Qué cantidad de energía mecánica invertida por el animal se convierte en electricidad?**

El mecanismo desarrollado tiene la capacidad de producir energía eléctrica mediante el giro de un péndulo acoplado a una masa oscilante cuya finalidad es incrementar la inercia y así aprovechar los impulsos externos en la transducción energética.

Sin embargo, estas perturbaciones físicas son causadas por el animal al momento de alimentarse, por lo que existe una “inversión” de energía en este proceso. Gracias a esto es posible determinar qué cantidad de energía invertida logra transformarse en electricidad

Para ello, se efectúa un análisis de energía potencial focalizado en la cabeza y cuello de la vaca. De acuerdo con Di Marco, las zonas de interés representan entre el 15 y 17% del peso total del animal. A pesar de ello, la distancia o altura en la cual sucede el movimiento es de 10 [cm] aproximadamente. Esto debido a que el animal pasa gran parte del tiempo con la cabeza abajo al momento de comer y no existen cambios significativos al respecto.

Con esta información en mente, se emplea la ecuación empírica de Energía Potencial.

$$P_e = mgh \quad (40)$$

*Donde:*

*m es la masa*

*g es la aceleración de la gravedad*

*h es la altura*

Para análisis previos, se estableció que el peso de las vacas referencial es de 600 [kg]. Una vez realizados los cálculos se obtiene que:

$$P_e = 94.176 [J]$$

Tras pruebas en el campo, se logró evidenciar que el tiempo promedio por ciclo, es decir, el tiempo en el cual la vaca mantiene la cabeza por el suelo es de aproximadamente 2.5 [s]. Con este dato, se puede estimar la potencia en el movimiento.

$$P_v = 37.670 [W]$$

Finalmente, la eficiencia respecto a la potencia de salida del dispositivo es mucho menor al 1%. Esto es algo de esperarse dado que el movimiento del animal no es transmitido

directamente en la inducción electromagnética. Mas bien, el impulso acciona el sistema pendular que ocasiona el movimiento del rotor y a partir de ello, se genera energía.

El mismo análisis puede realizarse al considerarse únicamente el movimiento del dispositivo en cuestión. Los cálculos indican que la energía potencial tras el movimiento bordea los 0.164 [J]. Al estimar la potencia sobre el mismo periodo de tiempo que en el caso anterior, se obtienen 0.0328 [W].

La diferencia principal entre el análisis con la cabeza y cuello de la vaca frente al generador es que la eficiencia en transducción bordea el 4%. Esto se debe a que existe una cantidad de masa menor, por lo que la energía potencial obtenida del movimiento no es elevada. A su vez, la potencia de salida del mecanismo es de 1.2 [mW], este valor es esperado dada la señal alterna obtenida por efectos de inducción electromagnética.

## 10. Plan de pruebas del prototipo

*Tabla 43. Plan de prueba del prototipo.*

<b>Criterios de Ingeniería</b>	<b>Consideraciones</b>	<b>Prueba</b>	<b>Rendimiento predicho</b>	<b>Rendimiento actual</b>
<b>Costos</b>	Dentro del presupuesto	Costar menor a 600 \$	Alto	Alto
<b>Elasticidad</b>	Propiedad del cuerpo sólido para no deformarse cuando se le aplica una fuerza	Realizar un ensayo de compresión en la carcasa. Comprobar que resista la presión ejercida por la pata de una vaca sin romperse. Para la prueba se emplea una prensa hidráulica del laboratorio que ejercerá una fuerza sobre el área equivalente a la pezuña de la vaca sobre la carcasa.	Alto	Alto
<b>Hermeticidad de sólidos (1ra cifra de</b>	Protección del equipo contra el ingreso de	Ensayos para la protección de cuerpos sólidos extraños indicados	Alto	Alto

<b>grado de protección IP)</b>	cuerpos sólidos extraños	por la por la primera cifra característica IP		
<b>Hermeticidad de líquidos (2da cifra de grado de protección IP)</b>	Protección contra la penetración de agua	Ensayos para la protección contra la penetración del agua indicada por la segunda cifra característica IP	Alto	Medio
<b>Versatilidad</b>	Capacidad de adaptarse con facilidad y rapidez a funciones	Pedir a una persona que desarme y arme los componentes del prototipo y lo coloque en la representación del cuello de una vaca	Alto	Alto
<b>Resistencia al calor</b>	Capacidad de resistir temperaturas elevadas	Propiedades del material	Alto	Alto
<b>Durabilidad</b>	Resistencia a golpes y caídas	Golpear con un martillo la carcasa y dejarla caer de distintas elevaciones	Alto	Alto

Para definir los grados de protección con relación a la protección de equipos ubicados dentro del envoltente contra sólidos y líquidos se emplea la norma IEC 60529 que define el código IP que viene dado por 2 números y 2 letras (opcionales). Ej: IP23CH

El primer dígito establece la protección de las personas contra la cercanía de las partes interiores a la envoltura y la protección del equipo contra la penetración de cuerpos sólidos (números de 0 a 6).

El segundo dígito establece la protección del equipo dentro de la envoltura contra efectos debido a la penetración de agua (números de 0 a 8).

En las tablas a continuación se presenta una descripción abreviada del significado de los números del código IP.

Tabla 44. Primera cifra grado de protección IP.

<b>1ra cifra grado de protección IP</b>		
<b>1ra cifra</b>	<b>1er significado: protección del equipo contra la penetración de cuerpos sólidos</b>	<b>2do significado: protección de las personas contra la cercanía de las partes interiores a la envoltura</b>
<b>0</b>	no protegido	no protegido
<b>1</b>	De $\varnothing \geq 50$ mm	el dorso de la mano
<b>2</b>	De $\varnothing \geq 12.5$ mm	dedo (12x80 mm)
<b>3</b>	De $\varnothing \geq 12.5$ mm	herramienta (2.5mm)
<b>4</b>	De $\varnothing \geq 12.5$ mm	alambre (1 mm)
<b>5</b>	Protegido contra el polvo	alambre (1 mm)
<b>6</b>	Protegido totalmente contra el polvo	alambre (1 mm)

Tabla 45. Segunda cifra grado de protección IP.

<b>2da cifra grado de protección IP: protección del equipo dentro de la envoltura contra efectos debido a la penetración de agua</b>	
<b>0</b>	no protegido
<b>1</b>	protegido contra de las caídas verticales de gotas de agua
<b>2</b>	protegido contra de las caídas de agua con inclinación máxima de 15° a cada lado de la vertical
<b>3</b>	protegido contra el agua en forma de lluvia con inclinación máx. de 60° a cada lado de la vertical
<b>4</b>	protegido contra el agua en todas las direcciones
<b>5</b>	protegido contra chorros de agua desde cualquier dirección
<b>6</b>	protegido contra fuertes chorros de agua desde cualquier dirección
<b>7</b>	protegido contra los efectos de la inmersión temporal en agua
<b>8</b>	protegido contra los efectos de la inmersión prolongada en agua

(Galizia, 2001)

Se procede a realizar el documento de verificación que se empleará para el cumplimiento de cada criterio del plan de pruebas descrito anteriormente. En el Apéndice C detallan los criterios seleccionados, las consideraciones y resultados de las pruebas.

### **Descripción del plan de pruebas realizado para determinar protección IP**

Ensayo de carga máxima soportada por la carcasa

Con el objetivo de garantizar que el mecanismo desarrollado se encuentre protegido plenamente se realizó un ensayo en con el objetivo de obtener la carga máxima aproximada que podría recibir este componente en caso de que este llegue a caerse y una vaca se recueste sobre este o alguna cuestión parecida suceda. Par ello se calibro la maquina bajo los siguientes parámetros recomendados por el instructor:

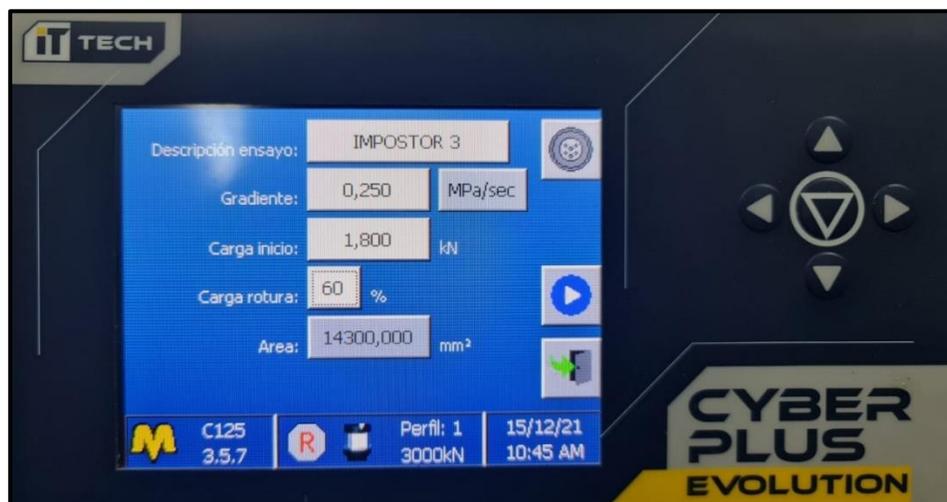


Figura 40: Parámetros empleados en el ensayo de compresión de la carcasa.

Se colocó elevadores en la maquinaria y se procedió a realizar el ensayo:

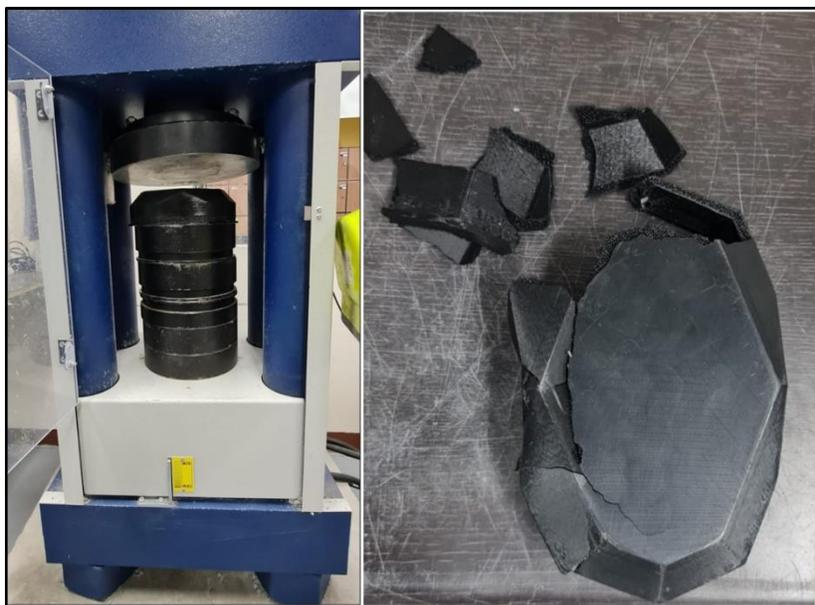


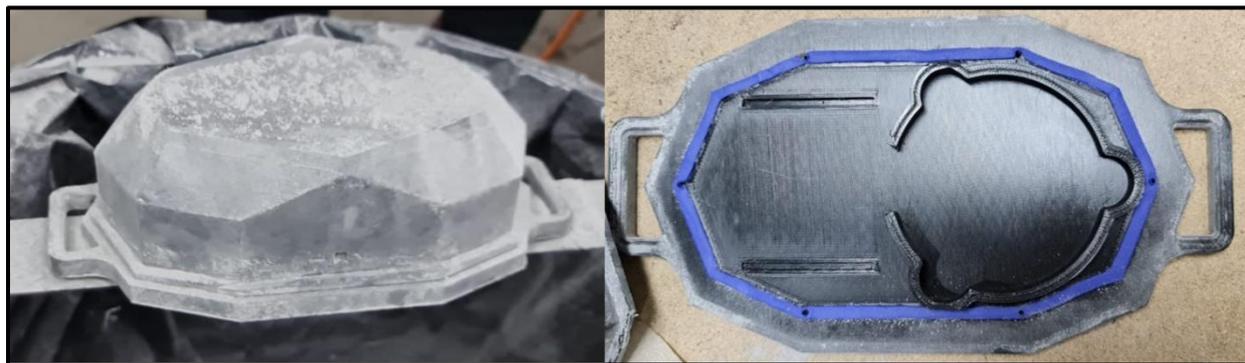
Figura 41: Carcasa antes y después del ensayo de compresión.

La máquina comprimió la carcasa protectora hasta destruirla registrando así la carga máxima que puede soportar, alcanzando 15.764 kN. Esto implica que bajo los parámetros establecidos el componente puede soportar 1608 kilogramos lo cual brinda una amplia protección al mecanismo en caso de que un evento de aplastamiento llegase a suceder.

#### Ensayo de hermeticidad de sólidos

El dispositivo está pensado para ser implementado en ambientes a la intemperie por lo que se debe procurar que la carcasa evite el paso de partículas de polvo que pueden afectar a los componentes. Es por ello que se implementó un empaque de etil-vinil-acetato con el fin de buscar hermeticidad a partículas. Para ello se probó con dos materiales finos a que se encontraban a disposición: sulfato de aluminio y talco.

Con respecto al sulfato de aluminio se procedió a esparcir generosamente este material en todas las direcciones posibles y con distinta fuerza. Una vez que el componente se encontró completamente cubierto se procedió a abrir la carcasa para ver si las partículas lograron ingresar en el interior, se encontró un resultado favorable dado que no se evidenció un ingreso de estas partículas. De acuerdo con Aqua Integral (2021), proveedor de Sulfato de aluminio tipo A como el empleado en el ensayo realizado, el material puede contener partículas menores a  $75\ \mu\text{m}$  por lo que en función del ensayo realizado la carcasa tendría hermeticidad a este tamaño de partículas.



*Figura 42: Ensayo de hermeticidad con sulfato de aluminio.*

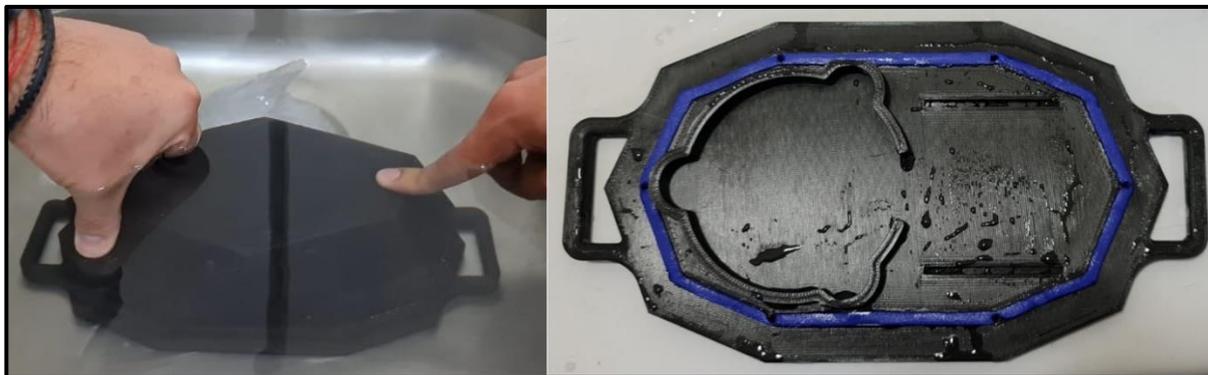
Se realizó un ensayo con exactamente la misma metodología que con el sulfato de aluminio, pero con esta vez empleando talco cosmético también llamado silicato de magnesio hidratado. Después de realizar el ensayo se abrió y se comprobó que no existió contaminación en el interior. Las partículas de talco son de un tamaño entre  $0.1 \mu\text{m}$  y  $10 \mu\text{m}$  (Soriano, G. E., Delgado G, Párraga J, & Delgado R, 2002) por lo que al evitar su ingreso hace que la carcasa sea hermética a este tipo de partículas.



*Figura 43: Ensayo de hermeticidad con talco cosmético.*

### Ensayo de hermeticidad de líquidos

Para realizar este ensayo se empezó con la prueba más rigurosa según los estándares IP, la cual consiste en sumergir la carcasa completamente por al menos 3 minutos. Para ello se llenó un espacio de agua, se selló la carcasa y se sumergió. Una vez realizado el proceso se evidencio que el agua ingreso al interior por lo que el empaque empleado no hace que el interior sea hermético ante inmersiones.



*Figura 44: Ensayo de hermeticidad de líquidos, inmersión total en agua.*

Se realizó otro ensayo en el que se simulaba chorros en varias direcciones entre 3 a 5 minutos, para ello se selló la carcasa y se expuso la carcasa a un chorro potente mientras se la movía en varias direcciones. Una vez realizado el proceso se abrió la carcasa y se evidenció que no ingresó agua en el interior por que bajo este tipo de situaciones el mecanismo se encuentra protegido.



*Figura 45: Ensayo de hermeticidad de líquidos, exposición a chorros en varias direcciones.*

En función de los ensayos realizados y los resultados obtenidos, se puede decir que de acuerdo con los parámetros de los grados de protección IP la carcasa provee un grado de protección IP65.

## 11. Seguridad a través del diseño

Al momento de ejecutar un proyecto, es necesario considerar e identificar los posibles riesgos que pueden surgir en cualquier etapa de su realización. Este factor es muy importante, debido a que dichos riesgos pueden retrasar la ejecución del proyecto o aún peor, impedir que el proyecto finalice. Por dicha razón, se identificarán los posibles riesgos del proyecto “Dispositivo Generador de Energía por medio de vibraciones de ganado vacuno y bobino” para que a través del análisis de estos se puedan gestionarlos o manejarlos de la mejor manera posible y así reducir su impacto en el proyecto. Para el respectivo análisis, se utilizarán las siguientes tablas que valorará tanto de forma cualitativa como de forma cuantitativa los riesgos del proyecto.

*Tabla 46. Valoración Cualitativa.*

<b>Impacto</b>	Severo			
	Mediano			
	Bajo			
	Nulo			
		Baja	Media	Alta
		<b>Probabilidad</b>		

*Tabla 47. Valoración Cuantitativa.*

<b>Impacto</b>	5					
	4					
	3					
	2					
	1					
		1	2	3	4	5
		<b>Probabilidad</b>				

Consecutivamente, se utilizará una tabla para registrar los riesgos hallados, como también la solución tomada para manejarlos de una manera adecuada. Esta tabla se puede encontrar en el APENDICE C. De dicha tabla, se analizó los riesgos que podrían causar una máxima afectación al proyecto, y se presenta a continuación su solución:

**Riesgo:** Escasez de componentes en el mercado nacional

**Prioridad:** 16

El riesgo que posee la prioridad mayor es el hecho de que se presente la escasez de componentes en el mercado nacional (1), alegando principalmente tanto al mecanismo de transducción como al de almacenamiento, ya que al tratarse de un prototipo que no existe en el mercado, se requerirán elementos específicos que por lo general no son producidos en masa o existen pocos ejemplares en el país. Debido a que es bastante probable que ocurra dicha escasez, esto podría dificultar la elaboración de cada uno de los módulos requeridos y su impacto será que no se pueda manufacturar ni realizar los ensayos necesarios del modelo; aumentando el costo y retrasando por completo el proyecto. Este riesgo se lo manejará estando preparados y se lo transferirá, es decir que se tomará tiempo con antelación para la búsqueda de los componentes, y si no se encuentran en el mercado nacional, se optará por importarlos en el exterior.

**Riesgo:** Retraso de entrega de acelerómetros para determinar la frecuencia natural

**Prioridad:** 15

Seguido de esto, presenta una prioridad alta el retraso de la entrega de acelerómetros para la determinación de la frecuencia natural (2), riesgo que ya ocurrió, pero se lo supo solventar

utilizando los acelerómetros de los teléfonos inteligentes, registrando los datos de aceleraciones y encontrando su espectro de frecuencia a través de la transformada de Fourier con apoyo de la aplicación *Phyphox*; el impacto que hubiese generado afectaría en los cálculos de diseño del mecanismo de transducción ya que se retrasarían.

**Riesgo:** Materiales inadecuados para la construcción de la carcasa

**Prioridad:** 15

Además, materiales inadecuados para la construcción de la carcasa (3) representa un mismo nivel de prioridad porque si los materiales no poseen una alta resistencia al desgaste, a la corrosión y calor, no son versátiles y tienen baja elasticidad muy probablemente no podrán resistir a las influencias a las que estará expuesto el prototipo y el impacto será que tendrá una baja durabilidad; por ello, se analizaron diversos materiales que sean capaces de soportar las condiciones a las que se someterá el prototipo, evitando así este riesgo.

**Riesgo:** Cálculo erróneo de un componente del mecanismo

**Prioridad:** 15

Por otro lado, un cálculo erróneo de un componente del mecanismo (5) también presentaría un mismo nivel de prioridad que los 2 anteriores, impactaría directamente al nivel de eficiencia del sistema porque no se generaría la energía esperada y no lograría abastecer lo que requieren los aparatos electrónicos que dependerán del mecanismo. Este riesgo se lo manejará con pensamiento crítico, preparándose con la literatura necesaria, compartiendo conocimientos y comprobando los cálculos con la teoría adecuada y ayuda de tutores.

**Riesgo:** Deterioro de los componentes por factores climáticos (polvo, lluvia, rayos UV).

**Prioridad:** 16

Finalmente, en cuanto al riesgo de deterioro de los componentes por factores ambientales y climáticos como: polvo, lluvia, rayos UV, entre otros (II) tiene una alta prioridad debido a que se busca que el dispositivo diseñado pueda mantenerse operativo en el tiempo y que las condiciones climáticas no sean impedimento. Para evitar que esto ocurra se plantea prepararse y evitar mediante el análisis de grados de la norma CEI 60529 la cual es empleada para otorgar los grados de protección IP muy conocidos en dispositivos móviles y tecnologías del momento. Al conocer las consideraciones y parámetros de dicha normativa se puede tener un mejor criterio para la selección de recubrimientos o materiales que ayuden la protección del equipo ante polvo, lluvia y rayos UV. A su vez se puede implementar ciertas consideraciones en el diseño en cuanto a forma y materiales a ser usados en la manufactura.

## 12. Manual de operación y Mantenimiento

### 12.1 OPERACIÓN

#### 12.1.1 Listado de piezas del Dispositivo Generador de Energía por Vibraciones (VEH)

En la siguiente tabla se listan los componentes que integran el mecanismo generador de energía.

