



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Tecnológico de Pachuca

**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA PLATAFORMA DINÁMICA PARA LA  
EVALUACIÓN DE MATERIALES APLICADOS EN PALAS DE GENERADORES  
EÓLICOS**

**BAJO LA OPCIÓN:  
TESIS**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**PRESENTA:  
ING. ISAAC GODÍNEZ GIL**

**ASESOR:  
DR. ARMANDO ÍRVIN MARTÍNEZ PÉREZ**

**SINODALES:  
DR. HUGO FRANCISCO ABUNDIS FONG  
DR. LUIS GERARDO TRUJILLO FRANCO**

**Pachuca de Soto, Hgo. Septiembre 2022  
113 páginas**



Instituto Tecnológico de Pachuca  
ISO 9001:2015



**2022** *Ricardo*  
*Año de* **Magón**  
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA



**Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica  
ACTA**

Siendo las 13:00 horas del 19 de febrero de 2022, el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica manifiesta la APROBACIÓN del tema de Tesis: *Diseño y fabricación de una plataforma dinámica para la evaluación de materiales aplicados en palas de generadores eólicos*, con el siguiente contenido:

- Resumen/Abstract
- Nomenclatura
- Contenido
- Índice de cuadros, gráficas y figuras.
- 1- Introducción
- 2- Estado del arte
- 3- Marco teórico
- 4- Materiales y métodos
- 5- Resultados y discusión
- Conclusiones
- Bibliografía
- Apéndices

Para cubrir el requisito correspondiente a la Tesis para que el Ing. Isaac Godínez Gil obtenga el grado de Maestría en Ingeniería Mecánica, bajo la dirección del Dr. Armando Irvín Martínez Pérez y la codirección del Dr. Hugo Francisco Abundis Fong.

**ATENTAMENTE**

Exatención en Educación Tecnológica  
"El Nombre Afirmado al Ingeniero en Contacto con la Ciencia"

 <b>Dr. Ignacio Ramírez Vargas</b>	 <b>Dr. Juan Serrano Arellano</b>	 <b>Dr. Luis Manuel Palacios Pineda</b>
 <b>Dra. Erika Osiris Ávila Dávila</b>	 <b>Dr. Edgar Ernesto Vera Cárdenas</b>	 <b>Dra. Marisa Moreno Ríos</b>
 <b>Dr. Armando Irvín Martínez Pérez</b>	 <b>Dr. Francisco Noe Demesa</b>	 <b>Dr. Hugo Francisco Abundis Fong</b>



Carretera México - Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta C.P. 42080 Pachuca de Soto, Hidalgo.  
Tels. 771 713073, 771 713556, 771 713340, 771 715119 y 771 713559  
e-mail: depi@pachuca.techn.mx | tactnm.mx | pachuca.techn.mx

Carretera México - Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta C.P. 42080 Pachuca de Soto, Hidalgo.

Tels. 771 713073, 771 713556, 771 713340, 771 715119 y 771 713559

e-mail: depi@pachuca.techn.mx | tactnm.mx | pachuca.techn.mx



**2022 Flores**  
Mes de  
**Magón**



Pachuca, Hidalgo, **9/Septiembre/2022**  
OFICIO No. DEPI-0124-22

**C. ING. ISAAC GODÍNEZ CIL**  
**PRESENTE**

La que suscribo, jefa de la División de Estudios de Posgrado e Investigación, le comunica que los miembros de la Comisión Revisora, designada por el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica para examinar su Tesis:

**Diseño y fabricación de una plataforma  
dinámica para la evaluación de materiales  
aplicados en palas de generadores eólicos**

se han reunido, y después de intercambiar opiniones manifiestan su aprobación de la Tesis, en virtud que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes y, en consecuencia, se autoriza su impresión.

Sin otro particular por el momento, quedo de Usted.

**ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica  
El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia*



**M.A.C. ELODIA CLAUDIA GUERRERO ORTIZ**  
**JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

C.p. Archivo  
ECCO/LMPP



Carretera México - Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta C.P. 42083 Pachuca de Soto, Hidalgo.  
Tels. 771 7133073, 771 7133596, 771 7133140, 771 7133119 y 771 7133299  
e-mail: depi@pachuca.techn.mx | techn.mx | pachuca.techn.mx

Carretera México - Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta C.P. 42083 Pachuca de Soto, Hidalgo.  
Tels. 771 7133073, 771 7133596, 771 7133140, 771 7133119 y 771 7133299  
e-mail: depi@pachuca.techn.mx | techn.mx | pachuca.techn.mx



**2022 Flores  
de la Magaña**

## **DEDICATORIAS**

Dedico este trabajo principalmente a mi familia que ha sido fuente de inspiración y fortaleza, principalmente a mi hija Victoria que es el pilar más importante en mi vida, a mi mamá y hermanos que han creído en mí, impulsándome siempre a perseguir nuevas metas y conseguir mis objetivos.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi familia por el apoyo incondicional, por los valores que me han transmitido y por impulsarme siempre a alcanzar mis objetivos.