*Tabla 48. Listado de piezas VEH.*

ITEM	CANTIDAD	PARTE
1	1	TAPA INFERIOR
2	2	RODAMIENTO
3	1	ESTATOR
4	1	EJE
5	1	ROTOR
6	1	ELEVADOR
7	1	MASA BRONCE
8	1	TAPA SUPERIOR
9	3	NF E 25-111 - M3x30 CLASE 4.8
10	8	IMANES CILÍNDRICOS
11	1	MASA DE ZINC
12	8	IMANES CÚBICOS
13	8	BOBINAS DE COBRE

### 12.1.2 Esquema Integrado del sistema

A continuación, en la figura 46 se muestra un esquema de los componentes con los que cuenta el mecanismo desarrollado:

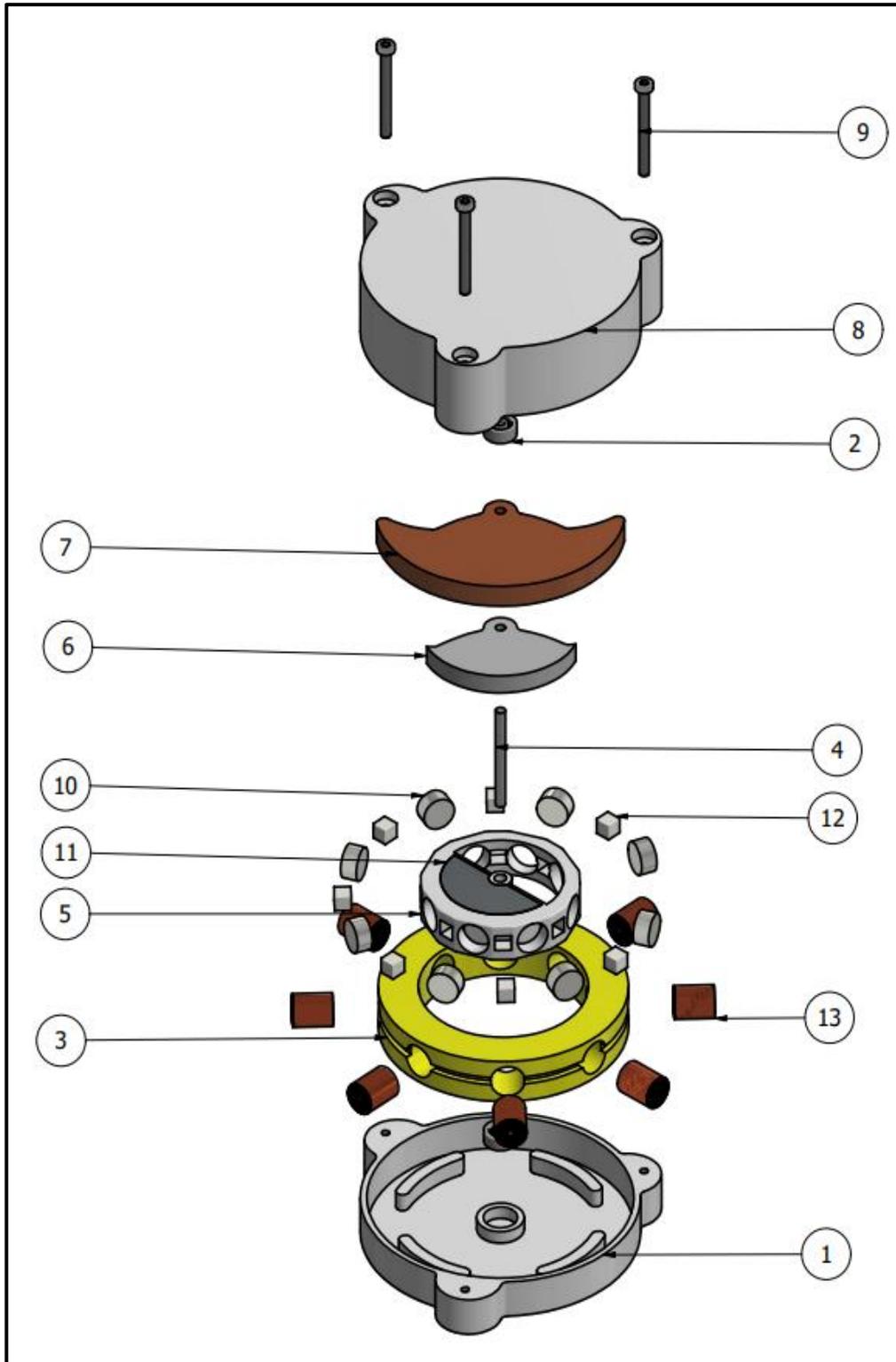


Figura 46: Numeración de partes mecánicas

### 12.1.3 Listado de componente de protección del Dispositivo Generador de Energía por Vibraciones (VEH)

Tabla 49. Listado de piezas VEH.

ITEM	CANTIDAD	PARTE
1	1	CARCASA
2	1	BASE CARCASA

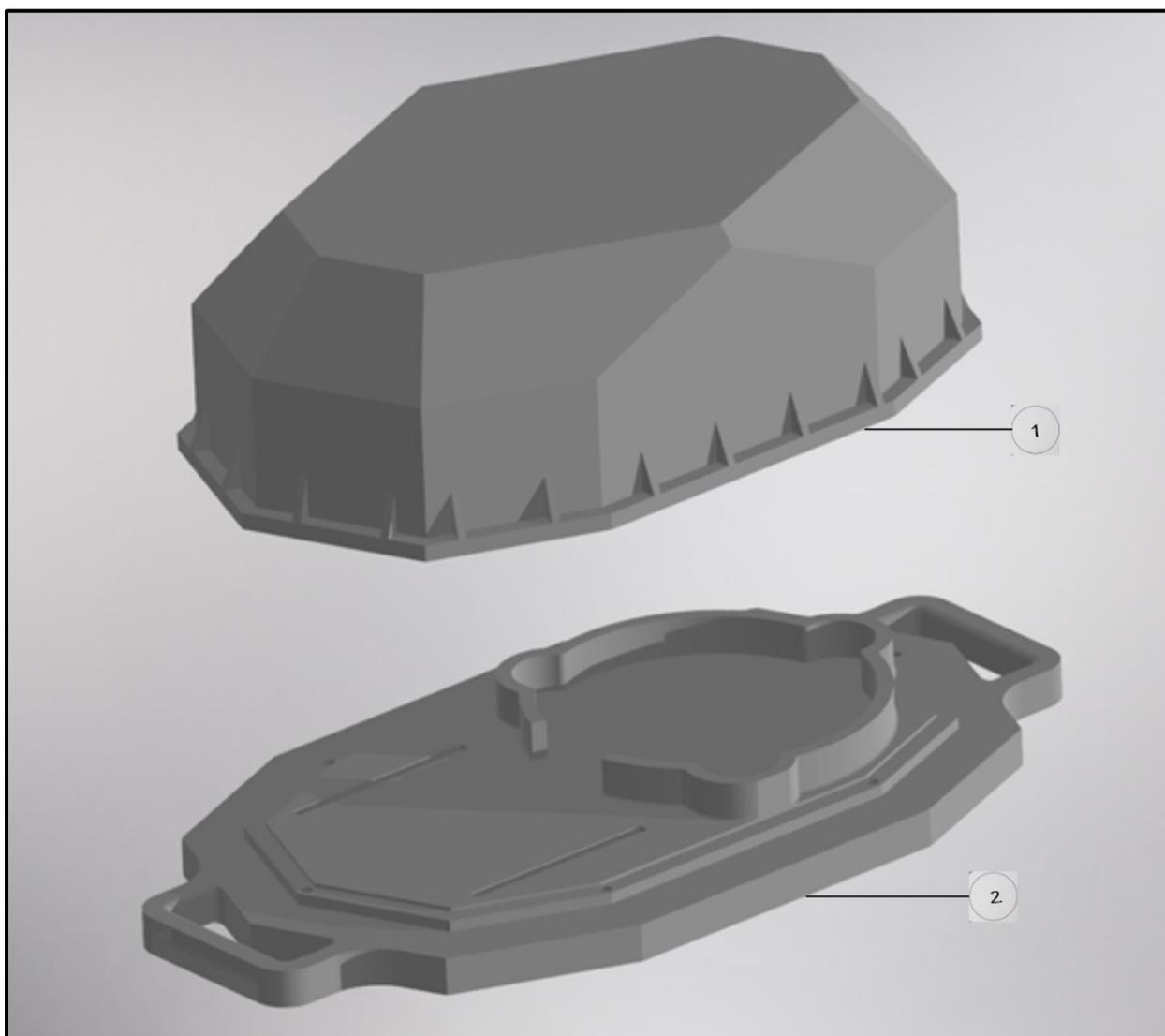


Figura 47: Esquema de la carcasa protectora.

### 12.1.4 Descripción general y características del VEH

El dispositivo generador de energía consta principalmente de un rotor impreso en PLA al que están ensamblados 16 imanes de Neodimio N52 (8 cilíndricos y 8 cúbicos) con una configuración radial de polos magnéticos alternados, en la mitad del rotor, se encuentra una masa de zinc. Toda la geometría está acoplada a un eje de acero inoxidable que está ubicado en el centro y sujeto con dos rodamientos fijos en las tapas superior e inferior, en el eje también está ensamblado una masa excéntrica de bronce adherida a un soporte a razón de incrementar la inercia del sistema; y también consta de un estator al que están ensambladas las bobinas de cobre calibre 36 unidas a la tapa inferior. Para un correcto funcionamiento del sistema, debe ser colocado en posición vertical para que el péndulo situado en el interior pueda oscilar libremente en resonancia con el movimiento del animal y se realice una correcta inducción en los embobinados.

### 12.1.5 Información de Seguridad

*Tabla 50. Información de Seguridad VEH.*

<b>ADVERTENCIA</b>
Para indicar los riesgos de consecuencias graves, como lesiones o mal funcionamiento del equipo, a menos que se obedezcan estrictamente las siguientes normas de seguridad.
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Inmediatamente deje de usar el dispositivo en los siguientes casos.           <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Si el dispositivo o correa está averiado.</li> <li>○ Si los tornillos sobresalen del generador.</li> </ul> </li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Mantener el dispositivo y accesorios fuera del alcance de niños y bebés.           <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Se debe tener cuidado para evitar que un bebé o un niño se trague accidentalmente los accesorios.</li> </ul> </li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● No remover las bobinas y los imanes del generador.           <ul style="list-style-type: none"> <li>○ La reposición de las bobinas requiere de conocimientos avanzados, al estar conectados en serie, se necesita de soldadura y además se podría romper el</li> </ul> </li> </ul>

cable al ser muy fino. Con respecto a los imanes, debido al campo magnético que producen, es complicado colocarlos dentro del rotor y desconfigurarían los polos.

- No manipular los cables del generador.
  - Los cables que salen de las bobinas están conectadas a cables que sacan la señal del generador, si se manipula demasiado se puede romper y se necesita de habilidades profesionales para adaptarlos nuevamente.

*Tabla 51. Información de Seguridad 2 VEH.*

### **PRECAUCIÓN**

Para indicar los riesgos de consecuencias graves, como lesiones o mal funcionamiento del equipo, a menos que se obedezcan estrictamente las siguientes normas de seguridad.

- Evitar guardar el dispositivo en los siguientes lugares.
  - Lugares donde se vaporizan agentes volátiles (cosméticos como quitaesmalte, repelente de insectos, diluyentes, etc.).
  - Lugares donde la temperatura desciende por debajo de los 5 ° C o se eleva por encima de los 35 ° C durante mucho tiempo.
  - Lugares afectados por un fuerte magnetismo.
- Si se observa algún síntoma alérgico o irritación de la piel de la vaca.
  - Dejar de usar el dispositivo inmediatamente y consultar a un veterinario.
- Otras precauciones.
  - No desarmar el generador, debido a que se puede desacomodar las piezas y se requiere de habilidades profesionales para volver a acomodar.
  - No lavar el dispositivo directamente del agua del grifo.
  - No dejar humedad o suciedad dentro del dispositivo.
  - Mantener fuera del alcance de personas con marcapasos. El campo magnético generado por los imanes del generador puede interferir con el funcionamiento de dichos dispositivos.

### 12.1.6 Puesta en marcha, manejo y apagado

El generador, por sus características no necesita de un interruptor para ser encendido o apagado. El módulo de rastreo se encuentra alimentado por una batería, la programación del software para control y envío de datos administra la corriente necesaria para cumplir esta tarea. Dicha batería es recargada mediante el movimiento del generador de forma continua siempre que exista movimiento por parte del animal.

Para asegurar un funcionamiento apropiado del mecanismo conjunto (generador junto a la electrónica de control), se deben colocar los componentes sobre la carcasa de apoyo y posteriormente a la correa. Una vez realizado, se coloca el collar alrededor del cuello de la vaca y se ajusta con las hebillas deslizantes de acuerdo con el tamaño del animal hasta garantizar una posición estable del mecanismo.

### 12.1.7 Rango de controles y variables de operación

Las variables de operación tanto de entrada y salida que el mecanismo generador de energía entrega, se encuentran resumidas en la siguiente tabla:

*Tabla 52. Variables operacionales del generador.*

<b>Voltaje de Salida Pico [V]</b>	0.728
<b>Voltaje de Salida RMS [V]</b>	0.5147
<b>Corriente de Salida [mA]</b>	2.1
<b>Campo Magnético Generado [T]</b>	0.5
<b>Impedancia de las Bobinas [<math>\Omega</math>]</b>	223.7
<b>Capacitancia [nF]</b>	282.1
<b>Inductancia [mH]</b>	12.54

## 12.2 MANTENIMIENTO

- Revisar constantemente todos los tornillos del ensamble y tener la certeza de que estén firmemente apretados. La ausencia de un tornillo o que esté flojo representa un riesgo considerable para el funcionamiento.
- Inspeccionar que los embobinados del estator no presenten averías ya que el esmalte puede estar desgastado y podría provocar un cortocircuito. Asegurarse de que las conexiones no hayan sido interrumpidas y cuidar de no humedecerlas con agua o aceite.
- Garantizar que los cables del dispositivo no se encuentren en mal estado antes de operarlo. Examinar partes dañadas, faltantes, gastadas o cualquier condición que pueda influir en la puesta en marcha del equipo. De existir, o presentar ausencia de generación o impedimento de libre oscilación, no utilizar el generador y solucionar el problema antes de volverlo a poner en marcha.
- Si los imanes del rotor operan a condiciones normales ( $< 35^{\circ}\text{C}$ ) la densidad de campo magnético no se verá afectada con el tiempo, por lo que no se requerirán cambiar los imanes.

### **Limpieza:**

- Emplear aire comprimido seco para limpiar el dispositivo. No utilizar objetos punzantes ni ferromagnéticos para asear las aperturas de la carcasa,
- Utilizar siempre equipos de seguridad al limpiar la carcasa, especialmente protección visual.
- Conservar limpia, libre de humedad, aceite o grasa la parte interna del dispositivo con un paño suave. No emplear limpiadores a base de químicos que podrían comprometer seriamente el material plástico o los componentes.
- Los imanes pueden atraer partículas ferromagnéticas si se los expone a polvo, por aquello es muy importante la limpieza profunda.

### **Cambio de imanes**

- Se requiere reemplazar los imanes en caso de desgaste de recubrimiento o que se hayan roto, por imanes nuevos.
- Cuando se realice el cambio de imanes es necesario que sean del mismo tipo y dimensiones establecidas, se requiere identificar los polos magnéticos para ubicarlos en la configuración originalmente establecida sin afectar el campo magnético. Los espacios en los que se encuentran los imanes poseen dimensiones de manera en la que se ajusten sin necesidad de pegamento o adhesivo por lo que con un montaje manual será suficiente.

### **Cambio de bobinas**

- Es indispensable sustituir las bobinas en caso de que alguna interrumpa el flujo de energía ya sea por rotura de cables o desgaste de esmalte que recubre el cable.
- Al cambiar alguna bobina es indispensable verificar la que está fallando, por inspección visual y con el uso de instrumentación. Una vez determinada la falla se requiere eliminar la soldadura con ayuda de un cautín en los dos extremos de la bobina; seguidamente se la extrae manualmente del estator y se la cambia por una nueva. La bobina debe ser del mismo material y tener las mismas características que las demás, tanto geométricas como electrónicas. Para realizar la soldadura, es suficiente hacerlo con un cautín y estaño; una vez realizado el cambio se verifica el paso de corriente y se pone nuevamente en operaciones al prototipo.

### **Recomendaciones**

- Los rodamientos para un mejor funcionamiento a largo plazo se recomienda lubricarlos, sin embargo, poseen lubricación que en condiciones normales operará sin problema.

- Al momento de colocar el dispositivo, asegurarse que no se deslice a la parte inferior del cuello del animal, ya que esto afectará el funcionamiento adecuado. Apretar firmemente la correa sin afectar al animal hasta verificar la firmeza.
- Emplear un multímetro y medir en la salida de los cables el valor de resistencia total para comprobar que no existen interrupciones del flujo de corriente.

## 13. Resultados, Discusión y Conclusiones.

### 13.1 Resultados

El mecanismo generador de energía a partir de las vibraciones aprovecha el movimiento de vacas para convertir estos estímulos en electricidad y así alimentar un dispositivo geolocalizador. Esta transducción se logra gracias al fenómeno físico de inducción electromagnética. Para esto, se ha implementado un péndulo con masa excéntrica (asemejando el funcionamiento de relojes cinéticos) el cual provoca la interacción entre imanes y bobinas para la generación de corriente.

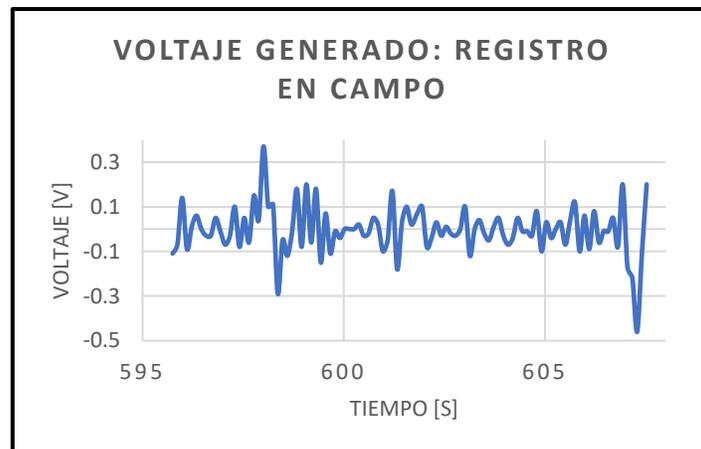
La versión final del mecanismo y su carcasa protectora pesan 758 [g] aproximadamente. Las dimensiones finales en largo, ancho y alto son 260 [mm] x 138 [mm] x 70 [mm]

De acuerdo con las pruebas desarrolladas enfocándose en los subsistemas de generación y protección, se obtuvieron los siguientes resultados:

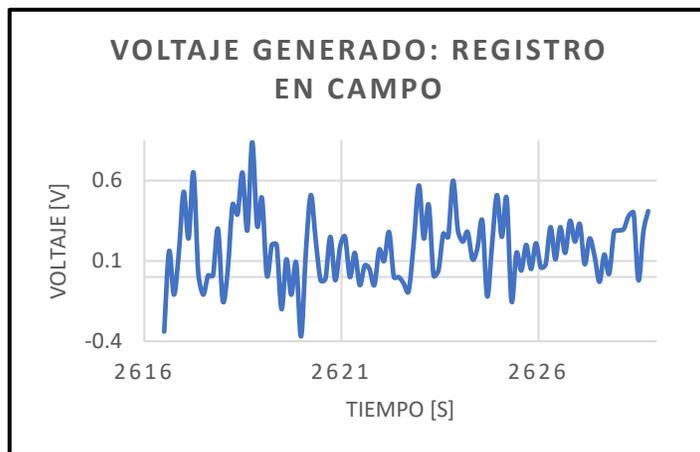
- Debido a la inducción electromagnética, la señal generada es una onda en corriente alterna, por lo que registraron valores pico de voltaje cercanos a 0.728 [V]. Gracias a esto se puede deducir (tras conectar una resistencia de 1 [ $\Omega$ ]) que la corriente de salida es cercana a 2.1 [mA].

- Los imanes empleados, gracias a sus características y configuración establecida logran generar un campo cercano a los 0.5 [T]. Este valor es importante en cuanto a la capacidad de generación eléctrica. Las simulaciones realizadas en COMSOL entregan resultados similares.
- Dadas las características de las bobinas (690 vueltas y 8 conectadas en serie), por el diámetro del cable se tiene que su impedancia es alta, registrando valores de 223.7 [ $\Omega$ ], una capacitancia de 282.1 [nF] y una inductancia experimental de 12.54 [mH]

Las pruebas experimentales del mecanismo generador de energía a partir de vibraciones se realizaron en tres vacas en un lapso de una hora por animal. Los datos se registraron empleando un Arduino UNO. De manera general, la señal presenta regiones en las cuales los valores de voltaje son más altos. Dichas regiones se presentan en las siguientes imágenes:



*Figura 48: Señal de voltaje generado en pruebas experimentales. Primera región*



*Figura 49: Señal de voltaje generado en pruebas experimentales. Segunda región.*

En las figuras 48 y 49 se puede ver una porción significativa del espectro completo de voltaje vs tiempo obtenido en las mediciones de campo, donde se evidencia como la señal es alterna y no uniforme debido a los distintos picos de voltaje registrados siendo el mayor de 0.7 [V], pero a pesar de ello la generación es constante debido a que la actividad del animal no cesa.

En base a las pruebas de verificación realizadas basándose en los requerimientos de la norma IEC 60529 se obtuvo que la carcasa brinda un grado de protección aproximado IP65, lo que implica que la carcasa protege contra el ingreso de partículas de hasta 10 [ $\mu\text{m}$ ] tales como las de talco cosmético. Además, la carcasa mantiene hermético el interior ante chorros de agua directos en varias direcciones que simulan el escenario de una fuerte lluvia. Respecto a ensayos destructivos de compresión se obtuvo que la carcasa soporta una carga máxima de 15.8 kN bajo los parámetros establecido por la máquina de compresión (carga inicial de 1.8 kN con un gradiente de 0.25 MPa/s); esto significa que una carga de 1608 kg tendría que colocarse sobre la carcasa para causar daños significativos.

## 13.2 Discusión

En referencia a la sección de elección de componentes, pues a través del método de criterios ponderados se logró distinguir la mejor opción para cada sección. Por la parte de generación, el mecanismo electromagnético es el más apropiado debido a su confiabilidad. Dicho beneficio de estos mecanismos es dado gracias a la metodología de generación eléctrica en el cual no se necesita mecanismo en contacto como sucede con los mecanismos piezoeléctricos, en el caso de los electromagnéticos la generación se da por efectos electromagnéticos. Por otro lado, en la sección de almacenamiento de energía, la mejor opción para recolectar la energía eléctrica es a través de super capacitores dado su elevado potencial de almacenamiento (100 veces más energía por volumen de unidad comparado a los capacitores electrolíticos). También sus ciclos de carga y descarga son mucho más rápidos frente a las baterías, siendo así más resistentes a los mismos.

En cuanto a la simulación de la configuración de imanes ubicados en el rotor, se obtuvo que la uniformidad del campo magnético es dependiente completamente de cómo se alterna los polos de imanes; ya que se observó que las líneas campo magnético de la configuración de polos alternos Figura 33 (a) tienen una distribución uniforme lo que implica que se inducirá corriente sobre cada uno de los embobinados de manera equitativa, en cambio para la configuración de polos iguales alrededor del rotor Figura 33 (b) se evidencia que las líneas resultantes de campo magnético se suman entre ellas, formando prácticamente dos polos en toda la distribución a modo de un solo imán lo que provocaría al momento de la inducción sobre los embobinados una baja eficiencia debido a que no sería la misma corriente inducida en cada uno de los embobinados cuando la configuración de imanes oscile.

Para los resultados experimentales, la señal presentada en la figura 48 es diferente a la f 49. Siendo en esta última región donde existe mayor diferencia entre los picos de voltaje generado. Esto se debe principalmente al movimiento del animal y la fuerza con las que estas son realizadas.

Durante el periodo de toma de datos, las actividades realizadas por las vacas fueron variadas, desde alimentarse, caminar, correr o limpiar su lomo con la lengua. Dichos movimientos al final se traducen en vibraciones que son transmitidas por todo el cuerpo de la vaca y aprovechados por el rotor, generando así energía.

Sin embargo, tras analizar los datos presentes en las señales registradas, se obtiene que el voltaje de salida pico del generador es de 0.7 [V] y su voltaje de salida RMS es de 0.5 [V], junto a una corriente de salida de 2.1 [mA]. Estos datos se encuentran lejos de los objetivos propuestos. Entre las principales causas se debe a la naturaleza de la generación electromagnética. Las bobinas empleadas constan de 690 vueltas con un cable delgado, lo que incrementa la resistencia una vez conectadas en serie. Del mismo modo, a pesar de que el rotor se optimizó con el objetivo de maximizar la generación en cada movimiento, no logra ser suficiente para alcanzar los objetivos establecidos. Finalmente, se necesita rectificar la señal alterna para usarla directamente al geolocalizador, sin embargo, dado que los valores de salida son relativamente bajos, la electrónica convencional no resulta apropiada para esta tarea, debido a que puede incrementar el ruido de la señal o reducir los valores de voltaje y corriente de salida.