Agradezco al Dr. Luis Gerardo Trujillo Franco por todas sus aportaciones para el desarrollo y conclusión de este trabajo de tesis, así como por haber formado parte de mi comité tutorial.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca de posgrado que me asignaron.

A mis amigos que creyeron en mí y por su ayuda.

# CONTENIDO

DEDICATORIAS.....	I
AGRADECIMIENTOS.....	II
CONTENIDO.....	III
LISTA DE TABLAS.....	VI
LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE ECUACIONES.....	X
NOMENCLATURA.....	XI
RESUMEN.....	XIII
ABSTRACT.....	XIV
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	1
1.3. HIPÓTESIS.....	2
1.4. OBJETIVOS.....	2
1.4.1. Objetivo general.....	2
1.4.2. Objetivos específicos.....	2
2. ESTADO DEL ARTE.....	3
3. MARCO TEÓRICO.....	8
3.1. Generador eólico.....	8
3.2. Partes de un generador eólico.....	8
3.2.1. Generador no síncrono (alternador o generador de energía alterna).....	8
3.2.2. Sistema del rotor.....	9
3.2.3. Veleta.....	9
3.2.4. Torre.....	10
3.2.5. Álabes.....	10
3.3. Materiales compuestos.....	11
3.3.1. Proceso de hilado de fibras.....	12
3.3.2. Fibra de vidrio.....	13
3.3.3. Fibra de carbono.....	14
3.3.4. Polímeros.....	15

3.3.5. Matrices de materiales termoestables .....	16
3.3.6. Matrices comunes de materiales termoplásticos.....	17
3.3.7. Compuestos de fibra de carbono/matriz de carbono.....	19
3.4.    Fatiga.....	19
3.4.1. Diferentes fases en la vida de la fatiga .....	20
3.4.2. Iniciación de la grieta .....	20
3.4.3. Crecimiento de la grieta.....	20
3.5.    Flexibilidad .....	21
4.    MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
4.1.    Materiales .....	23
4.2.    Metodología de diseño .....	40
4.2.1. Revisión de patentes.....	40
4.2.2. Clarificación de los objetivos .....	41
4.2.3. Establecimiento de funciones.....	42
4.2.4. Especificación de requerimientos.....	42
4.2.5. Determinación de características .....	43
4.2.6. Generación de alternativas.....	43
4.2.7. Diseño conceptual.....	43
4.3.    Diseño a detalle .....	43
4.4.    Validación numérica del diseño.....	44
4.5.    Fabricación .....	44
4.5.1. Adquisición de materiales.....	44
4.5.2. Manufactura de piezas .....	44
4.5.3. Ensamble.....	44
4.6.    Desarrollo de sistemas electrónicos e instrumentación .....	44
4.6.1. Adquisición de sensores y actuadores.....	45
4.6.2. Programación de sensores y actuadores .....	45
4.6.3. Instrumentación de los sistemas eléctricos.....	45
4.7.    Desarrollo de instrumentación virtual .....	45
4.7.1. Programación de la adquisición y envío de datos .....	45
4.8.    Ensamble del sistema mecánico y electrónico .....	46

4.8.1. Revisar el funcionamiento .....	46
4.9. Pruebas de funcionamiento.....	46
4.9.1. Selección de materiales a evaluar.....	46
4.9.2. Preparación de las probetas .....	46
4.9.3. Reproducibilidad de las pruebas.....	46
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	47
5.1. Metodología de diseño de yugo escocés .....	47
5.1.1. Clarificación de objetivos.....	48
5.1.2. Establecimiento de funciones.....	49
5.1.3. Fijación de requerimientos .....	50
5.1.4. Determinación de características .....	51
5.1.5. Generación de alternativas.....	53
5.1.6. Evaluación de alternativas .....	55
5.1.7. Diseño conceptual.....	56
5.2. Cálculo de las frecuencias naturales .....	58
5.3. Análisis numérico de elementos mecánicos .....	72
5.4. Análisis numérico de la cámara de temperatura.....	77
5.5. Ensamble de la plataforma.....	85
5.6. Validación numérica y experimental del acrílico (PMMA). .....	87
5.7. Pruebas con cámara de temperatura. ....	92
6. CONCLUSIONES .....	95