Con relación a los resultados obtenidos del perfil de consumo para el microprocesador ESP32, estos indican una deficiencia energética del mecanismo de generación con respecto a la demanda del electrónico, pues no logra ser una fuente continua de alimentación para el chip debido a que el colector de vibraciones puede producir una potencia de 1.18 [mW] y solo en modo active el procesador requiere de 0.9 [W] para operar. Debido a esto el mecanismo va a operar a modo de fuente auxiliar el cual alimentará constantemente un super capacitor con el fin de intentar alcanzar cierta la autonomía energética o al menos prolongar la carga de la batería.

El resultado hallado respecto a la carga máxima a la cual se puede someter a la carcasa indica que soporta una carga de 1608 kg; este resultado es bueno dado que dicha prueba se la realizó intentando prever una situación en donde la vaca se recueste sobre la carcasa protectora y si bien no lo va a hacer de forma completa el resultado indica que tranquilamente podría resistir a dicho evento dado que una vaca pesa en promedio 600 kg. Además, la carcasa se sometió a una prueba empírica de impacto al momento de colocar el collar en la vaca debido a que para poderlo hacer se debió ingresar al animal a una manga ganadera en donde se retiene al animal. En el proceso las vacas se mueven y golpean fuertemente a la carcasa contra los tubos y paredes de la manga, pero a pesar de dichos impactos la carcasa no presentó más que raspaduras manteniéndose íntegra la estructura y por lo tanto los componentes internos. Y gracias a lo evidenciado se pudo comprobar que la estructura diseñada soporta impactos a los que puede estar expuesto.

Durante el proceso de desarrollo del mecanismo y su protección siempre se buscó que el tamaño y peso no representen una limitación física para ser utilizado en animales específicamente vacas, por lo cual la versión final del producto pesa alrededor de 800 gramos lo cual está dentro del rango de confortabilidad basándose en la teoría de que un animal puede soportar el 2% de su peso en el cuello (Zhang et al.,2021). Además, se evidenció en la prueba de campo que al colocar el producto el animal no se sentía molesto y podía realizar sus actividades con completa normalidad.

### **13.3 Conclusiones**

El mecanismo de generación seleccionado para el desarrollo del proyecto es la inducción electromagnética dado que tiene mejor adaptabilidad respecto a las opciones exploradas. Principalmente, los imanes de neodimio empleados (grado 52) ofrecen una gran versatilidad en cuanto a la optimización de espacios, además, el campo magnético registrado es un

valor apropiado para la aplicación seleccionada. Del mismo modo, ofrecen una durabilidad a largo plazo ya que, a diferencia de los mecanismos triboeléctricos o piezoeléctricos, no existen piezas en contacto directo las cuales presenten un desgaste significativo a lo largo del tiempo y requieran ser reemplazados de forma continua.

La inducción electromagnética sobre bobinas es proporcional a la intensidad de campo magnético y a la velocidad con la que este cambia, por ende, la configuración de imanes con diferentes polos se empleó en el prototipo Figura 33(a) porque es capaz de generar mayor inducción en las bobinas por su distribución equitativa de campo magnético, es decir que al oscilar el rotor que contiene los imanes, cada una de las bobinas se verá afectado con la misma intensidad y no de manera ineficiente. Además, se utilizó una masa excéntrica que presente una mayor frecuencia del rotor, ya que el campo cambiará de manera más rápida aumentando la inducción.

Las pruebas de campo indican que el mecanismo desarrollado genera electricidad, sin embargo, esta no es la suficiente para alimentar al módulo de rastreo por posicionamiento GPS. Las principales razones se enfocan en las características de las bobinas. Además, que, a pesar de la optimización del rotor y su adición a una masa oscilante para incrementar la frecuencia, los impulsos no logran ser los adecuados para lograr estos niveles de generación propuestos. Algo que añadir es el factor que la electrónica convencional para la rectificación de señales en este caso no resulta la opción apropiada, por lo que se debe estudiar a profundidad alternativas que permitan modificar la señal sin afectar los valores de salida.

La carcasa diseñada para proteger al mecanismo mostró tener buen desempeño ante pruebas que van de acuerdo con los grados de protección IP, mostro ser hermética a partículas de polvo de hasta 10 micras y ante exposición de chorros de agua más no ante inmersiones completas. Mostró tener una resistencia adecuada para posibles situaciones de aplastamiento e impacto. El

producto completo desarrollado (mecanismo y carcasa) tiene una proporción adecuada para el tamaño del animal y su peso no mostró indicios de molestia al colocarlo en durante tiempos prolongados.

El producto desarrollado está dentro de los parámetros de presupuesto establecidos dado que nos superó los 300 dólares gracias a que los procesos fueron realizados con recursos de la universidad y solo componentes necesarios fueron adquiridos a terceros.

## **14.Trabajo Futuro**

El proyecto “Vibration Energy Harvester” terminó con la adecuación de un mecanismo capaz de producir energía a través de las vibraciones de ganado vacuno. Sin embargo, la cantidad de voltaje que se produce con tan solo dicho mecanismo no alcanza para alimentar el dispositivo de geolocalización.

Por esta razón, junto con la empresa “NBC Maschinenbau” se trabajará con electrónica de potencia para la construcción de un amplificador o un power booster, que permita al dispositivo aumentar el voltaje producido. De esta manera, se podrá alimentar al GPS con normalidad.

De igual manera, se trabajará en la elección de una batería o un super capacitor para la sección de almacenamiento. La desventaja de implementar una batería está en que se debería rectificar la onda de salida de la señal, mientras que al trabajar con un super capacitor se evita el paso de rectificación eliminado así la implementación de más componentes electrónicos.

Así mismo, se propone mejorar el mecanismo, es decir desarrollar un sistema que no solo trabaje en dos dimensiones, sino que los movimientos puedan ser aprovechados en las tres dimensiones. Esta mejora respecto al funcionamiento del sistema se asemejaría el comportamiento

de un giroscopio. De esta forma, se aumentaría el movimiento del péndulo y por ende la salida de voltaje.

La empresa NBC Maschinenbau tiene planeado implementar pocos dispositivos en un principio para comprobar la durabilidad del dispositivo, pero la finalidad del proyecto es que estos dispositivos se utilicen a todo nivel nacional y después llegar al mercado internacional.

Por otro lado, en trabajos futuros se puede analizar la mejora del empaque empleado en la carcasa con el fin de lograr una mejor hermeticidad a líquidos al someter dicho componente a inmersiones completas. Si bien el material empleado funciona y no permite el paso de partículas sólidas de  $10\ \mu\text{m}$ , la hermeticidad con respecto a líquidos puede mejorar y alcanzar un grado de protección más alto.

## 15. Bibliografía y Referencias

Andò, B., Baglio, S., Latorre, L., Maiorca, F., Nouet, P., & Trigona, C. (2012). Magnetically-Coupled Cantilevers with Antiphase Bistable Behavior for Kinetic Energy Harvesting. *Procedia Engineering*, 47, 1065–1068.  
<https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2012.09.334>

Aqua Integral (2021). Sulfato de Aluminio Tipo A. Obtenido de:  
<https://aquaintegral.co/producto/sulfato-de-aluminio-tipo-a-x-25-kg-2/>

Botanical Online (2021). *Cuanto pesa una vaca aproximadamente*. Obtenido de:  
<https://www.botanical-online.com/animales/vaca-cuanto-pesa>

Calculate magnetic flux density (formula) - supermagnete.de. Supermagnete.de. Retrieved 30 October 2021, from <https://www.supermagnete.de/eng/faq/How-do-you-calculate-the-magnetic-flux-density>.

Commission, I. E. (2005). IEC Standards. Obtenido de <https://www.iec.ch/homepage>

Dagdeviren, C., Li, Z., & Wang, L. (2019). ANNUAL REVIEWS. Obtenido de Energy Harvesting from the Animal/Human Body for Self-Powered Electronics:  
<https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-bioeng-071516-044517>

Dong, L., Closson, A., Congran, J., Ian, T., Zi, C., & John, Z. (13 de August de 2019). *ADVANCED MATERIALS TECHNOLOGIES*. Obtenido de Vibration-Energy-Harvesting System: Transduction Mechanisms, Frequency Tuning Techniques, and Biomechanical Applications: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/admt.201900177>

Energy Conversion and Management, 247(May), 114674.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114674>

Fan, K., Liu, J., Wei, D., Zhang, D., Zhang, Y., & Tao, K. (2021). A cantilever-plucked and vibration-driven rotational energy harvester with high electric outputs. *Energy Conversion and Management*, 244, 114504. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114504>.

First 4 Magnets (2020).Magnet basics. Recuperado de: <https://www.first4magnets.com/tech-centre-i61/frequently-asked-questions-i69>

Giancolli, D. C. (2009). *Física Para Ciencias e Ingenierías* (6th ed.). Pearson Education.

Hou, C., Chen, T., Li, Y., Huang, M., Shi, Q., Liu, H., Sun, L., & Lee, C. (2019). A rotational pendulum based electromagnetic/triboelectric hybrid-generator for ultra-low-frequency vibrations aiming at human motion and blue energy applications. *Nano Energy*, 63(March), 103871. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.103871>

INDUSTRIES, A. C. (Febrero. de 2005). *Generic Requirements for Surface Mount Design and Land Pattern Standard*. Obtenido de IPC-7351: <https://www.ipc.org/TOC/IPC-7351.pdf>

Imanes123 (2006). Imanes de Neodimio información. Recuperado de: <https://www.imanes123.com/informacion-de-imanes-neodimio/>

ISO. (2005). *Sistemas de gestión de la calidad — Fundamentos y Vocabulario*. Obtenido de ISO 9000: [http://www.umc.edu.ve/pdf/calidad/normasISO/Norma\\_ISO\\_9000\\_2005.pdf](http://www.umc.edu.ve/pdf/calidad/normasISO/Norma_ISO_9000_2005.pdf)

Mateu, L., & Moll, F. (2005). Optimum piezoelectric bending beam structures for energy harvesting using shoe inserts. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 16(10), 835–845. <https://doi.org/10.1177/1045389X05055280>.

Mc Namee, R. (2010). Angular frequency ( $\omega$ ). *Questions and Answers in MRI*. Retrieved 30

October 2021, from <http://mriquestions.com/angular-frequency-omega.html>.

Neodymium Magnets (NdFeB) | Arnold Magnetic Technologies. Arnold Magnetic Technologies. (2021). Retrieved 30 October 2021, from <https://www.arnoldmagnetics.com/products/neodymium-iron-boron-magnets/>.

Normalización., I. E. (2001). *Codigo de dibujo tecnico-mecanico* . Obtenido de INEN 003: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/CPE-3.pdf>

Pendulums | University Physics Volume 1. Courses.lumenlearning.com. Retrieved 15 December 2021, from <https://courses.lumenlearning.com/suny-osuniversityphysics/chapter/15-4-pendulums/>.

Raymond A. Serway, John W. Jewett, J. (2009). Física para ciencias e ingeniería volumen 2, Séptima edición. In □□□□□ □□□□□ (2nd ed., Vol. 1). Cengage Learning. <http://marefateadyan.nashriyat.ir/node/150>

Staacks, S., Stampfer, C., Dorsel, D., Gessner, J., & Lummerzheim, C. (n.d.). *Phyphox*. <https://phyphox.org>

Soriano, G. E., Delgado G, Párraga J, & Delgado R. (2022). *Estudio morfológico de talcos con microscopio electrónico de barrido (sem). Aplicaciones farmacéuticas A morphological study of talcs with scanning electron microscopy (sem). Pharmaceutical applications. 43, 1–2.*

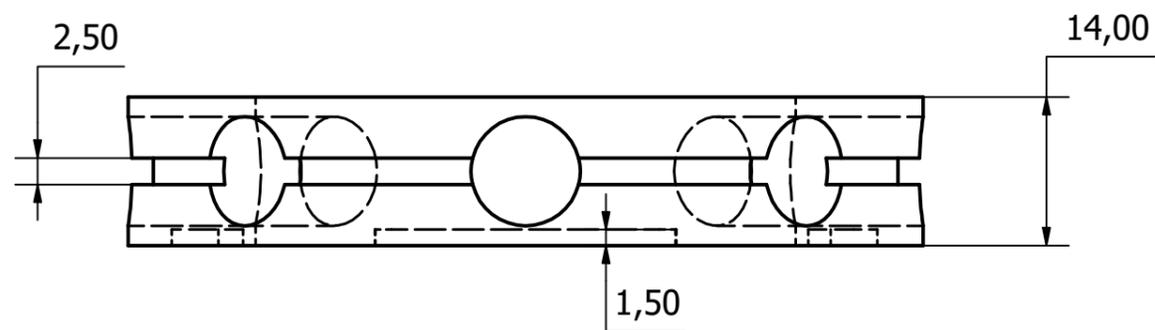
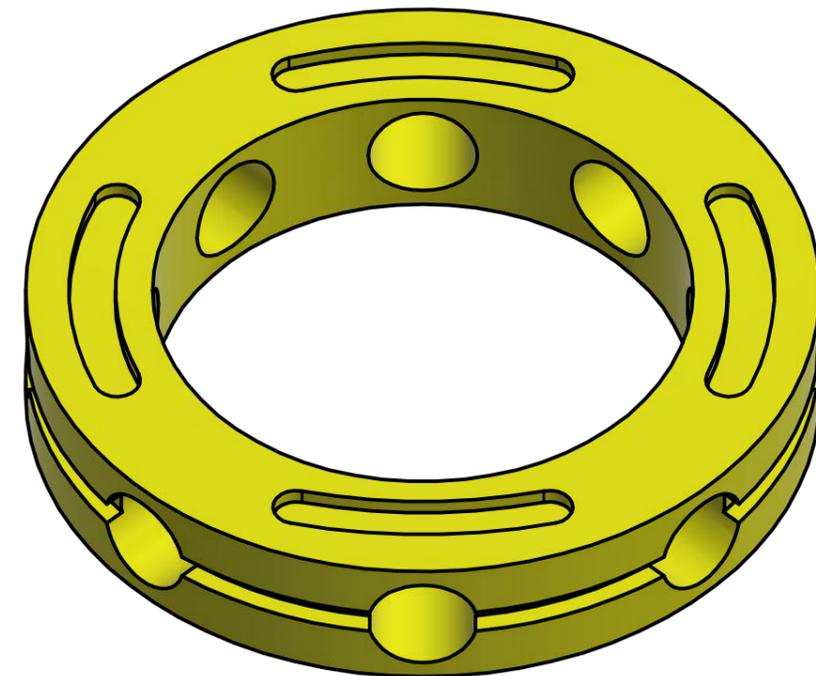
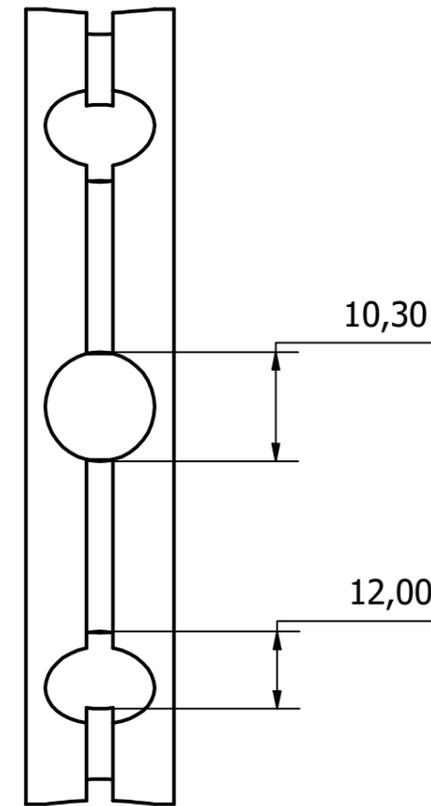
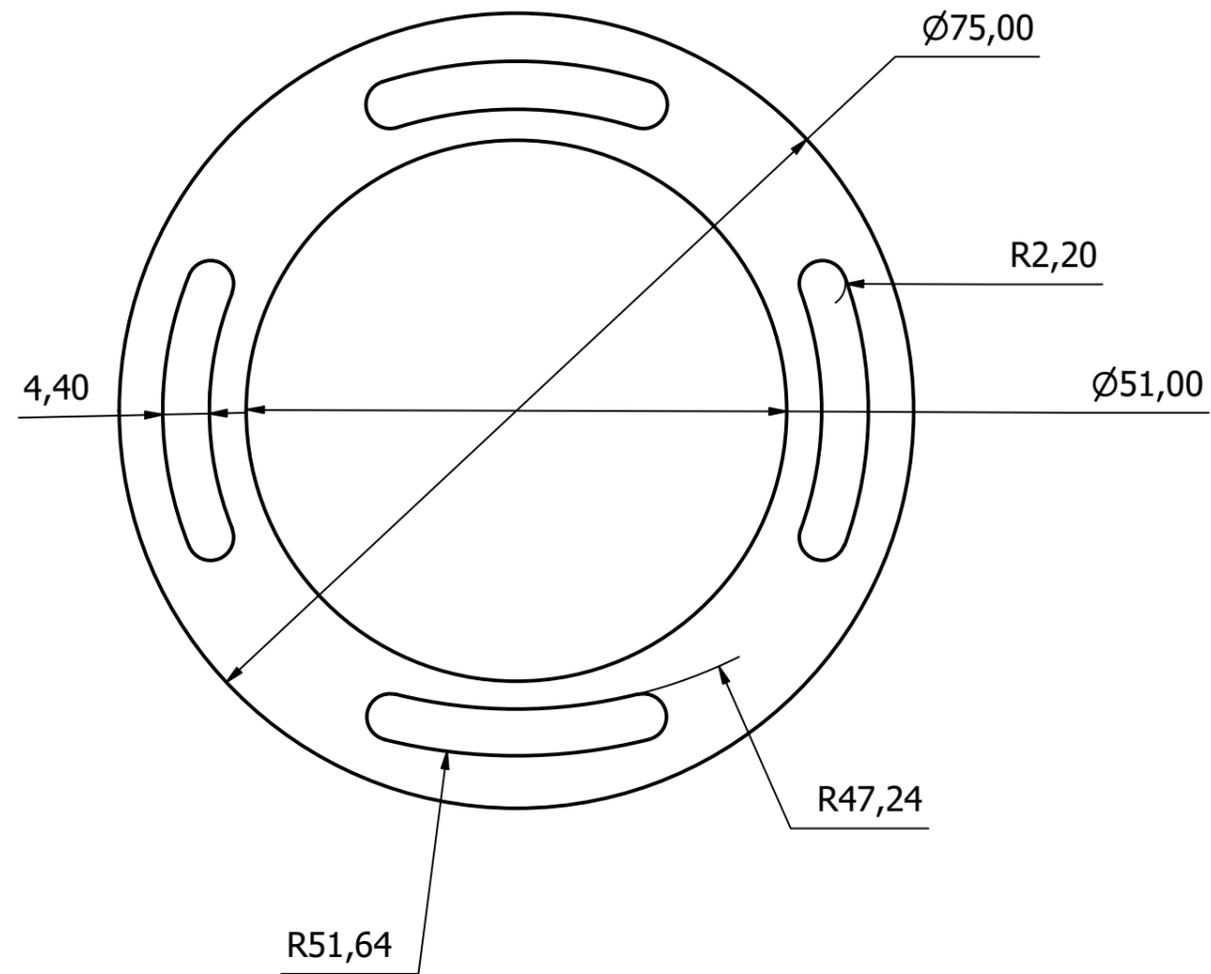
Trapanese, M. (2008). Optimization of a sea wave energy harvesting electromagnetic device. *IEEE Transactions on Magnetics*, 44(11 PART 2), 4365–4368. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.2002192>

Zhang, H., Wu, X., Pan, Y., Azam, A., & Zhang, Z. (2021). A novel vibration energy harvester

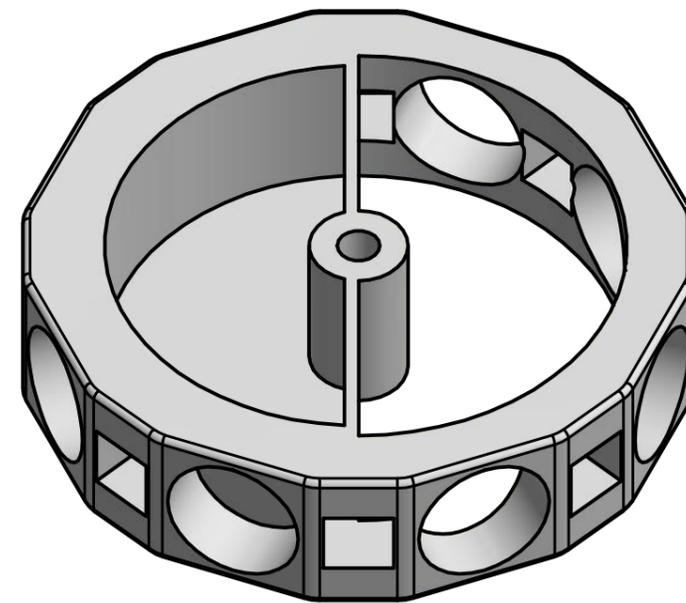
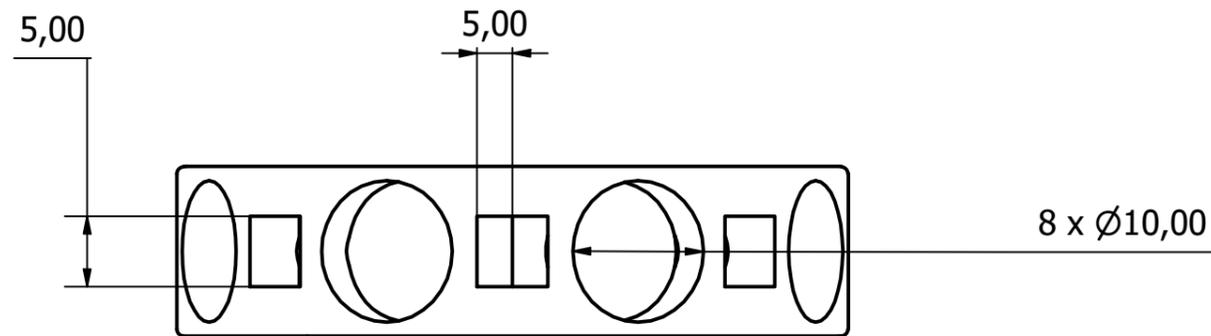
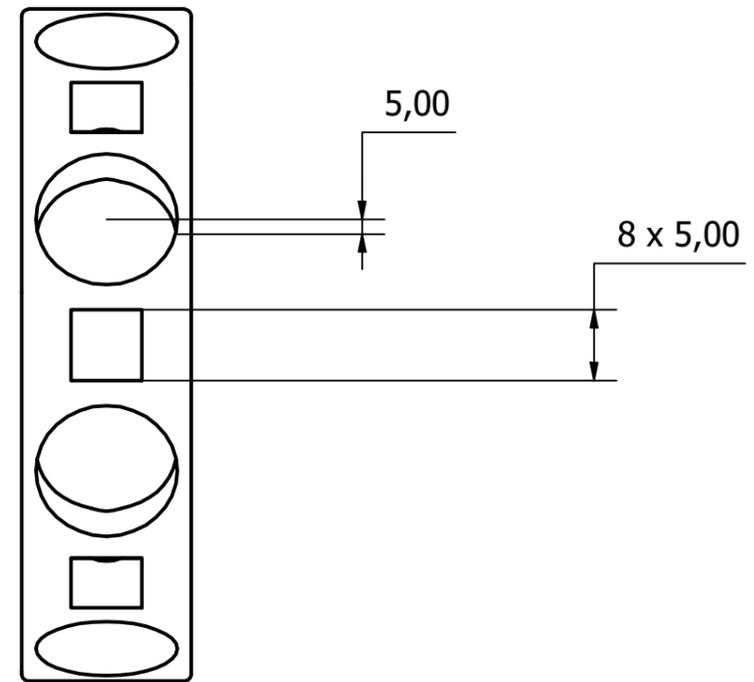
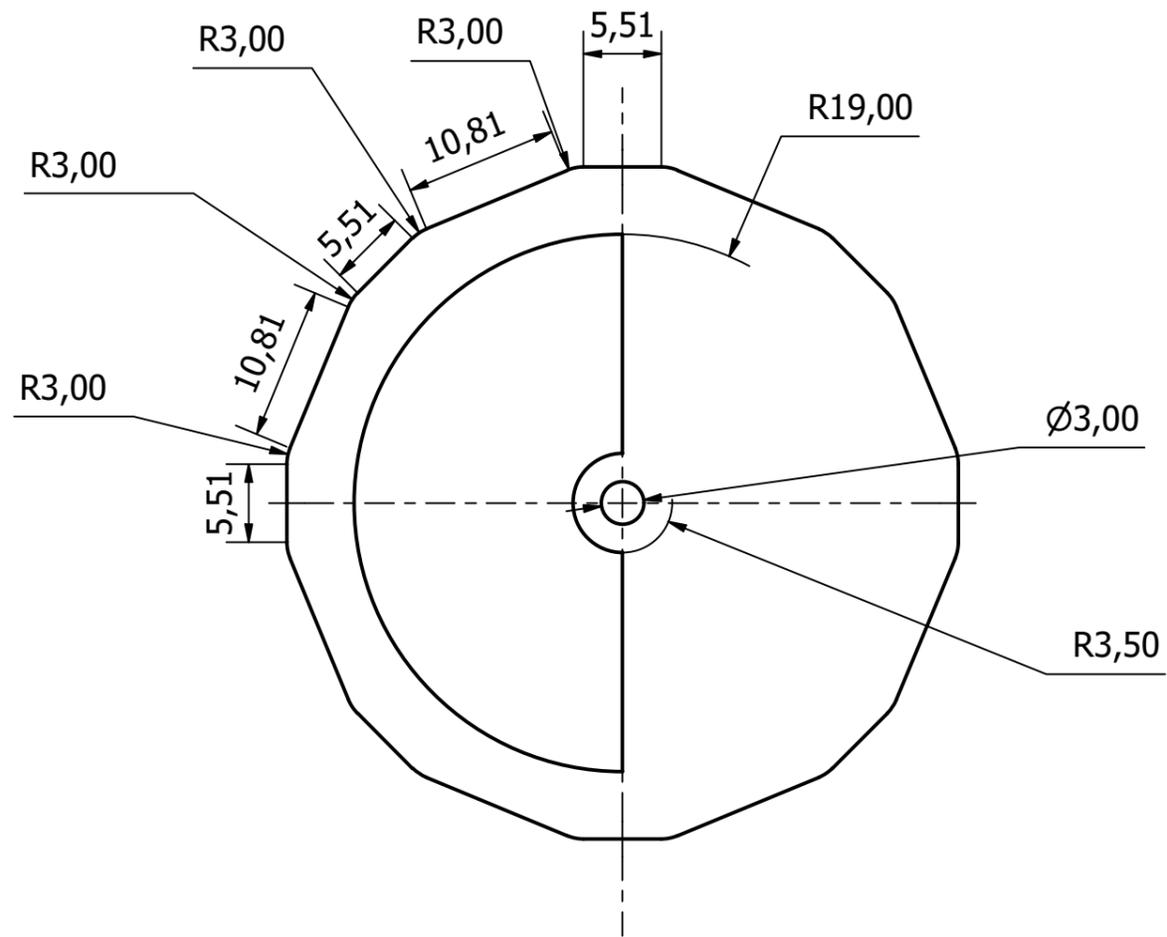
based on eccentric semicircular rotor for self-powered applications in wildlife monitoring.

## 16. Apéndices

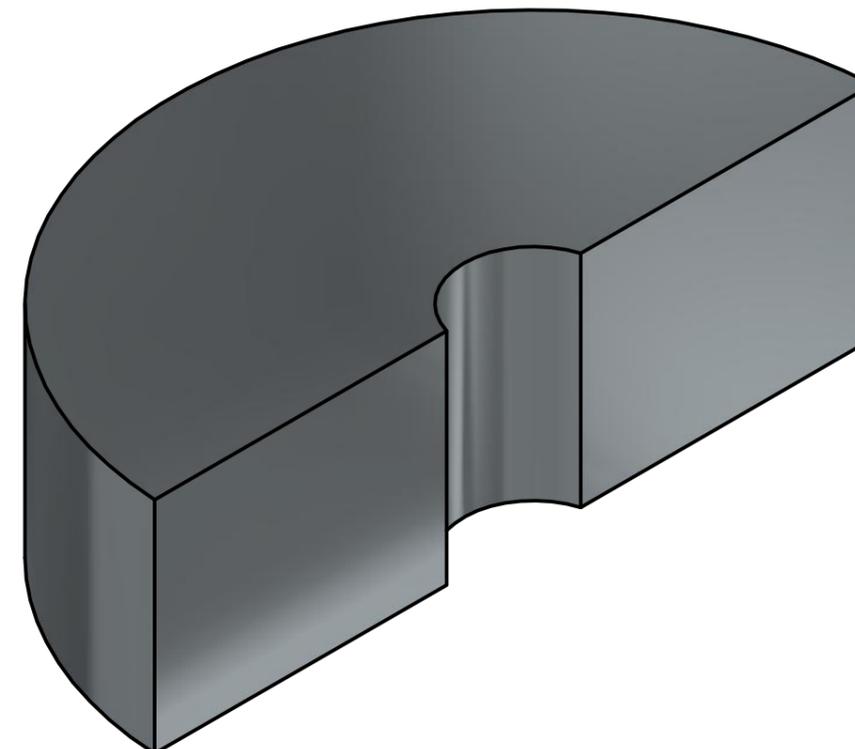
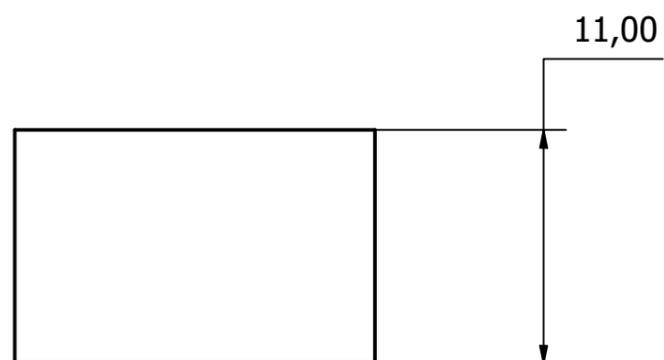
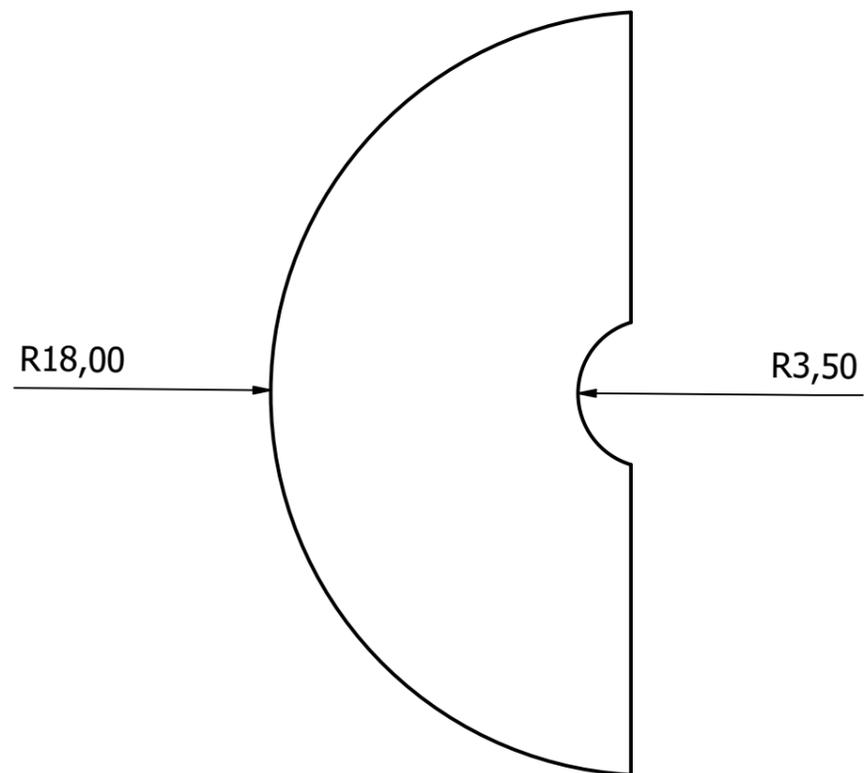
# **Apéndice A**



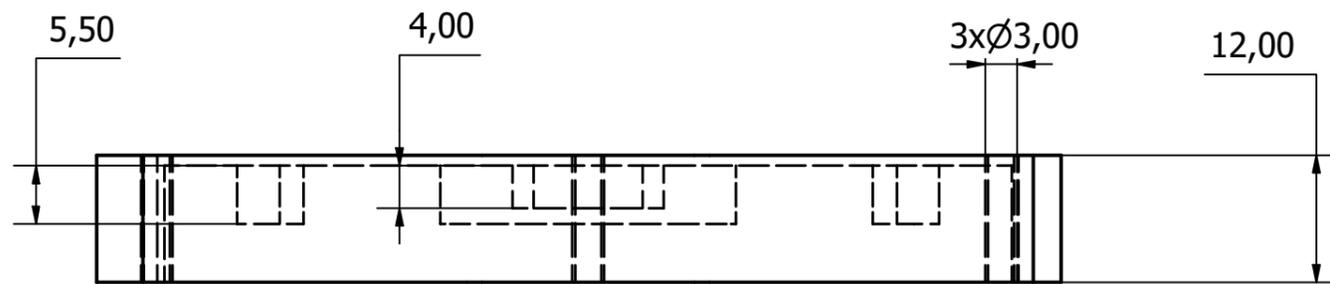
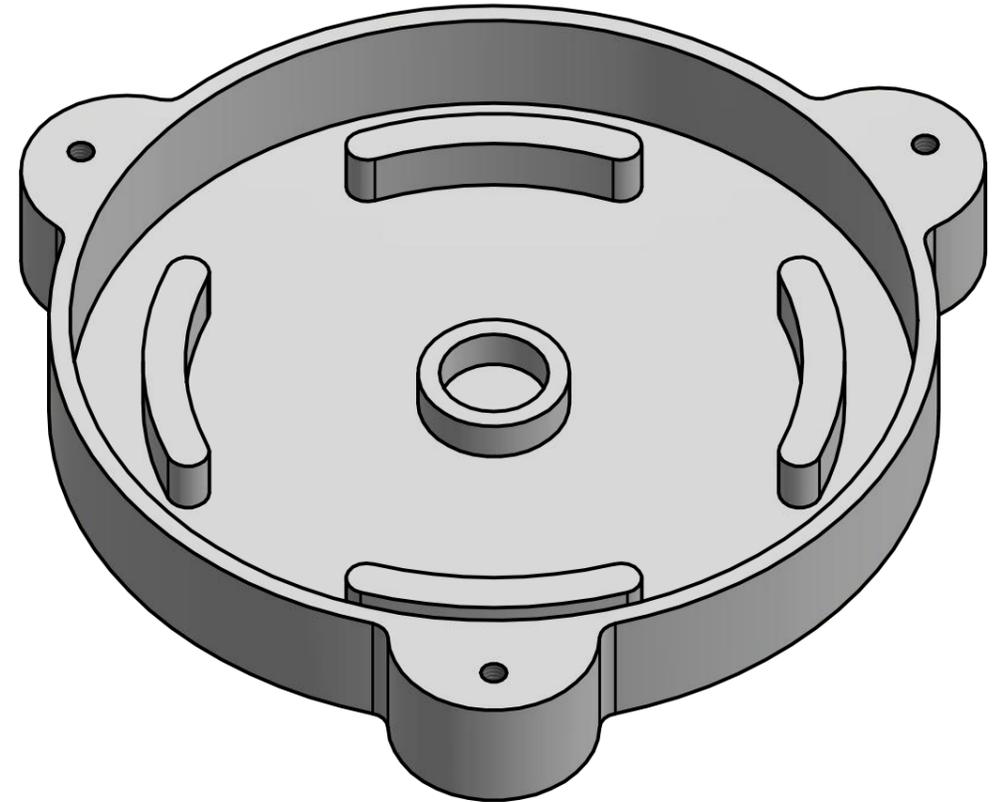
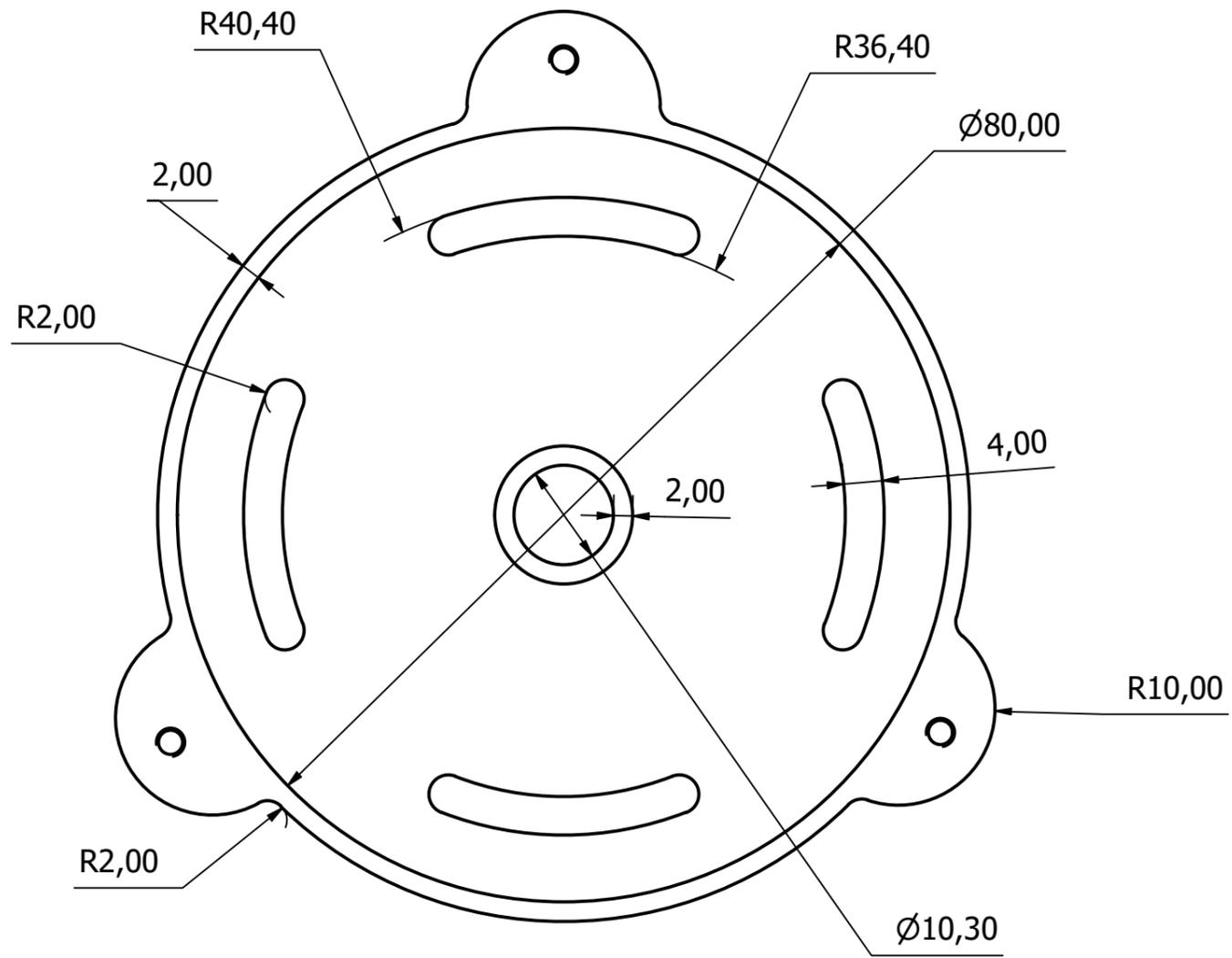
Tolerancia ± 0,3	Peso N/A	ESTATOR		
Dibujado	Fecha 17/10/2021	MATERIAL: PLA		Escala 1.5:1
Revisado	Nombre E.A, J.A, J.S, K.V			
Aprovado				
		Código 2021.VEH1	Trat. Superficial N/A	Hoja 1/11



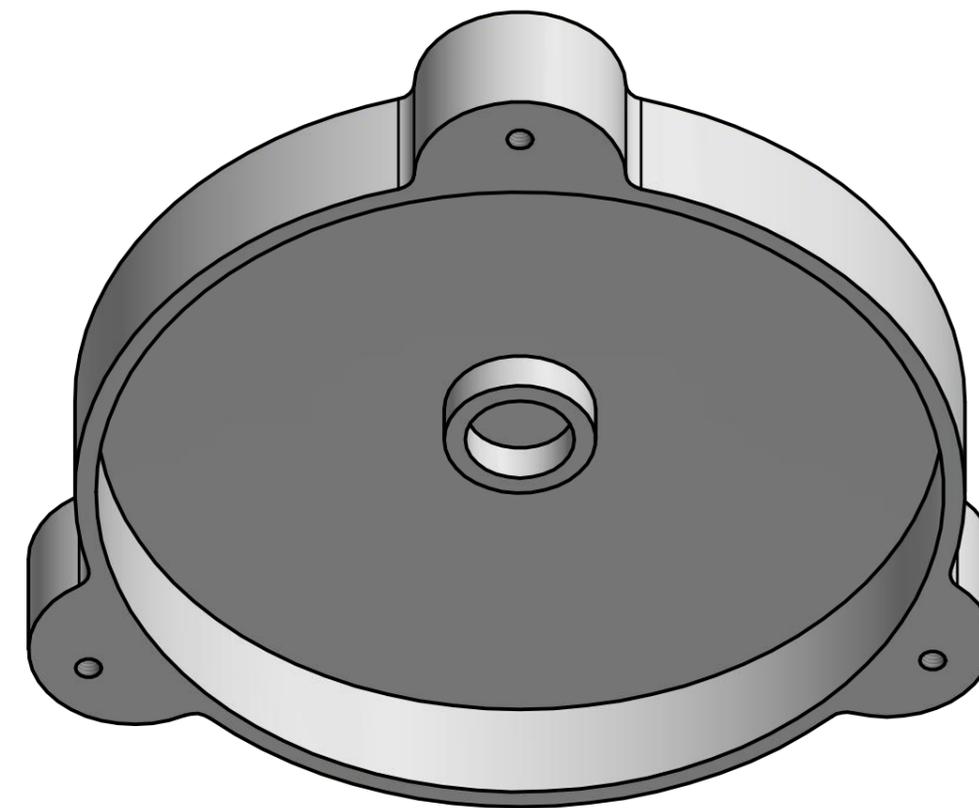
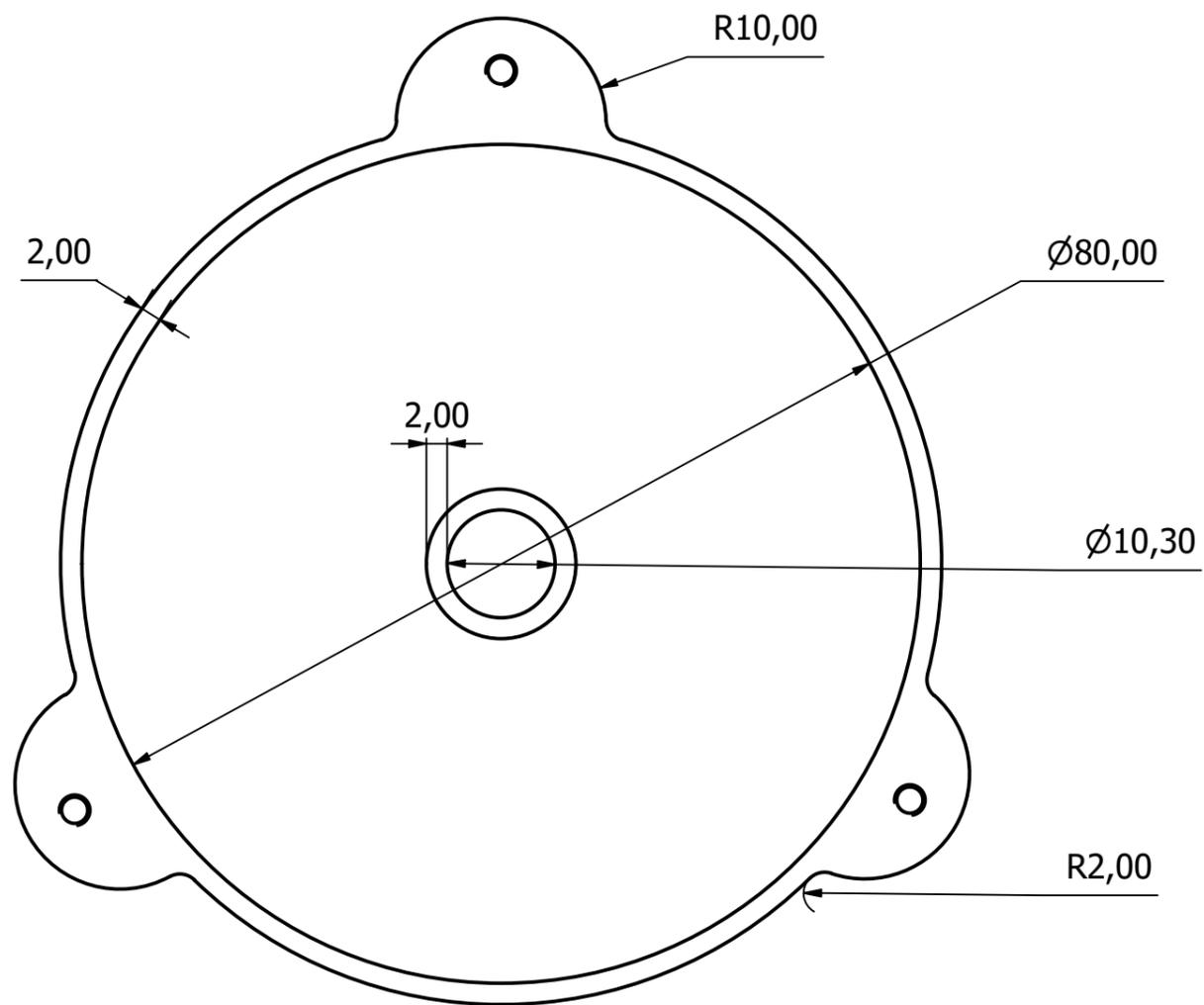
Tolerancia ± 0,3	Peso N/A	ROTOR		
Dibujado	Fecha	MATERIAL: PLA		Escala 1.5:1
Revisado	Nombre			
Aprovado				
		Código 2021.VEH2	Trat. Superficial N/A	Hoja 2/11