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composiciones químicas aproximadas para algunos materiales de fibra de vidrio. ....	13
Tabla 2. Algunas características importantes de la epóxica. ....	17
Tabla 3. Propiedades representativas de algunas matrices de materiales poliméricas. ....	18
Tabla 4. Requerimientos sobre el diseño de un mecanismo de yugo escocés. ....	50
Tabla 5. Clasificación de requerimientos. ....	50
Tabla 6. 3 resistencias con orientación vertical. ....	80
Tabla 7. 6 resistencias con orientación vertical. ....	81
Tabla 8. 3 resistencias con orientación horizontal. ....	82
Tabla 9. 6 resistencias con orientación horizontal. ....	83

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Generador en una turbina eólica. ....	8
Figura 2. Rotor del aerogenerador. ....	9
Figura 3. Velea de un aerogenerador. ....	9
Figura 4. Torre de turbina eólica. ....	10
Figura 5. Palas de generador eólico a) álabes, b) fuerzas que interactúan con el álabe. ....	10
Figura 6. Materiales compuestos a) por partículas, b) por fibras, c) por laminas. ....	12
Figura 7. Estructura amorfa del vidrio: a) representación bidimensional de red del vidrio de silica. b) Una red modificada que resulta cuando Na <sub>2</sub> O es adicionada en a), note que Na <sup>+</sup> es un enlace iónico con O <sup>2-</sup> pero no se junta con la red directamente. ....	14
Figura 8. Estructura hexagonal de grafito: a) estructura de la capa gráfrica, b) las capas se muestran sin contacto para facilitar la visualización. ....	15
Figura 9. Estructura química de la resina epóxica. ....	16
Figura 10. Termoplásticos convencionales a) polipropileno, b) nylon, c) poliéster, d) policarbonato. ....	18
Figura 11. Motor DKM a) Reductor del motor, b) Motor. ....	23
Figura 12. Reductor de velocidad para el motor DKM. ....	23
Figura 13. Acoplamiento de elastómero a – b. ....	24
Figura 14. Balero de pared. ....	24
Figura 15. Balero de guías lineales con marco impresión 3D. ....	25
Figura 16. Guías lineales. ....	25
Figura 17. Eje para guías lineales. ....	26
Figura 18. Soportes para ejes de guías lineales. ....	26
Figura 19. Tornillo mini. ....	27
Figura 20. Ensamble final del carro para sujeción de probetas. ....	27
Figura 21. Eje conductor de velocidad angular a) Eje en SolidWorks, b) Eje real. ....	28
Figura 22. Disco (manivela) del mecanismo de yugo escocés a) Disco en SolidWorks, b) Disco real. ....	29
Figura 23. Perno excéntrico a) Perno en SolidWorks, b) Perno real. ....	29
Figura 24. Marco del acoplador a) Acoplador en SolidWorks, b) Acoplador real. ....	30
Figura 25. Eje de salida del acoplador a) Eje de salida en SolidWorks, b) Eje de salida real. ....	30
Figura 26. Caja de aluminio a) Sin componentes en su interior, b) Con componentes en su interior. ....	31
Figura 27. Carril guía de acoplador. ....	31
Figura 28. Marco de mesa de soporte. ....	32
Figura 29. Placa de acero. ....	32
Figura 30. Sujetador a) Desacoplado, b) Acoplado con el carro. ....	33
Figura 31. Base de cilindro del motor. ....	34
Figura 32. Soporte en cara recta del reductor. ....	34
Figura 33. Retén de acoplamiento. ....	35
Figura 34. Placa de aluminio. ....	36
Figura 35. Estructura de la cámara de calentamiento a) Vista isométrica, b) Vista superior. ....	37
Figura 36. Resistencia calefactora. ....	38
Figura 37. Controlador de temperatura. ....	38
Figura 38. Etapas de la metodología. ....	39
Figura 39. Plataforma del instituto mexicano de la propiedad industrial. ....	40
Figura 40. Plataforma de normas AENOR. ....	41
Figura 41. Diagrama de árbol de objetivos. ....	42