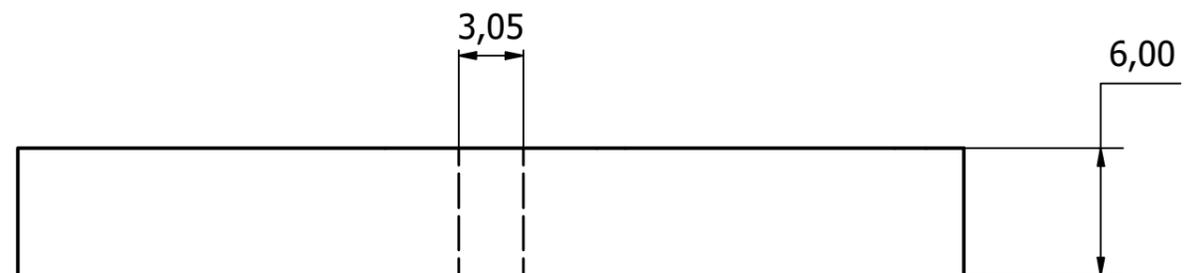
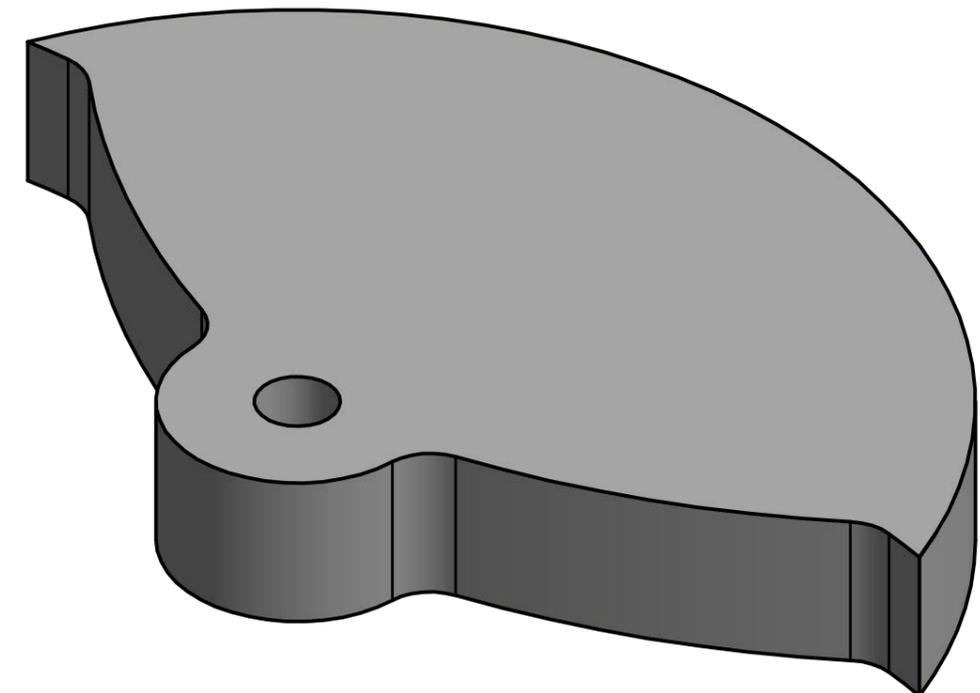
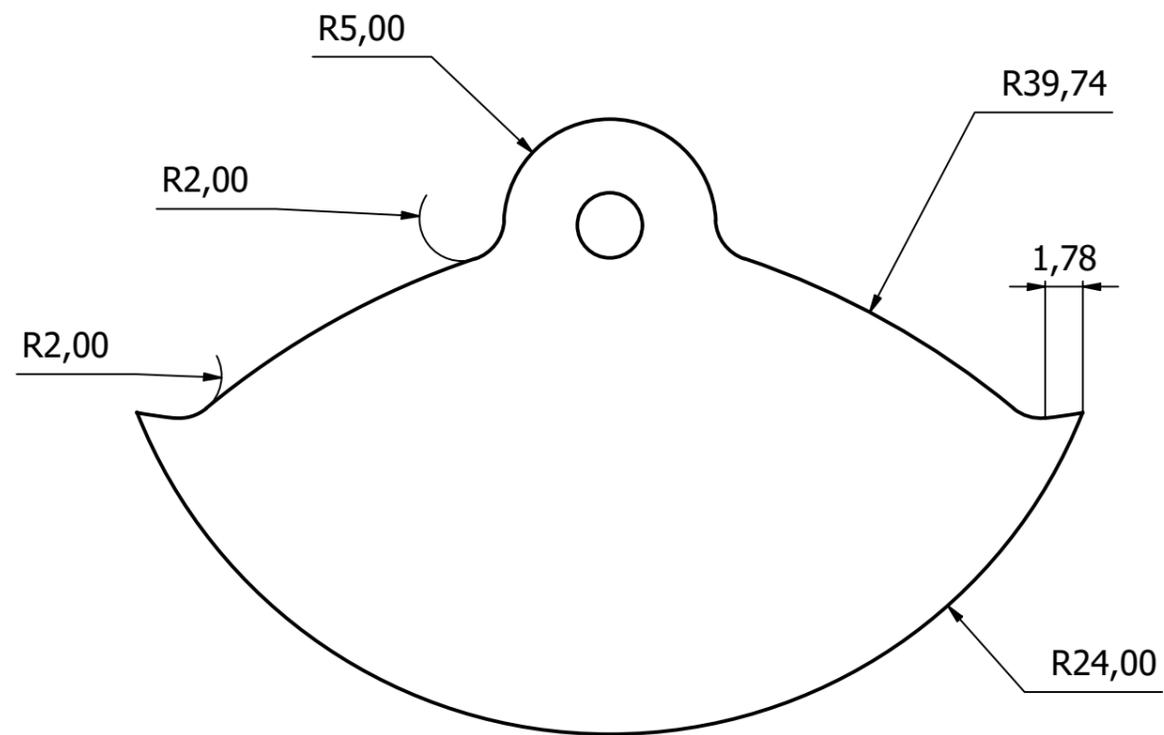
Tolerancia $\pm 0,3$	Peso 53.5 g	MASA DE ZINC	
Dibujado	Fecha 17/10/2021	MATERIAL: ZINC	Escala 3:1
Revisado	Nombre E.A, J.A, J.S, K.V		
Aprovado			
		Código 2021.VEH3	Trat. Superficial N/A
			Hoja 3/11



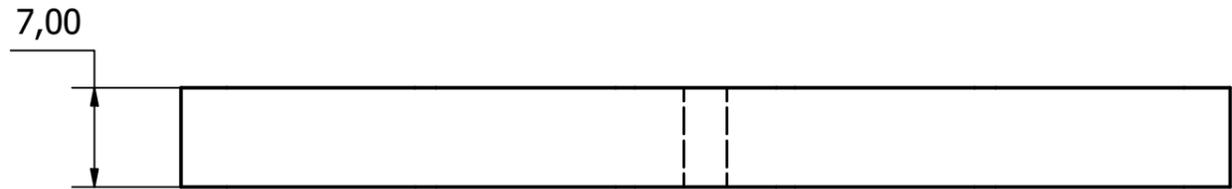
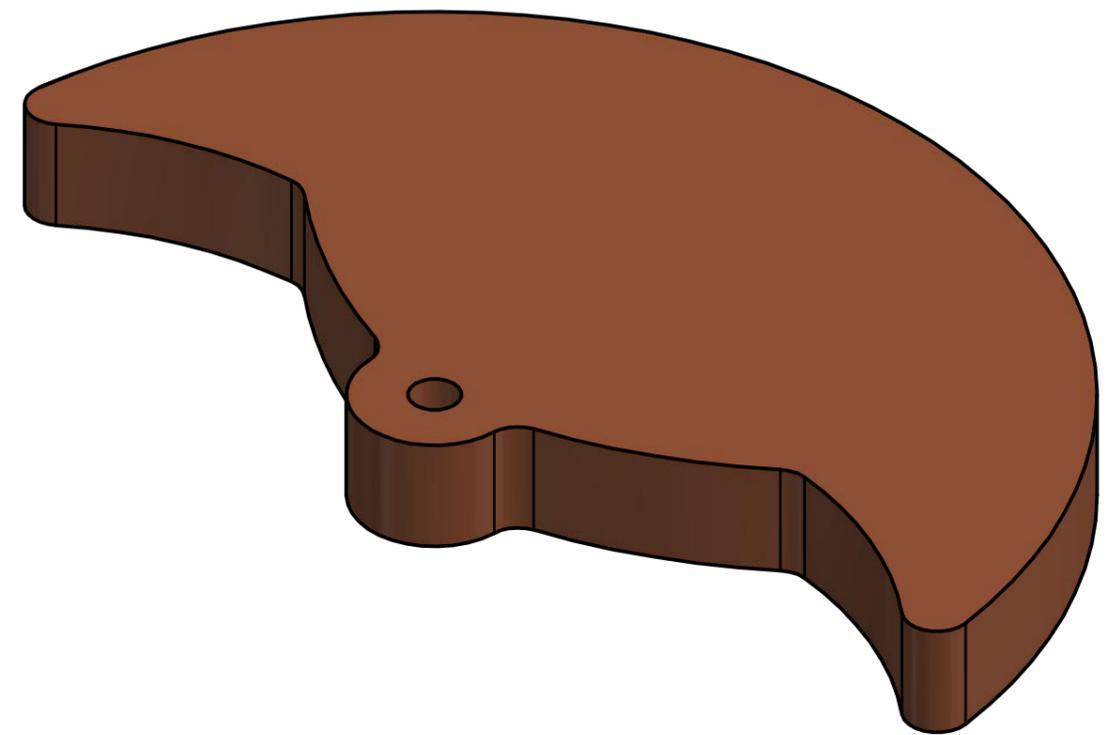
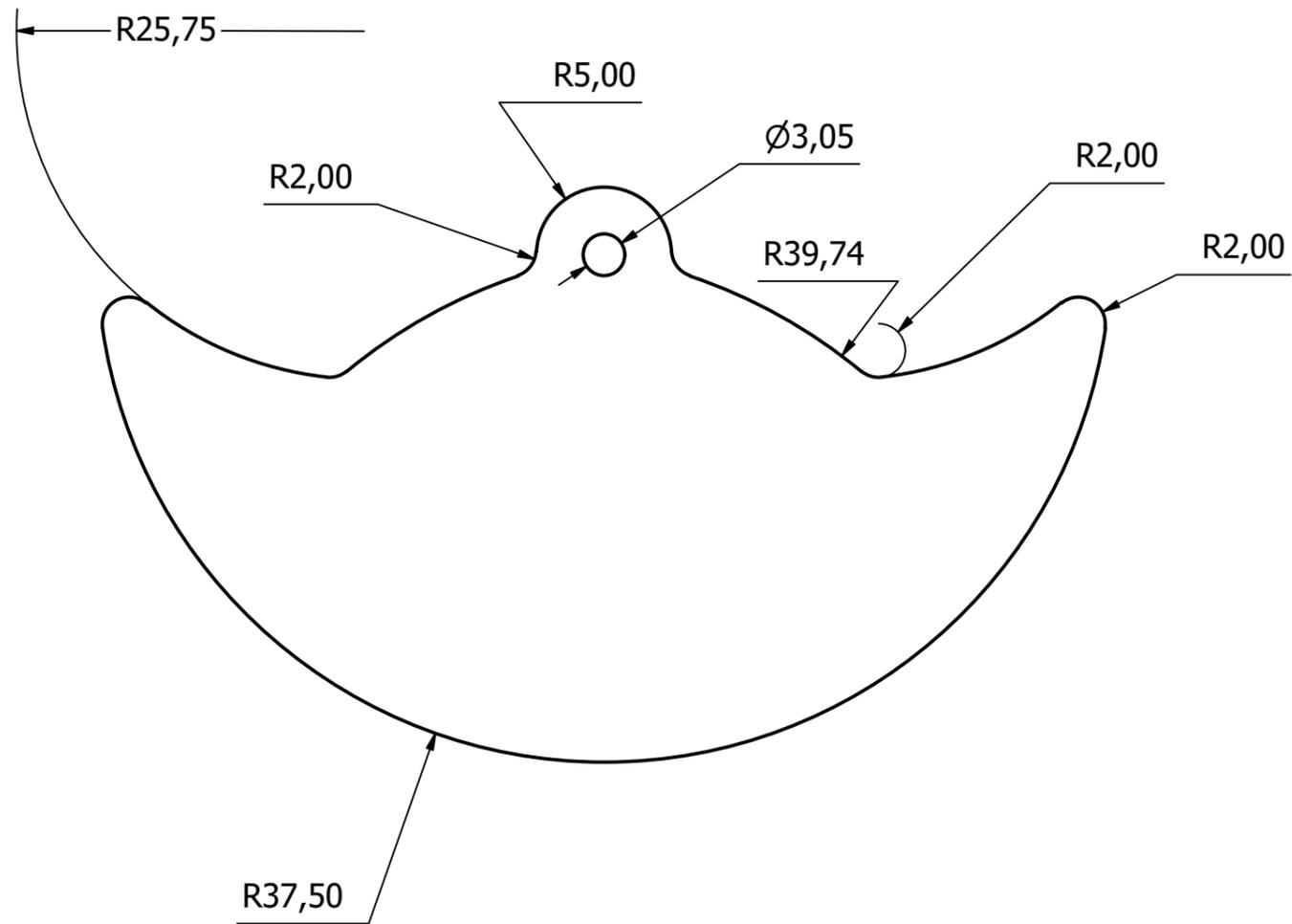
Tolerancia ± 0,3	Peso N/A	TAPA INFERIOR		
Dibujado	Fecha 17/10/2021	MATERIAL: PLA		Escala 1.5:1
Revisado	Nombre E.A, J.A, J.S, K.V			
Aprovado				
		Código 2021.VEH4	Trat. Superficial N/A	Hoja 4/11



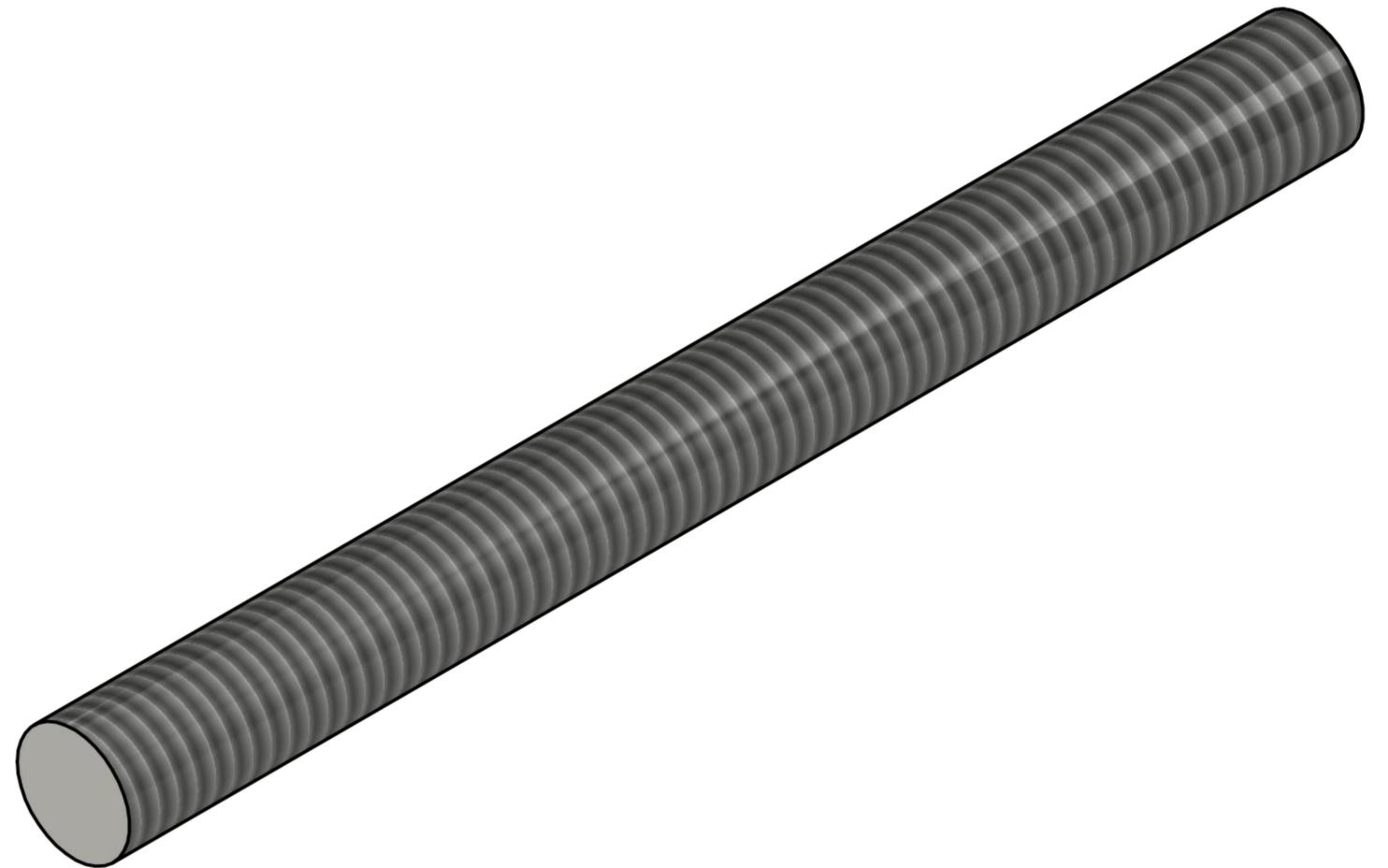
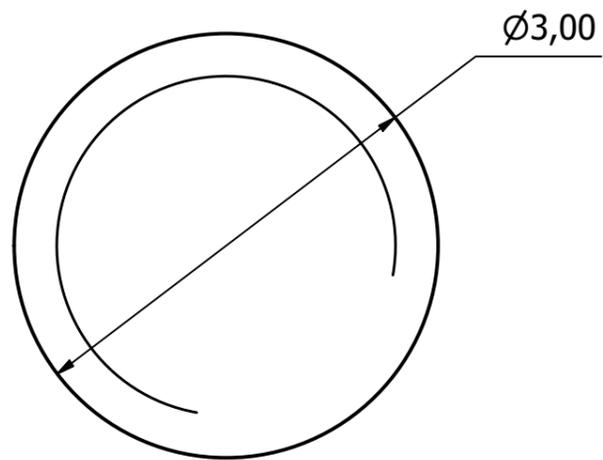
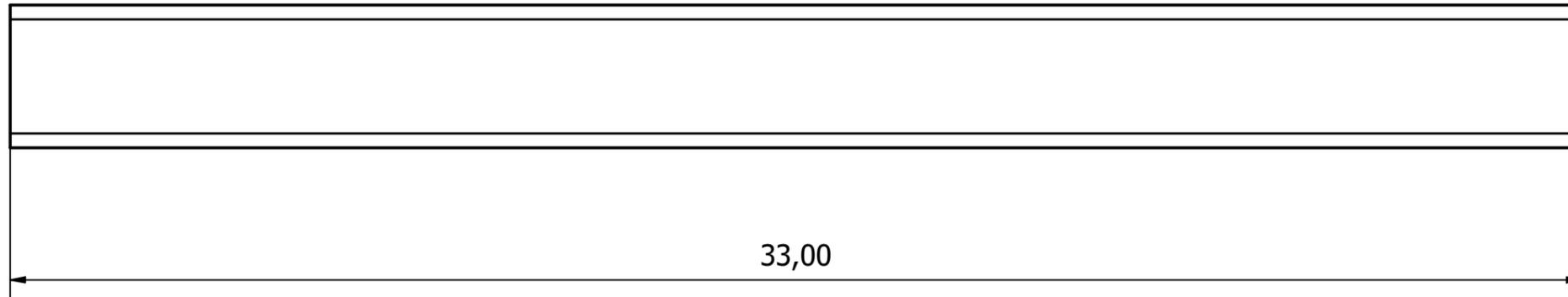
Tolerancia ± 0,3	Peso N/A	TAPA SUPERIOR		
Dibujado	Fecha	MATERIAL: PLA		Escala 1.5:1
Revisado	Nombre			
Aprovado				
		Código 2021.VEH5	Trat. Superficial N/A	Hoja 5/11



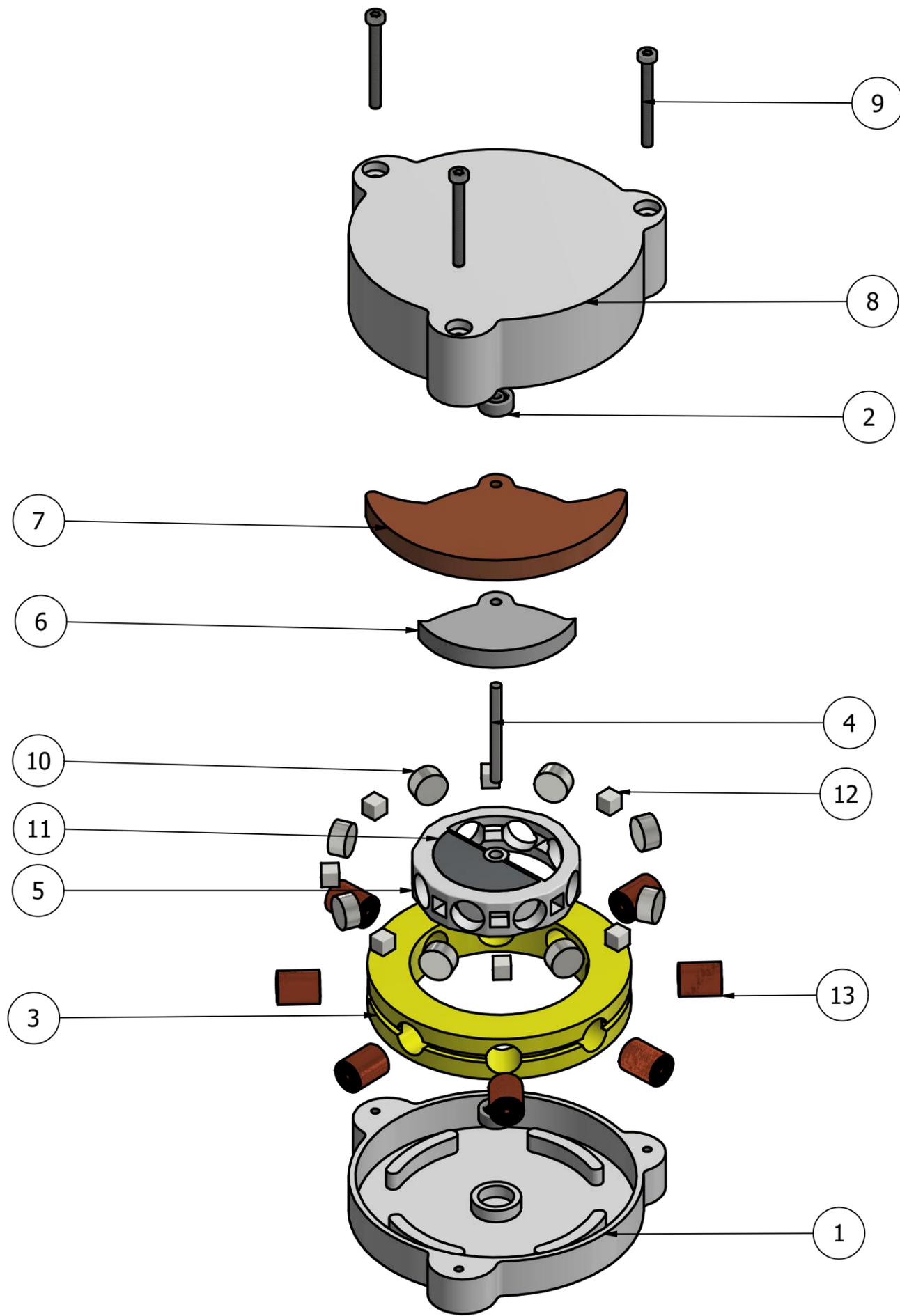
Tolerancia ± 0,3	Peso N/A	ELEVADOR		
Dibujado	Fecha	MATERIAL: PLA		Escala 3:1
Revisado	Nombre			
Aprovado				
		Código 2021.VEH6	Trat. Superficial N/A	Hoja 6/11



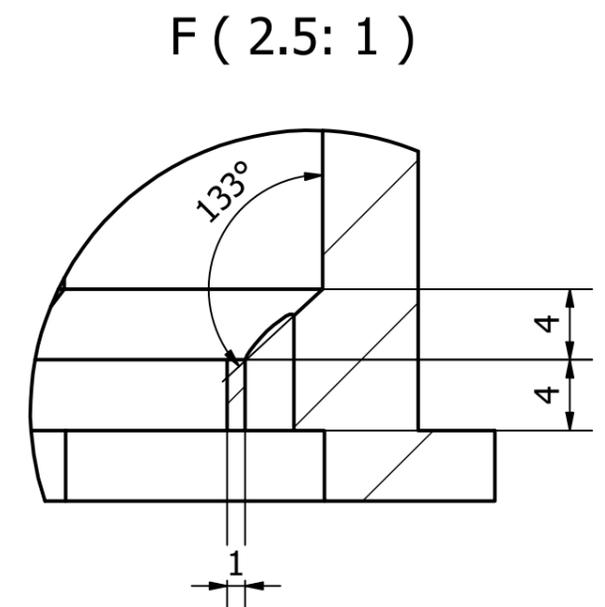
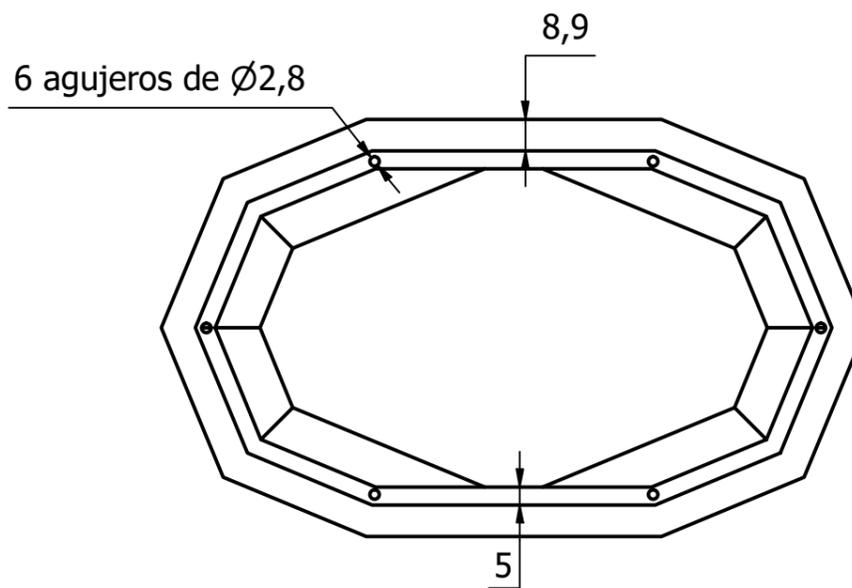
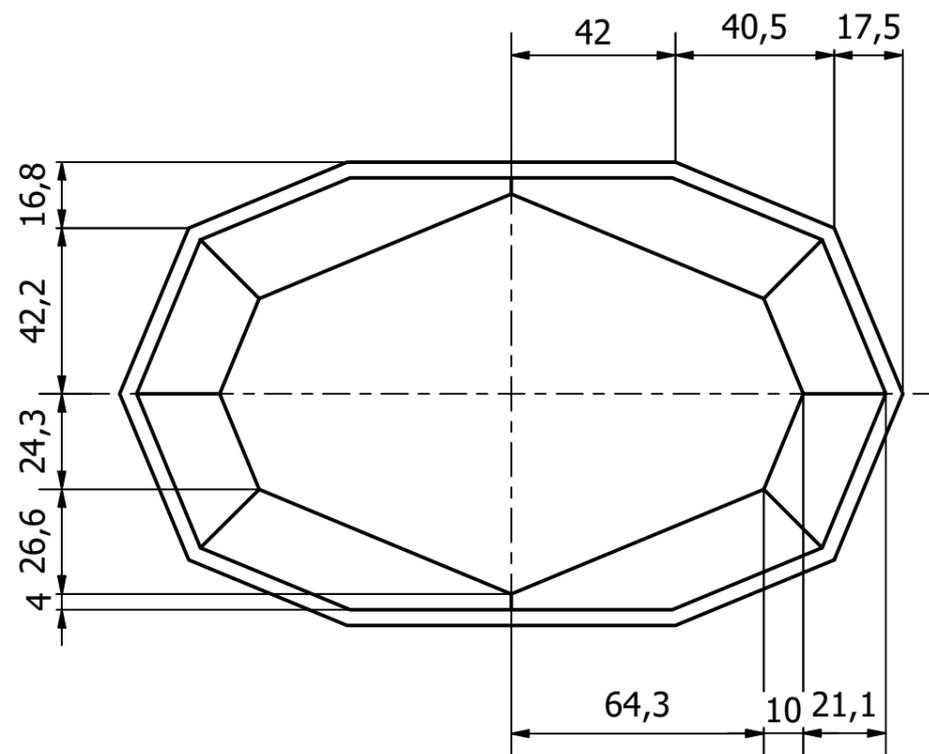
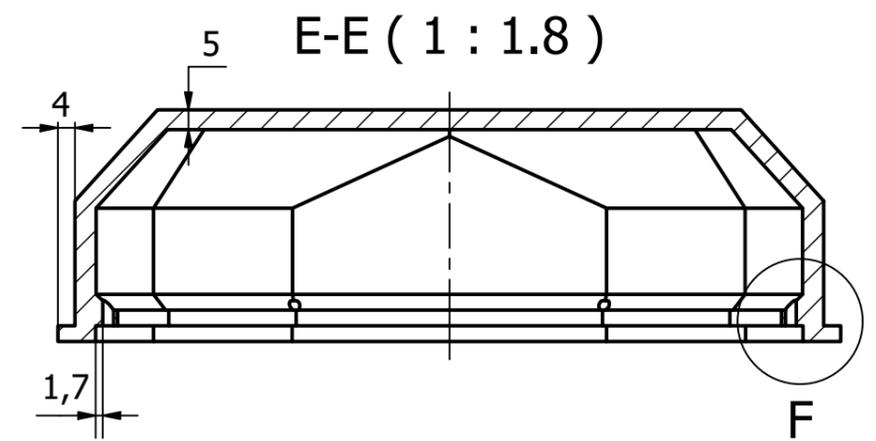
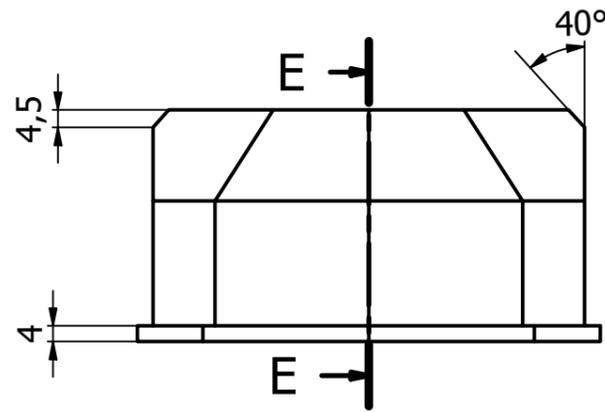
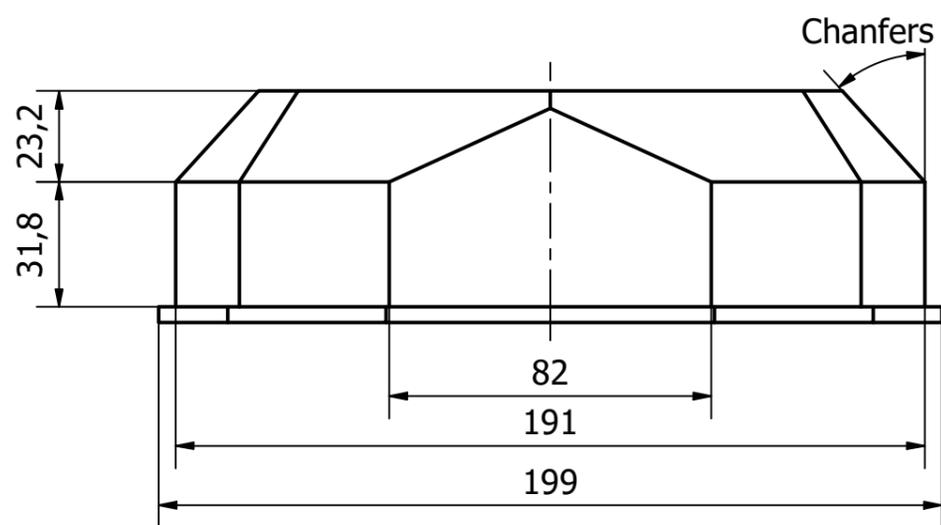
Tolerancia $\pm 0,3$	Peso 160 g	MASA DE BRONCE	
Dibujado	Fecha	MATERIAL: BRONCE	Escala 2:1
Revisado	Nombre		
Aprovado	E.A., J.A., J.S., K.V		
		Código 2021.VEH7	Trat. Superficial N/A
			Hoja 7/11



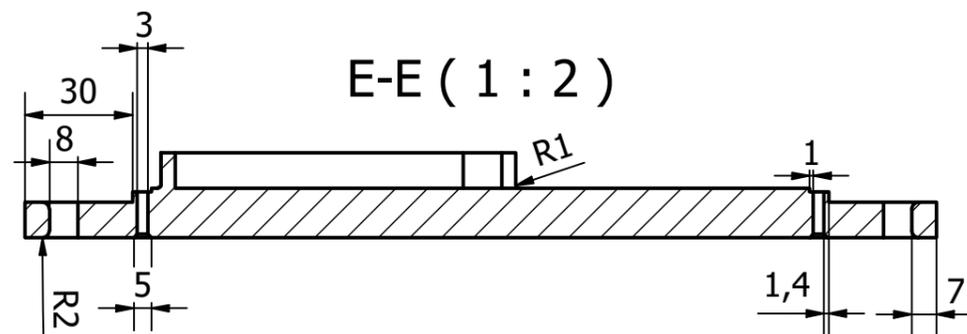
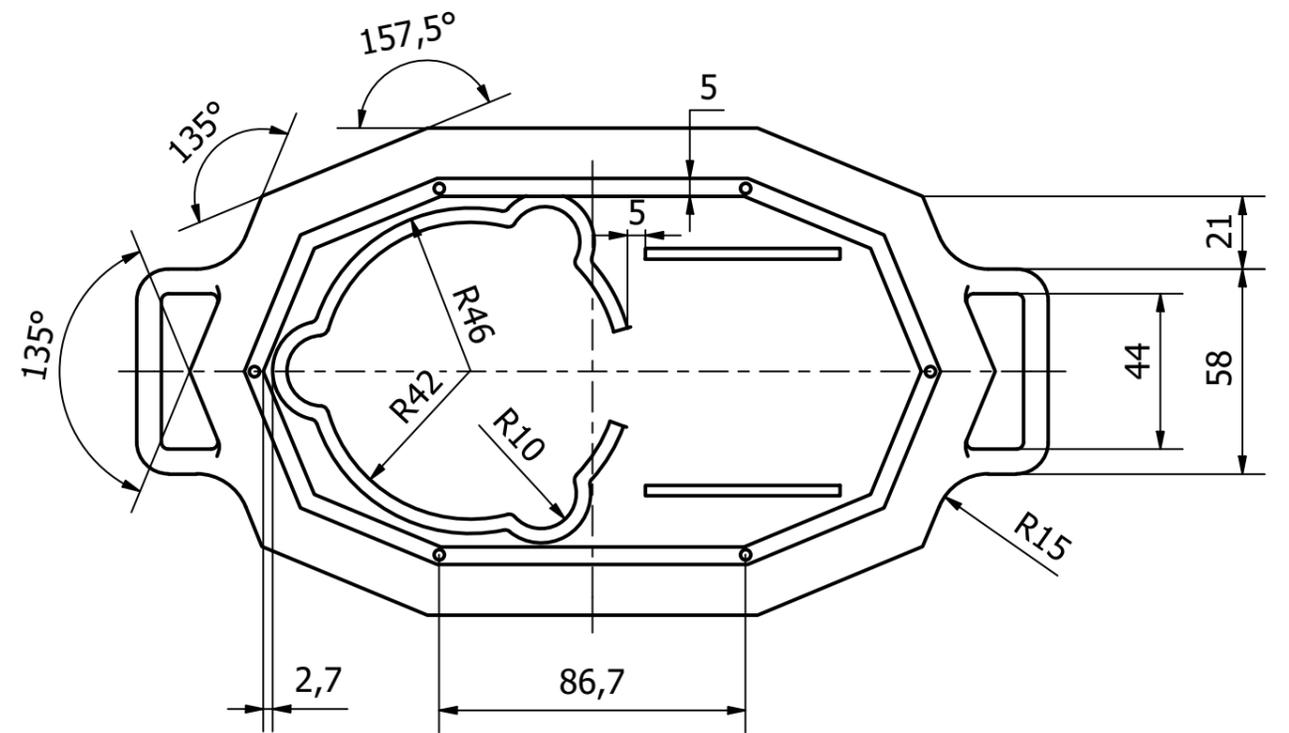
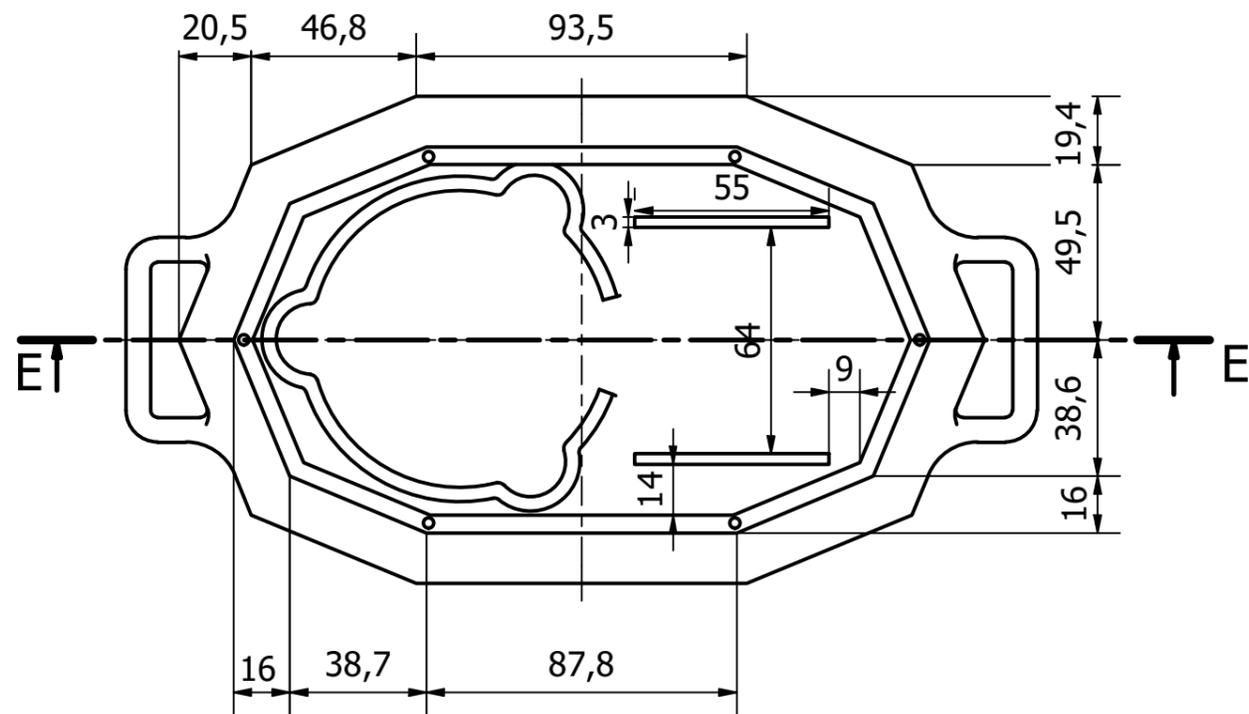
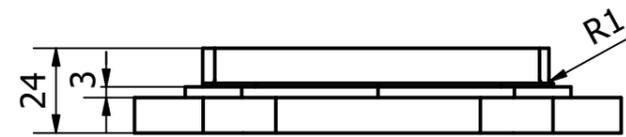
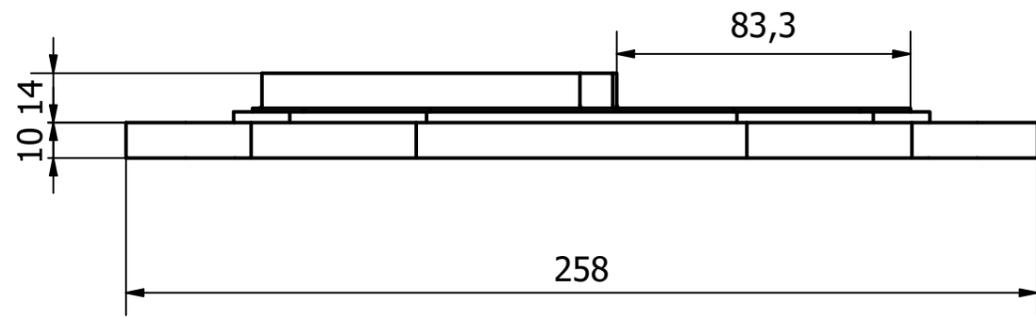
Tolerancia ± 0,3	Peso N/A	EJE		
Dibujado	Fecha 17/10/2021	Nombre E.A, J.A, J.S, K.V	ACERO K100	Escala 1.5:1
Revisado				
Aprovado				
		Código 2021.VEH8	Trat. Superficial N/A	Hoja 8/11



LISTA DE PARTES				
ITEM	CANT	PARTE	DESCRIPCIÓN	
1	1	TAPA INFERIOR		
2	2	RODAMIENTO	Rodamientos rígidos de bolas	
3	1	ESTATOR		
4	1	EJE		
5	1	ROTOR		
6	1	ELEVADOR		
7	1	MASA BRONCE	160 g	
8	1	TAPA SUPERIOR		
9	3	NF E 25-111 - M3x30 CLASE 4.8	Cabeza avellanada empotrada de seis lóbulos - Grado de producto A - Símbolo CZX	
10	8	IMANES CILÍNDRICOS	N52	
11	1	MASA DE ZINC	53.5 g	
12	8	IMANES CÚBICOS	N52	
13	8	BOBINAS DE COBRE		
Tolerancia ± 0,3		Peso N/A	VIBRATION ENERGY HARVESTER	
Fecha 17/10/2021		Nombre E.A, J.A, J.S, K.V		Escala 1.5:1
Dibujado		Revisado		
Revisado		Aprovado		
Aprovado		MATERIAL: VARIOS		Hoja 9/11
		Código 2021.VEH9	Trat. Superficial N/A	



Tolerancia ± 0,3	Peso N/A	Carcasa		
Dibujado	Fecha	MATERIAL: PLA		Escala 1.5:1
Revisado	Nombre			
Aprovado				
		Código 2021.VEH10	Trat. Superficial N/A	Hoja 10/11



Tolerancia ± 0,3	Peso N/A	BASE CARCASA		
Dibujado	Fecha	MATERIAL: PLA		Escala 1.5:1
Revisado	Nombre			
Aprovado				
		Código 2021.VEH11	Trat. Superficial N/A	Hoja 11/11



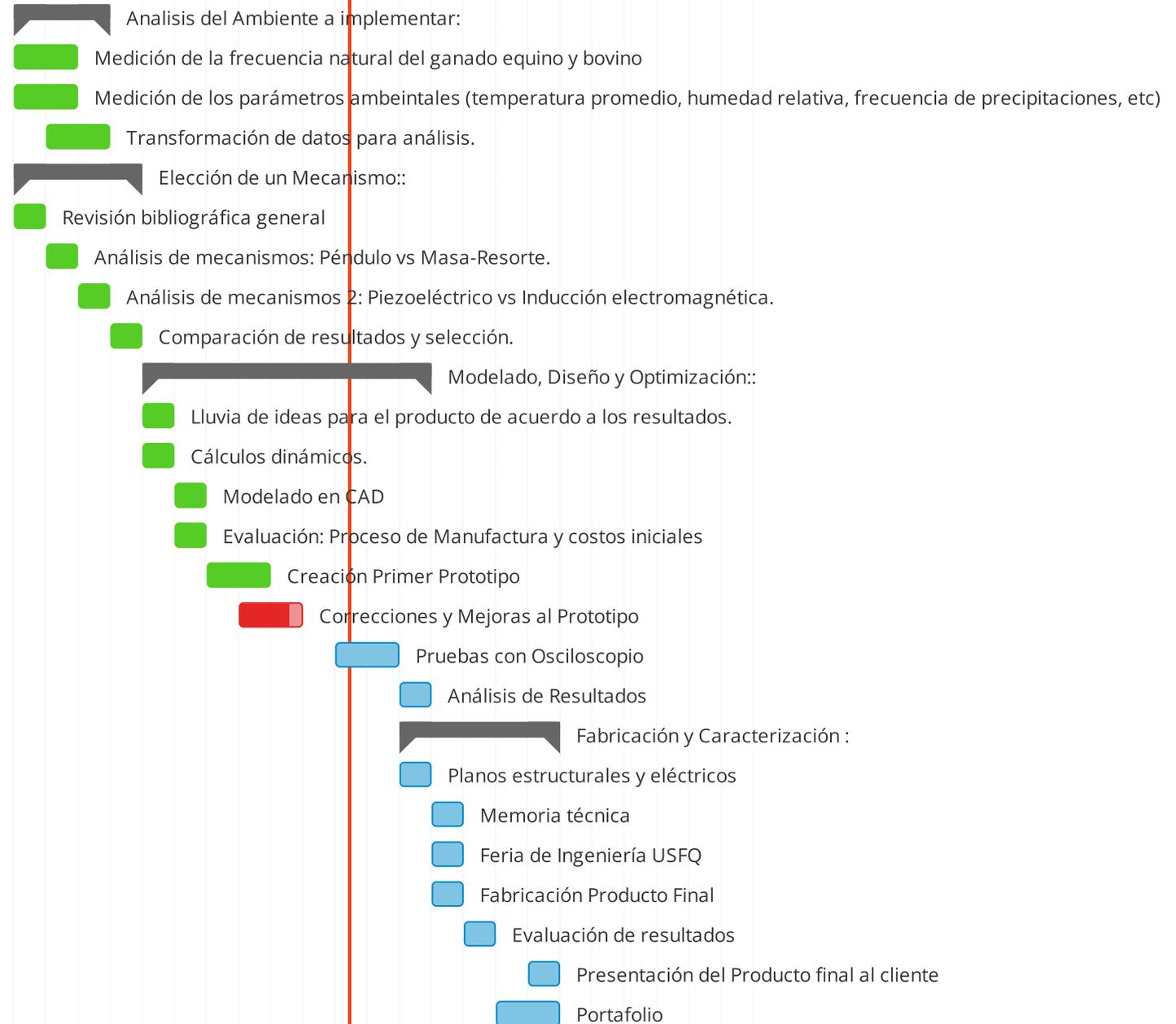


# **Apéndice B**

# Vibration Energy Harvester

Read-only view, generated on 11 Nov 2021

	ACTIVITIES	ASSIGNEE	EH	START	DUE	%
	<b>Análisis del Ambiente a implementar:</b>		-	05/Sep	15/Sep	100%
1	✓ Medición de la frecuencia natural ...		-	05/Sep	11/Sep	100%
2	✓ Medición de los parámetros ambe...		-	05/Sep	11/Sep	100%
3	✓ Transformación de datos para an...		-	11/Sep	15/Sep	100%
	<b>Elección de un Mecanismo::</b>		-	30/Aug	24/Sep	100%
5	✓ Revisión bibliográfica general		-	30/Aug	02/Sep	100%
6	✓ Análisis de mecanismos: Péndulo ...		-	06/Sep	10/Sep	100%
7	✓ Análisis de mecanismos 2: Piezoel...		-	13/Sep	17/Sep	100%
8	✓ Comparación de resultados y sele...		-	20/Sep	24/Sep	100%
	<b>Modelado, Diseño y Optimización::</b>		-	27/Sep	24/Nov	64%
10	✓ Lluvia de ideas para el producto d...		-	27/Sep	29/Sep	100%
11	✓ Cálculos dinámicos.		-	29/Sep	03/Oct	100%
12	✓ Modelado en CAD		-	04/Oct	06/Oct	100%
13	✓ Evaluación: Proceso de Manufactu...		-	06/Oct	10/Oct	100%
14	✓ Creación Primer Prototipo		-	11/Oct	20/Oct	100%
15	⊗ Correcciones y Mejoras al Prototipo		-	21/Oct	28/Oct	80%
16	⊗ Pruebas con Osciloscopio		-	08/Nov	19/Nov	0%
17	⊗ Análisis de Resultados		-	22/Nov	24/Nov	0%
	<b>Fabricación y Caracterización :</b>		-	24/Nov	24/Dec	0%
19	⊗ Planos estructurales y eléctricos		-	24/Nov	26/Nov	0%
20	⊗ Memoria técnica		-	29/Nov	01/Dec	0%
21	⊗ Feria de Ingeniería USFQ		-	01/Dec	02/Dec	0%
22	⊗ Fabricación Producto Final		-	03/Dec	05/Dec	0%
23	⊗ Evaluación de resultados		-	06/Dec	10/Dec	0%
24	⊗ Presentación del Producto final al ...		-	20/Dec	24/Dec	0%
25	⊗ Portafolio		-	14/Dec	20/Dec	0%



**BUDGET**

<b>Item</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor</b>
1	Bobinas	10	\$ 84.00
2	Imanes	10	\$ 23.00
3	Rodamientos	4	\$ 6.00
4	Impresión 3D	10	\$ 28.56
5	Electrónicos (Jumpers, Brochera, Módulo Wifi Esp8266, Lector Micro SD raspberry, Arduino Nano, Batería 9V, Filamento PLA )	24	\$ 40.50
6	Eje	2	\$ 12.01
7	Insumos (brujita, boquilla 3D, talco)	2	\$ 9.95
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 204.02</b>

# **Apéndice C**

Código	Descripción	Prioridad= Probabilidad x Impacto	Responsable	Decisión tomada	Estatus	Observaciones
1	Escasez de componentes en el mercado nacional	4x4=16	Josué Solís	<b>Prepararse</b> : Investigar en el mercado internacional (Ebay, Amazon, Alibaba, entre otras.) y crear una lista de las posibles opciones para su aprobación de compra. <b>Transferir</b> : Consultar con el cliente para poder realizar la gestión de importar.	Vigente	Aumenta el costo y retrasa gravemente la manufactura y ensayos del mecanismo
2	Retraso de entrega de acelerómetros para determinar la frecuencia natural	3x5=15	Carlos Andrade	<b>Compartir</b> : Construir un acelerómetro a través de ayuda de expertos o usar una aplicación del teléfono como "Phyphox" que ayude a determinar la frecuencia natural de los animales.	Finalizado	Retraso en el proyecto y en el diseño del mecanismo
3	Materiales inadecuados para la construcción de la carcasa	3x5=15	Equipo	<b>Evitar</b> : Considerar distintos materiales (PLA, Acrílico, ABS, PETG, etc.) según sus propiedades mecánicas y factores climáticos para implementarlo en el diseño y manufactura del dispositivo generador de energía.	Vigente	Eleva el costo de fabricación y provoca retrasos significativos
4	Transducción de energía insuficiente para alimentar el electrónico	2x5=10	Equipo	<b>Reducir</b> : Analizar e investigar el estado del arte de las tecnologías de transducción energética para seleccionar el mecanismo más eficiente y sea capaz de cumplir con la demanda de energía. <b>Prepararse</b> : Emplear tiempo y recursos para realizar mejoras de eficiencia en el dispositivo basándose en los errores evidenciados, es decir, realizar ensayos para evaluar los prototipos desarrollados. (Emplear osciloscopios para evaluar la señal y voltaje obtenidos a partir de la transducción mecánica del generador)	Vigente	Elevaría el costo estipulado y retrasaría el entregable
5	Cálculo erróneo de un componente del mecanismo	3x5=15	Equipo	<b>Prepararse</b> : Estudiar la teoría pertinente y utilizar fuentes confiables de información para emplear ecuaciones y datos adecuados. <b>Compartir</b> : Analizar individual y colectivamente , comprobando los cálculos con la teoría adecuada y ayuda de tutores.	Vigente	Aumentaría la probabilidad de error y retrasaría el proceso de manufactura y prueba
6	Fallo de un componente (avería durante el ensamblaje, fallo de fábrica, pérdida)	2x5=10	Equipo	<b>Evitar</b> : Contar con repuestos de los componentes más propensos a fallar. Mantener contacto con los proveedores correspondientes. <b>Reducir</b> : En el caso de que no se pueda contar con repuestos, se debe manipular y colocar los componentes con todas las medidas de seguridad para asegurar una larga duración.	Vigente	Aumentaría el costo del proyecto
7	No es posible fabricar de manera adecuada los componentes específicos necesarios para el generador (bobinado, rodamientos , impresión 3D)	2x4=8	Equipo	<b>Prepararse</b> : Asesorarse con el encargado del taller mecánico en la USFQ para el uso apropiado del torno CNC. Solicitar ayuda para utilizar los servicios de Impresión 3D presentes en la USFQ. <b>Transferir</b> : Subcontratar el servicio de mecanizado en el Taller Mecánico Sotomayor, al igual que la impresión 3D en KMPRINT y la fabricación de los bobinados en Industrias Logacho Almeida.	Vigente	Retraso de la fabricación del mecanismo
8	Desgaste acelerado de los imanes de neodimio.	2x4=8	Equipo	<b>Prepararse</b> : Adquirir imanes de repuesto que puedan ser reemplazados una vez la fuerza electromagnética no sea la adecuada para continuar con la actividad del generador. Realizar perfiles de decaimiento apropiados dependiendo las condiciones operativas, para realizar planificaciones de mantenimientos preventivos y correctivos en el generador.	Vigente	Baja eficiencia del dispositivo, lo que evitaría cumplir los requerimientos planteados por el cliente.
9	Contagio por Covid-19 en los integrantes del equipo.	1x5=5	Equipo	<b>Aceptar</b> : Comunicar a los miembros del grupo de forma oportuna: síntomas y molestias. En caso de suceder buscar acciones para que el proyecto no se detenga como trabajo desde casa o reemplazar al miembro afectado hasta su recuperación. <b>Mitigar</b> : Realizar las actividades pendientes desde casa, evitar contacto con externos y mantener las medidas de bioseguridad adecuadas para evitar un brote significativo.	Vigente	Retraso en el proyecto
10	Riesgo de mal funcionamiento o avería de los componentes electrónicos (sensores, micro-procesador) debido al campo magnético propio de los imanes.	2x5=10	Equipo	<b>Prepararse y Evitar</b> : Buscar asesoría en expertos y bibliografía sobre la influencia del campo magnético de los imanes de neodimio en micro-procesadores. En función de la información hallada analizar la posibilidad de reconfigurar las ubicaciones de los componentes, implementar un aislamiento o simplemente mantener la configuración pensada si no existiese influencia alguna debido a la magnitud del campo o la distancia entre componentes.	Vigente	Baja eficiencia del dispositivo. Retraso en el proyecto.
11	Deterioro de los componentes por factores climáticos (polvo, lluvia, rayos UV).	4x4=16	Equipo	<b>Prepararse y Evitar</b> : Explorar los grados de protección IP basados en la norma CEI 60529 y considerar dicha normativa para la selección apropiada de recubrimientos o materiales necesarios para otorgar una protección eficaz al dispositivo contra situaciones climáticas adversas.	Vigente	Retraso en el proyecto. Elevaría el costo.
12	Riesgo de cortocircuito en la interfaz.	2x5=10	Carlos Andrade	<b>Prepararse</b> : Realizar una correcta caracterización del amperaje y voltaje generado por el dispositivo. Realizar las conexiones respectivas de forma apropiada y verificarlo con un experto o tutor. <b>Evitar y Transferir</b> : Informar al cliente los resultados obtenidos para considerar la implementación de protecciones en el circuito electrónico.	Vigente	Retraso en el proyecto. Elevaría el costo.



R.U.C.: 1791145852001

## FACTURA

No.: 001-002-000008240

### NÚMERO DE AUTORIZACIÓN

1510202101179114585200120010020000082400000824014

### FECHA Y HORA DE

18/10/2021 12:06:22

### AUTORIZACIÓN:

AMBIENTE: PRODUCCIÓN

EMISIÓN: NORMAL

### CLAVE DE ACCESO



1510202101179114585200120010020000082400000824014

### INDUSTRIAS LOGACHO ALMEIDA CIA LTDA

Dirección matriz: AV.SIMON BOLIVAR

Dirección sucursal: AV.SIMON BOLIVAR

Teléfono: 3194728

Email: titologacho@arranques.net

Contribuyente Especial No.:

Obligado a llevar contabilidad: SI

Agente de Retención Resolución No. 1

Razón Social / Nombre y Apellidos: JUAN PROAÑO

Identificación: 1803882727

Fecha Emisión: 15/10/2021

Guía Remisión:

Cod. Principal	Cant.	Descripción	Uni. Medida	Precio Unitario	Descuento	Precio Total
00008	1,000000	REBOBINAR BOBINA Diseño y construccion de bobina prototipo para tesis de grado		25,000000	0,00	25,00
00008	8,000000	REBOBINAR BOBINA Diseño y construccion de bobinas para tesis de grado		5,000000	0,00	40,00

### Información Adicional

Email cliente: el1985@gmail.com

Dirección cliente: Tumbaco QUITO

Teléfono: 0998251225

SUBTOTAL 12%	65,00
SUBTOTAL 0%	0,00
SUBTOTAL NO OBJETO IVA	0,00
SUBTOTAL EXENTO IVA	0,00
SUBTOTAL SIN IMPUESTOS	65,00
TOTAL DESCUENTO	0,00
ICE	0,00
IVA 12%	7,80
IRBPNR	0,00
PROPINA	0,00
<b>VALOR TOTAL (USD)</b>	<b>72,80</b>

Forma Pago	Valor	Plazo	Tiempo
SIN UTILIZACION DEL SISTEMA FINANCIERO	72,80	0	dias



XTREGA 3D

Rosa Ximena Morales Iles

Dirección matriz: Av. 12 de Octubre N24-55 y Mariscal Foch Edif. ASTORIAS Ofic. 203

Dirección sucursal: Av 12 de Octubre N24-55 y Mariscal Foch. Ofic 203

Teléfono: 0986582039

OBLIGADO A LLEVAR CONTABILIDAD: NO  
CONTRIBUYENTE RÉGIMEN MICROEMPRESAS

RUC: 1003163225001

FACTURA

No. 001-010-000000137

NÚMERO DE AUTORIZACIÓN

1512202101100316322500120010100000001377529418716

FECHA Y HORA DE AUTORIZACIÓN: 15/12/2021 03:03 PM

AMBIENTE: PRODUCCIÓN

EMISIÓN: NORMAL

CLAVE DE ACCESO



1512202101100316322500120010100000001377529418716

Razón social / Nombres y apellidos: Juan Sebastian Proaño  
Identificación: 1803882727  
Fecha emisión: 15/12/2021  
Dirección: Tumbaco  
Teléfono: 0998251225

Cod. Principal	Cod. Auxiliar	Cantidad	Descripción	Precio unitario	Descuento	Precio total
NOZZLEMK	NOZZLEMK	1,00	Nozzle MK8 Acero endurecido 0.4mm.	6,250000	0,00	6,25
SUBTOTAL 12%						6,25
SUBTOTAL 0%						0,00
SUBTOTAL NO OBJETO DE IVA						0,00
SUBTOTAL EXENTO DE IVA						0,00
SUBTOTAL SIN IMPUESTOS						6,25
TOTAL DE DESCUENTO						0,00
ICE						0,00
IVA 12%						0,75
IRBPNR						0,00
PROPINA						0,00
<b>VALOR TOTAL</b>						<b>7,00</b>

Forma de pago	Valor
1001 - Sin utilización del sistema financiero (Efectivo)	7,00

Información adicional

Correo de cliente: jsproano@usfq.edu.ec

Enviar los comprobantes de retenciones electrónicas al correo: ximena.morales4@gmail.com

Régimen: Régimen Contribuyente Microempresas



SUCURSAL: FYBECA PASEO SAN FRANCISCO

PASAJE A S/N Y VIA INTEROCEANICACC.PASEO SAN FRANCISCO

Ruc: 1790710319001

Servicio Cliente 1700-Fybeca

FACTURA ELECTRONICA

No: 118-001-001047689

Fecha: 25/10/2021 15:06

Cod 11408344

DOC 1265086

Cliente: PROAÑO AVILES JUAN SEBASTIAN

Ruc / CI: 1803882727

Dirección: ANTONIA LEON E7-208 Y ESCALON

DESCRIPCION	CANT	FYBECA	TOTAL
30038 PEGA INSTANTANEA B&C-PEGA INSTA	1	2.6300	2.631
<b>Total USD:</b>			<b>\$2.63</b>
DESGLOSE			
Tarifa 0%			0.00
Tarifa 12%			2.63
SUBTOTAL			2.63
IVA Tarifa 12%			0.32
<b>Total USD</b>			<b>\$2.95</b>

Items Vendidos: 1

Doc: FYBECA VITAL CARD

Pago: EFECTIVO

\$2.95

EN ESTA COMPRA SU DESCUENTO HA SIDO

\$0.29

**\*\*VALOR DEL GASTO DEDUCIBLE\*\***

ESCOLARES

\$2.63

LISTED FUE ATENDIDO POR: AMY MIÑO

CAJA: CAJA5

FARMACIAS Y COMISARIATOS DE MEDICINAS S.

Matriz: KM CINCO Y MEDIO AV DE LOS SHY S/N Y SECUNDARIA  
CONTRIBUYENTE ESPECIAL Resolucion No 5368



En FYBECA estamos para servirle

Consulta tu documento: <https://www.corporaciongpf.com/facturacionGPF/>

O en tu correo electrónico: [el1985@gmail.com](mailto:el1985@gmail.com), revise su bandeja de entrada o spam

Autorización / Clave de acceso / Esquema Off line  
2510202101179071031900121180010010476895658032317

QUITO-ECUADOR  
ORIGINAL-ADQUIRENTE

**JORGE PATRICIO SOTOMAYOR RUANO**

PERNOS - HERRAJES - TORNILLOS - REMACHES DE GOLPE  
 ARANDELAS PLANAS - ESTRUCTURAS METALICAS  
 MUEBLES INDUSTRIALES - TROQUELADOS PARA LA INDUSTRIA  
 CONTRIBUYENTE REGIMEN MICROEMPRESAS "AGENTE DE RETENCIÓN No. Resolución 1"

RUC. 1705138178001

**FACTURA** 001-001-00

Aut. SRI. 1127772002

OBLIGADO A LLEVAR CONTABILIDAD

Nº 0004526



Dirección: Barrio Aída León calle Peaña No. 26  
 Planta: Calle H Lote N 138 y Panamericana Sur Km. 14 1/2  
 Telf.: 2 670-301 / 3 006-792 / 3 006-793 / 0998 507 885

Cliente: JUAN SEBASTIAN PROAÑO

ORD. TRABAJO No.:

ORD. COMPRA No.:

DIRECCION: TUMBACO

RUC. / C.I.: 1803882727

FECHA: 13 de Octubre del 2021

GUIA DE REMISION No.:

ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD	V. UNIT	VALOR TOTAL
2	SERVICIO DE TORNO			
	PRECIO	2	5,36	10,72

SON: DOCE CON 1/100 DOLARES

<b>SUBTOTAL</b>	10,72
<b>IVA %</b>	1,29
<b>IVA 0%</b>	
<b>TOTAL \$</b>	12,01

Forma de pago:

Efectivo

Dinero Electrónico

Tarjeta de Crédito/Débito

Otros \$ 12,00

CONTADO CONTRA ENTREGA

CONDICIONES

**GRUPO GRAFICO ALBUJA**

Albuja Olalla Segundo Santiago R.U.C.: 1710482959001  
 AUT. 2886 Impreso del 004501 hasta 004600  
 Fecha Aut. 02/FEBRERO/2021  
 Válido hasta 02/FEBRERO/2022  
 Adquiriente: Original / Emisor: Copia 1 / SRI: Copia 2

*Juan Sebastian Proaño*

Firma Cliente

*Jorge Patricio Sotomayor Ruano*

Firma Autorizada

**ZORRILLA RAMOS  
JESSICA YOMAR**

RUC.: 0503357238001

**FACTURA**

001-001-000000303

Dir: Sector Illuchi, calle Principal S/N

Email.: jes\_jass@hotmail.com

Telf: (03)2 266 806 / 0983 044 588

**LATACUNGA - ECUADOR**

Aut. SRI.: 1128833935

Día	Mes	Año
12	10	21

\* VENTA AL POR MENOR POR COMISIONISTAS.

\* VENTA AL POR MAYOR DE OTROS PRODUCTOS DIVERSOS PARA EL CONSUMIDOR.

Sr. (es): **Juan Proaño**

RUC/C.C.: **1803882723**

Dirección: **Tumbaco**

G. Remisión:

Telf: **0998251225**

Cant.	DETALLE	V. UNIT.	V. TOTAL
10	Imanes de neodimio Glindro 10mm x 5mm Grado N52	2,30	23,00

**FORMA DE PAGO**

EFFECTIVO

DINERO ELECTRÓNICO

TARJETA DE CRÉDITO  
DÉBITO

OTROS

  
Firma Autorizada

Recibí Conforme

Sub Total 12 % **20,54**

Sub Total 0%

Iva 12 % **2,46**

Valor Total **23,00**

F. Autorización: 29/Sept./2021

F. Caducidad: 29/Sept./2022

**ING. OSCAR MAURICIO MORALES MORALES**  
 Elaboración y Construcción de Proyectos Eléctricos y Electrónicos  
 Urb. Biloxi Calle B: Pasaje OE7D N° S18-60 Telf: 2632-540 / 0984496620 / Quito Ecuador  
 Email: o.mauriciomorales@gmail.com

RUC: 1717321929001  
 AUT. SRI: 1127373340  
 FECHA DE AUTORIZACION: 13 DE NOVIEMBRE 2020

**FACTURA** 001-001-00  
 DOCUMENTO CATEGORIZADO: NO

**Nº 0000541**

FECHA: 18 de octubre 2021 RUC: 1803882227  
 CLIENTE: Juan Paez DIRECCION: Tumbaco TELF: 0998251225

CANT.	DESCRIPCION	V. UNITARIO	P. TOTAL
2	Rotor	2.00	4.00
1	Estator	2.00	2.00
1	Tapa Superior	1.25	1.25
1	Tapa Inferior	1.25	1.25
1	Rotor Imanes	2.00	2.00
1	Rotor para bobinas	3.50	7.00
2	Tapa Superior 2.0	4.00	4.00
1	Tapa Inferior 2.0	4.00	4.00
1	Tapa Inferior 2.0	4.00	4.00
<b>SUBTOTAL</b>			<b>25.50</b>
I.V.A. 12%			3.06
I.V.A. 0%			
<b>TOTAL USD</b>			<b>28.56</b>

FORMA DE PAGO	VALOR	VALOR
Efectivo		Tarjeta De Crédito/Débito
Dinero Electrónico		Otros

FIRMA AUTORIZADA: \_\_\_\_\_ RECIBI CONFORME: \_\_\_\_\_

ORIGINAL: Adquiriente - COPIA CLS: Emisor

# VHMG

Victor Hugo Masapanta Guayta

Victor Hugo Masapanta Guayta

Dirección matriz: Versalles N25-30 y Avenida Colón

Teléfono: 0998819116

OBLIGADO A LLEVAR CONTABILIDAD: NO  
CONTRIBUYENTE RÉGIMEN MICROEMPRESAS

RUC: 1720926300001

## FACTURA

No. 001-010-000000520

NÚMERO DE AUTORIZACIÓN

2510202101172092630000120010100000005209032744517

FECHA Y HORA DE AUTORIZACIÓN: 25/10/2021 10:24 AM

AMBIENTE: PRODUCCIÓN

EMISIÓN: NORMAL

CLAVE DE ACCESO



2510202101172092630000120010100000005209032744517

Razón social / Nombres y apellidos: Juan Sebastián Proaño  
Identificación: 1803882727  
Fecha emisión: 25/10/2021  
Dirección: Tumbaco  
Teléfono: 0998251225

Cod. Principal	Cod. Auxiliar	Cantidad	Descripción	Precio unitario	Descuento	Precio total
RODAMI11	RODAMIEN	2,00	Rodamiento 623zz.	1,339286	0,00	2,68
SUBTOTAL 12%						2,68
SUBTOTAL 0%						0,00
SUBTOTAL NO OBJETO DE IVA						0,00
SUBTOTAL EXENTO DE IVA						0,00
SUBTOTAL SIN IMPUESTOS						2,68
TOTAL DE DESCUENTO						0,00
ICE						0,00
IVA 12%						0,32
IRBPNR						0,00
PROPINA						0,00
<b>VALOR TOTAL</b>						<b>3,00</b>

Forma de pago	Valor
01 - Sin utilización del sistema financiero	3,00

### Información adicional

Correo de cliente: jsproano@usfq.edu.ec

Enviar los comprobantes de retenciones electrónicas al correo: hugo.masapanta@hotmail.com

Régimen: Régimen Contribuyente Microempresas

# ING. OSCAR MAURICIO MORALES MORALES

Elaboración y Construcción de Proyectos Eléctricos y Electrónicos  
 Urb. Biloxi Calle B: Pasaje OE7D N° S18-60 Telf: 2632-540 / 0984496620 / Quito Ecuador  
 Email: o.mauriciomorales@gmail.com

RUC. 1717321929001  
 AUT. SRI. 1127373340

**FACTURA** 001-001-00  
 DOCUMENTO CATEGORIZADO: NO

Nº 0000541

FECHA 18 de octubre 2021

RUC 1803882727

CLIENTE Juan Pinaño

TELF: 0998251225

DIRECCION Tumbaco

CANT.	DESCRIPCION	V. UNITARIO	P. TOTAL
2	Rotor	2.00	4.00
1	Estator	2.00	2.00
1	Tapa Superior	1.25	1.25
1	Tapa Inferior	1.25	1.25
1	Rotor Imanes	2.00	2.00
2	Rotor para bobina	3.50	7.00
1	Tapa Superior 2.0	4.00	4.00
1	Tapa Inferior 2.0	4.00	4.00

	FORMA DE PAGO	VALOR	VALOR		
	Efectivo		Tarjeta De Crédito/Débito	<b>SUBTOTAL</b>	25.50
	Dinero Electrónico		Otros	<b>I.V.A. 12%</b>	3.06
FIRMA AUTORIZADA 				RECIBI CONFORME	
				<b>TOTAL USD</b>	28.56

RAMOS GALLO MARCELO EDUARDO, Ultragraf RUC. 1705054706001, AUT. SRI 13787, Fecha de Caducidad: 13/11/2021 /DEL 0000501 AL 0000600

ORIGINAL: Adquirente - COPIA CLS: Emisor

# ESP 32

⇒ modo Activo ~ 790 mA  
(exagerado)

rango [160 - 260 mA] Rtc

Tiempo: 30 [s] (x2 de envío)  
total = 90 [s]

⇒ Modem Sleep ≈ 3 - 20 mA

slow speed → ↓ high speed

Normal speed [5 - 10] mA

Tiempo: ?

Wifi  
Bluetooth  
Radio  
Core & memory  
Co-processor  
RTC  
etc

USA

Core & memory  
Co-processor  
RTC

⇒ Light sleep ≈ 0.8 mA

USA

ACT. Pausa  
Co-processor ESP-32  
RTC core

STANDBY : 5 [min] ×  $\frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}$  = 300 [s]

TOTAL DE CICLO = 390 [s] (300 de STB, 90 de func.)

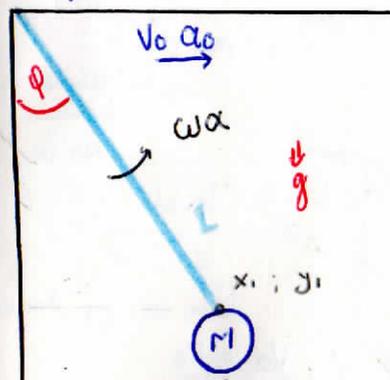
1 A = 1 [C/s] → coulomb

1 V = 1 [J/C]

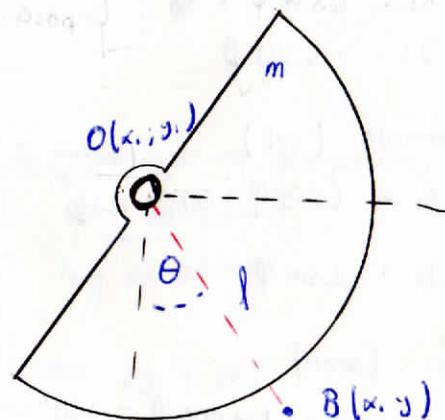
Aprox 3.3 [V] de alimentación

# Masa excéntrica

A(x<sub>0</sub>, 0)



$x_1 = L \sin \phi + x_0$   
 $y_1 = -L \cos \phi$



l: dist. desde el centro de gravedad al eje central.

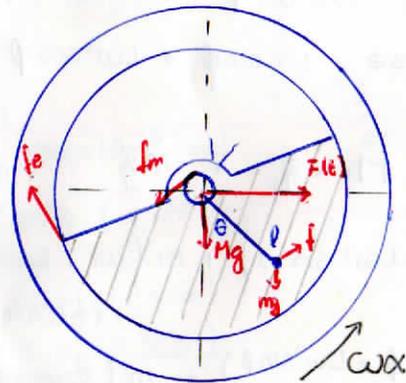
M: masa general ; m: masa giratoria

L: long. de la "extremidad" (Vanilla oscilatoria)

A: Extremo de la vanilla con mov. restringido en el eje x

x<sub>0</sub>: dist. de mov. de la barra en x

phi: ángulo de mov.



f: fuerza merced de efectos externos.

f<sub>e</sub>: fuerza de amort. electromagn. y rot.

f<sub>m</sub>: fuerza de amort. por el rozamiento entre el eje y rocl.

Por Pitágoras, las coord. de O son: Para el pt. A

$$\begin{cases} x_1 = L \sin \varphi + x_0 \\ y_1 = -L \cos \varphi \end{cases} \text{ } \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \text{pesc.}$$

↓ derivando (vel) (derivado de lo posc.)

$$\dot{x}_1 = L \cos \varphi \cdot \dot{\varphi} + \dot{x}_0$$

$$\dot{y}_1 = -L \sin \varphi \cdot \dot{\varphi}$$

↓ der. (acel)

$$\ddot{x}_1 = a_0 + L \alpha \cos \varphi - L \omega^2 \sin \varphi$$

$$\ddot{y}_1 = -L \alpha \sin \varphi - L \omega^2 \cos \varphi$$

$$\dot{x}_0 = v_0$$

$$a_0 = \ddot{x}_0$$

$$\omega = \dot{\theta}$$

$$\alpha = \ddot{\theta}$$

Para el pt. B

$$\begin{cases} \text{posc. } x = l \sin \theta + x_1 & \Rightarrow x = l \sin \theta + L \sin \varphi + x_0 \\ y = -l \cos \theta + y_1 & \Rightarrow y = -l \cos \theta - L \cos \varphi \end{cases}$$

$$\text{vel } \begin{cases} \dot{x} = v_0 + L \omega \cos \varphi + l \dot{\theta} \cos \theta \\ \dot{y} = l \dot{\theta} \sin \theta + L \omega \sin \varphi \end{cases}$$

$\dot{\theta}$  = vel. del rotar

$\ddot{\theta}$  = acel. del rotar

$$\text{acel } \begin{cases} \ddot{x} = a_0 + L \alpha \cos \varphi - L \omega^2 \sin \varphi + l \ddot{\theta} \cos \theta - l \dot{\theta}^2 \sin \theta \\ \ddot{y} = l \ddot{\theta} \sin \theta + l \dot{\theta}^2 \cos \theta + L \alpha \sin \varphi + L \omega^2 \cos \varphi \end{cases}$$

$$F = m \cdot a \quad \therefore \quad \boxed{F_T = M_1 \cdot \ddot{x}_1 + m \ddot{x}}$$

$F_{\text{veh}} = F_0 \sin \alpha$   
 ↓  
 como una vib. armónica

$$M_1 (a_0 + L \alpha \cos \varphi - L \omega^2 \sin \varphi) + m (a_0 + L \alpha \cos \varphi - L \omega^2 \sin \varphi + l \ddot{\theta} \cos \theta - l \dot{\theta}^2 \sin \theta)$$

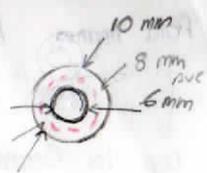
$$(M_1 + m) (a_0 + L \alpha \cos \varphi - L \omega^2 \sin \varphi) + m (l \ddot{\theta} \cos \theta - l \dot{\theta}^2 \sin \theta) = F_0 \sin \alpha \cos \theta$$

Inductancia

N: # Vueltas de la bobina



$$N = 690 \text{ [Vueltas]}$$



$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{l}$$

(Giancoli pg 316 pdf)

$\mu_0$ : permeabilidad del espacio libre  $[\frac{T \cdot m}{A}]$   
 $A$ : Área del solenoide  $[\text{m}^2]$   
 $l$ : long. del solenoide [m]

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ [Tm/A]} \text{ (Giancoli pg 4 pdf)}$$

$$A = \frac{\pi D_{\text{ave}}^2}{4} = \frac{\pi [(8 \times 10^{-3})^2]}{4} = 5.0265 \times 10^{-5} \text{ [m}^2]$$

$$l = 12 \times 10^{-3} \text{ [m]}$$

$$L = \frac{(4\pi \times 10^{-7}) \left[\frac{T \cdot m}{A}\right] \times (5.0265 \times 10^{-5}) \text{ [m}^2] \times 690^2}{12 \times 10^{-3} \text{ [m]}}$$

$$T = \frac{kg}{As^2}$$

$$L = 2.5061 \times 10^{-3} \left[ \frac{T \cdot m \cdot m^2}{A \cdot m} \right] = \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2} = [H]$$

$$L = 2.5061 \times 10^{-3} [H]$$

$$L = 2.5061 [mH]$$

$$L_T = N_B \times L \text{ (series)}$$

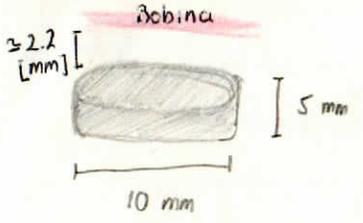
$$= 8 \times (2.5061)$$

$$= 20.049 [mH]$$

Para imanes N52

$B_{pole} : 1450 [mT]$

Dep la Geometria → Cilindros y ab.

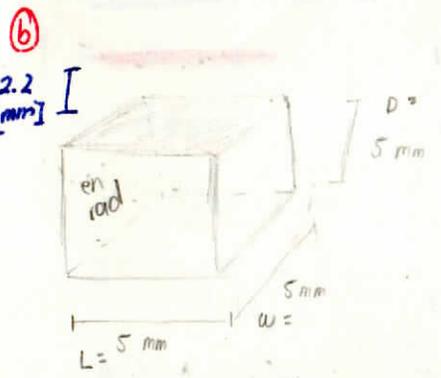


$$B = \frac{B_r}{2} \left( \frac{D+z}{\sqrt{R^2 + (D+z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{R^2 + z^2}} \right)$$

$B_r$ : Inductancia remanente (datasheet)  
 $D$ : espesor  
 $z$ : dist. del polo a la sup.  
 $R$ : radio

$$B_{cyl} = \frac{145}{2} \left( \frac{5+2.2}{\sqrt{5^2 + (5+2.2)^2}} - \frac{2.2}{\sqrt{5^2 + 2.2^2}} \right)$$

$B_{cyl} = 0.3035 [T]$   
 $= 303.51 [mT]$



$$B = \frac{B_r}{\pi} \left[ \arctan \left( \frac{Lw}{2z\sqrt{4z^2 + L^2 + w^2}} \right) - \arctan \left( \frac{Lw}{2(0+z)\sqrt{4(0+z)^2 + L^2 + w^2}} \right) \right]$$

$$B_{wb} = \frac{1.45}{\pi} \left[ \tan^{-1} \left( \frac{5 \times 5}{2(5+2.2)\sqrt{4(5+2.2)^2 + 5^2 + 5^2}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{5 \times 5}{2(5)\sqrt{4(5)^2 + 5^2 + 5^2}} \right) \right]$$

$B_{wb} = 0.2265 [T]$   
 $= 226.58 [mT]$

$B_T = B_{cyl} + B_{wb}$   
 $= 0.3035 + 0.2265 = 0.53 [T]$   
 $B_T \approx 530 [mT]$

Estimación de potencia

$$P(t) = \frac{n (NBL^2 R\theta)^2}{R_c}$$

$R_c$ : impedancia de las bobinas

$n$ : # imanes  
 $N$ : # vueltas  
 $B$ : campo mag.  
 $L$ : radio del rotor  
 $\theta$ : Vel. angular

$f = (2.34 [Hz] + 1.95 [Hz]) / 2 = 2.145 [Hz]$   
 $\omega = 2\pi f = 2\pi \times 2.145 [Hz] = 13.477 [rad/s]$

$R = 24 [mm] = 24 \times 10^{-3} [m]$   
 $L^* = 12 [mm] = 12 \times 10^{-3} [m]$

$\Omega = 23.4 [\Omega]$

$$P(t) = \frac{16 (690 \times 0.53 [T] \times (12 \times 10^{-3}) [m] \times (24 \times 10^{-3}) [m] \times 13.477 [rad/s])^2}{23.4 [\Omega]}$$

$P(t) = 1.377 [W]$

Unidades  $T^2 \cdot m^4 \cdot rad^2$   
 $\Omega \cdot s^2$

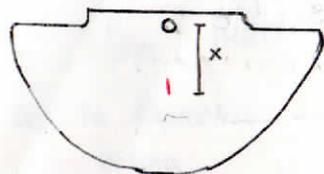
$T: \frac{kg}{As^2}$   
 $\Omega: \frac{kg \cdot m^2}{A^2 s^3}$

$\frac{kg^2}{A^2 s^4} \cdot m^4 \cdot \frac{rad^2}{s^2}$   
 $\frac{kg \cdot m^2}{A^2 s^3}$

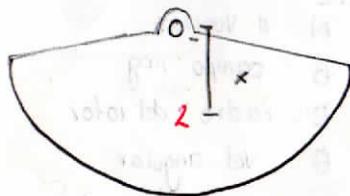
$N = \frac{kg \cdot m}{s^2}$

$\frac{kg^2 \cdot m^4 \cdot rad^2}{A^2 s^4 \cdot s^2} = \frac{kg^2 \cdot m^4 \cdot rad^2}{A^2 s^6}$   
 $\frac{kg \cdot m^2}{A^2 s^3} = \frac{kg \cdot m^2}{s^3} = \frac{kg \cdot m \cdot m}{s^3} = \frac{N \cdot m}{s^3} = \frac{kg \cdot m^2}{s^3}$

Incremento de Inercia  $I_z$



masa: 0.099 kg | 125.6 [g] <sup>0.1256</sup>  
 dist al centro de masa: 14.91 [mm]  
 inercia (33-inventor): 44.283 [kg·mm<sup>2</sup>]



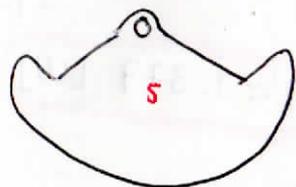
masa: 0.083 kg | 104.9 [g] <sup>0.1049</sup>  
 dist: 17.58 [mm]  
 $I_{yy} = 30.893$  [kg·mm<sup>2</sup>]



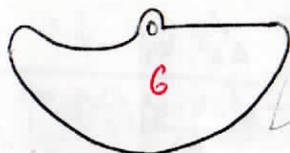
masa: 0.095 kg | 120.3 [g] <sup>0.1203</sup>  
 dist: 15.66 [mm]  
 $I_{yy} = 42.435$  [kg·mm<sup>2</sup>]



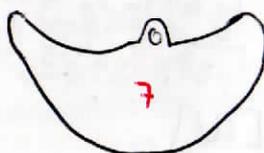
masa: 0.085 kg | 104.2 [g] <sup>0.1042</sup>  
 dist: 18.01 [mm]  
 $I_{yy} = 31.193$  [kg·mm<sup>2</sup>]



masa: 0.089 kg | 107.6 [g] <sup>0.1076</sup>  
 dist: 17.23 [mm]  
 $I_{yy} = 35.473$  [kg·mm<sup>2</sup>]



masa: 0.061 kg | 81.2 [g] <sup>0.0812</sup>  
 dist: 14.11 [mm]  
 $I_{yy} = 16.848$  [kg·mm<sup>2</sup>]



masa: 0.085 kg | 103.4 [g] <sup>0.1034</sup>  
 Dist: 17.70 [mm]  
 $I_{yy} = 35.290$  [kg·mm<sup>2</sup>]

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{mgh}{I}}$$

Pot. Reac.  
 Aparente  
 Real

$$f_1 = 3.24 \text{ [Hz]}$$

$$f_2 = 4.213 \text{ [Hz]}$$

$$f_3 = 3.596 \text{ [Hz]}$$

$$f_4 = 4.194 \text{ [Hz]}$$

$$f_5 = 3.93 \text{ [Hz]}$$

$$f_6 = 5.707 \text{ [Hz]}$$

$$f_7 = 3.943 \text{ [Hz]}$$

RL

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

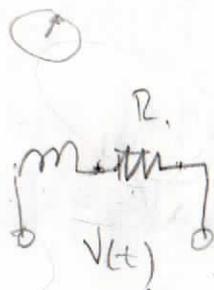
$$k = \omega^2 \cdot m \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{N}}{\text{s}^2 \cdot \text{m}}$$

$$k = \omega^2 m$$

$$= (2.742)^2 (0.1675 \text{ kg})$$

$$= 7.518 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$\omega^2 = \frac{k}{m} = \frac{1}{4\pi^2} \frac{mg}{I}$$



$$k = \frac{1}{4\pi^2} \frac{m^2 g}{I^2}$$

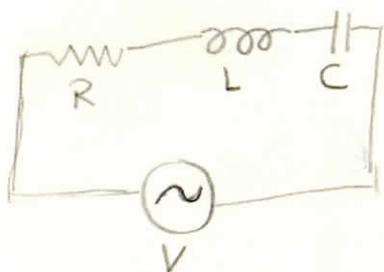
$$k = \frac{1}{4\pi^2} \frac{(0.1675 \text{ g}) (9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})}{63.376}$$

$$k = \omega^2 m$$

$$= (2.742)^2 (0.1675 \text{ kg})$$

$$= 1.259 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2} \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}} \cdot \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{kg} \cdot \text{s}^2} = \frac{\text{kg}^2}{\text{s}^2}$$

Circuito CA LRC en serie



$$V = V_R + V_L + V_C$$

$$\begin{array}{l} V_L = I X_L \\ X_L = 2\pi f L \end{array} \quad \left| \quad \begin{array}{l} V_C = I X_C \\ X_C = \frac{1}{2\pi f C} \end{array} \right| \quad \left| \quad \begin{array}{l} V_R = I R \end{array} \right.$$

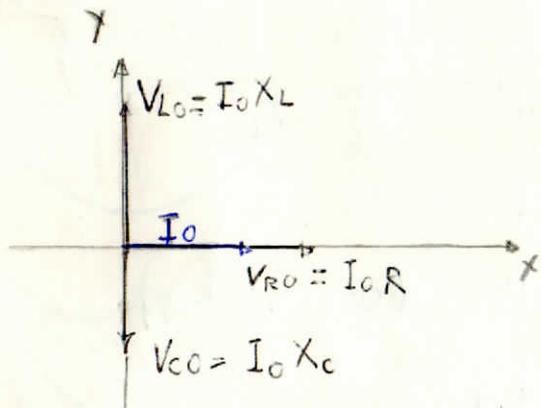
$t=0$

$$I = I_0 \cos 2\pi f t$$

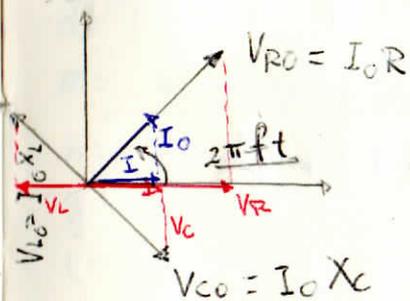
Diagrama de fasores:

$$V_{RO} = I_0 R, \quad V_{LO} = I_0 X_L \quad \text{y} \quad V_{CO} = I_0 X_C$$

$t=0$



$t \neq 0$



LRC

$$R = 198.5 \Omega$$

$$L = 12.54 \text{ mH}$$

$$C = 282.1 \text{ nF}$$

$$V_{0\text{rms}} = 0,728 \text{ [V]} \Rightarrow V_{\text{rms}} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} = \frac{0,728}{\sqrt{2}} = 0,5147 \text{ AC}$$

$$f = 115 \text{ [kHz]}$$

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi \left(115 \times 10^3 \frac{1}{\text{s}}\right) \left(12.54 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{s}\right)$$

$$X_L = 78.79 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \cdot \left(115 \times 10^3 \frac{1}{\text{s}}\right) \left(282.1 \times 10^{-9} \frac{\text{s}}{\Omega}\right)}$$

$$X_C = 564,18 \Omega - X_C = 37,1 \Omega$$

$$Z = \sqrt{(198.5 \Omega)^2 + (78.79 \Omega - 564,18 \Omega)^2}$$

$$= 524.45 \Omega$$

$$206.7 \Omega$$

$$I_{rms} = \frac{0.5147 V}{524.45 \Omega} = 0.98 \text{ mA}$$

$$\downarrow$$
$$2.55 \text{ mA}$$

- LR

$$I_{rms} = \frac{0.5147}{148.5} = 2.59 \text{ mA}$$



$$(V_R)_{rms} = 2.59 \text{ (V)}$$

$$(V_L)_{rms} = 2.7 \cdot 2549 \cdot 10^{-7} \text{ (V)}$$

$$(V_c)_{rms} = 0.5147 \text{ (V)}$$

$$P = 1.33 \text{ mW}$$

Potencia de la Vaca

$$d = 1.5 \text{ [m]}$$

$$E_p = mgh$$

$$m = b \text{ [kg]}$$

$$W = E_p \cdot d$$

$$h = a \text{ [m]}$$

$$P_v = \frac{W}{t}$$

$$g = 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

$$t = 2.5 \text{ [s]}$$

x  
x  
x

Esquema

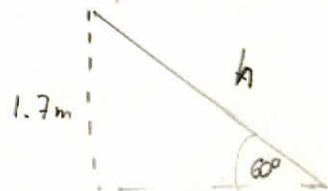


a)

$$\sin 60 = \frac{1.7}{h}$$

$$h = \frac{1.7}{\sin 60}$$

$$h = 1.963 \text{ [m]}$$



b) Cabeza  $\approx$  15 - 17% peso total

$$m_r = 600 \text{ [kg]}$$

$$\rightarrow 600 \rightarrow 100\%$$
$$x \quad 16\%$$

$$x = 96 \text{ [kg]}$$

$$\Rightarrow E_p = mgh = 96 \text{ [kg]} \cdot 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]} \cdot 0.10 \text{ [m]}$$
$$= 94.176 \text{ [W]}$$

$$\frac{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} = \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$$

$$P_v = \frac{E}{t_c} \quad \left\{ \begin{array}{l} t_{cyc} = 2.5 \text{ [s]} \\ \cdot \end{array} \right.$$

$$P_v = \frac{94.176}{2.5} \left[ \frac{\text{J}}{\text{s}} \right] = 37.6704 \text{ [W]}$$

$$\begin{aligned} * \eta_{\text{sist}} &= \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \\ &= \frac{1.2 \times 10^{-3}}{37.604} \end{aligned}$$

$$P_{\text{out}} = 1.2 \times 10^{-3}$$

$$\eta \approx 2\%$$

$$3.15 \times 10^{-3} \%$$

respecto al  
mov. de la vaca!

d. Ep. Gen.

$$m_g = 254.1 \text{ [g]} = 0.2541 \text{ [kg]}$$

$$\begin{aligned} E_{Pg} &= 0.2541 \text{ [kg]} \times 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]} \times 0.10 \text{ [m]} \\ &= 0.2492721 \text{ [J]} \end{aligned}$$

$$P_G = \frac{0.2492721}{2} \left[ \frac{\text{J}}{\text{s}} \right] = 0.0997 \text{ [W]}$$

$$\eta = \frac{1.2 \times 10^{-3}}{0.0997} = 1.20\%$$

$$\eta \approx 1.2\%$$

Ep.  
Gen

**Verificación del plan de pruebas**

Nº	Criterios de ingeniería	Consideraciones	Fecha			Verificación		Resultado
			DD	MM	AA	OK	Rev.	
1	Costo	Dentro del presupuesto	15	12	2021	✓	E.A	Costo menor a 600\$
2	Elasticidad	Propiedad del cuerpo sólido para no deformarse cuando se le aplica una fuerza	16	12	2021	✓	K.V	Soporta una carga de hasta 15.8kN antes de la fractura (1.6 Ton)
3	Hermeticidad de sólidos	Protección del equipo contra el ingreso de cuerpos sólidos extraños	15	12	2021	✓	J.S	Protección IP6X
4	Hermeticidad de líquidos	Protección contra la penetración de agua	15	12	2021	✓	J.A	Protección IPX5
5	Versatilidad	Capacidad de adaptarse con facilidad y rapidez a funciones	15	12	2021	✓	E.A	Tiempo de ensamble y colocación del prototipo 1min 30s
6	Resistencia al calor	Capacidad de resistir temperaturas elevadas	15	12	2021	✓	J.S	Temperatura de impresión 180°C
7	Durabilidad	Resistencia a golpes y caídas	15	12	2021	✓	E.A	Sin afecciones por caídas de 2m ni golpes