Figura 42. Árbol de objetivos.....	48
Figura 43. Establecimiento de funciones.....	49
Figura 44. Atributos del cliente y su valor. ....	51
Figura 45. Comparativa entre fabricantes.....	52
Figura 46. Matriz entre atributos del cliente y características de ingeniería. ....	53
Figura 47. Diagrama morfológico. ....	54
Figura 48. Evaluación de alternativas.....	55
Figura 49. Diseño conceptual al evaluar alternativas, vista isométrica.....	56
Figura 50. Vista lateral del diseño conceptual.....	56
Figura 51. Vista frontal del diseño conceptual. ....	57
Figura 52. Vista superior del diseño conceptual.....	57
Figura 53. Mecanismo de yugo escocés. ....	58
Figura 54. Valores obtenidos de desplazamiento, velocidad y aceleración a 200 rpm. ....	61
Figura 55. Posición del deslizador contra tiempo a 200 rpm. ....	62
Figura 56. Velocidad en el deslizador contra tiempo a 200 rpm.....	63
Figura 57. Aceleración en el deslizador contra tiempo a 200 rpm. ....	63
Figura 58. Valores obtenidos de desplazamiento, velocidad y aceleración a 3000 rpm. ....	65
Figura 59. Posición del deslizador contra tiempo a 3000 rpm. ....	66
Figura 60. Velocidad en el deslizador contra tiempo a 3000 rpm.....	66
Figura 61. Aceleración en el deslizador contra tiempo a 3000 rpm. ....	67
Figura 62. Frecuencias naturales y Hertz de probetas para fibra de vidrio. ....	69
Figura 63. Diferencia de valores entre secciones transversales diferentes.....	70
Figura 64. Frecuencias naturales y Hertz para probetas de fibra de carbono. ....	71
Figura 65. Diferencia de valores entre secciones transversales diferentes.....	72
Figura 66. Región de contacto entre el eje principal y el balero de pared.....	73
Figura 67. Esfuerzo equivalente de Von-Mises en eje conductor. ....	73
Figura 68. Deformación total máxima en el eje conductor. ....	74
Figura 69. Mallado y refinamiento en el disco y perno excéntrico. ....	74
Figura 70. Cargas a las que está sujeto el disco y perno excéntrico.....	75
Figura 71. Esfuerzo de Von – Mises en disco de yugo escocés. ....	75
Figura 72. Deformación máxima ubicada en el perno excéntrico.....	76
Figura 73. Esfuerzo de Von-Mises en eje de salida. ....	76
Figura 74. Deformación total máxima en el eje de salida. ....	77
Figura 75. Placa de aluminio a)3 resistencias orientación vertical, b)3 resistencias orientación horizontal, c) 6 resistencias orientación vertical y d) 6 resistencias orientación horizontal. ....	78
Figura 76. Tamaño de malla. ....	78
Figura 77. Condiciones de frontera. ....	79
Figura 78. Cámara de temperatura a) Vista isométrica, b) Vista de sección, c) Vista lateral derecha.....	84
Figura 79. Cámara de temperatura real. ....	85
Figura 80. Ensamble preliminar a) Componentes en SolidWorks, b) Componentes reales.....	86
Figura 81. Ensamble final a) Ensamble SolidWorks, b) Ensamble real.....	87
Figura 82. Probeta con altura de 0.5 metros. ....	88
Figura 83. Probeta con altura de 0.85 metros. ....	88
Figura 84. Probetas de acrílico a) Longitud de 0.5 m, b) Longitud de 0.85 m.....	89
Figura 85. Validación experimental de frecuencia natural.....	90
Figura 86. Respuesta en frecuencia de probeta de acrílico de 0.5 m.....	91
Figura 87. Respuesta en frecuencia de probeta de acrílico de 0.85 m.....	92

Figura 88. Controlador a temperatura de 100°C. ....	93
Figura 89. Respuesta a temperatura ambiente, a 80 °C y 100 °C.....	94

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Flexibilidad.....	21
Ecuación 2. Desplazamiento en el punto B.....	58
Ecuación 3. Velocidad del punto B.....	59
Ecuación 4. Aceleración del punto B.....	59
Ecuación 5. Rigidez.....	67
Ecuación 6. Momento de inercia.....	67
Ecuación 7. Masa.....	68
Ecuación 8. Frecuencia natural.....	68
Ecuación 9. Hertz.....	68

# NOMENCLATURA

## **LISTA DE ABREVIATURA**

## **RESUMEN**

Uno de los elementos más importantes de una turbina eólica son las palas, que representan un costo aproximado del 15% al 20% del total de la turbina y las cuales deben ser fabricadas de materiales compuestos debido a sus propiedades mecánicas. Las palas están sujetas a impactos, y también a cargas estáticas y dinámicas, estas últimas generan fatiga en el material, lo que provoca un periodo de iniciación y crecimiento de grietas que llevan al material hasta la falla. Es por esto, que este trabajo propone el diseño y la fabricación de una plataforma que evalúe dinámicamente los materiales compuestos en este caso fibra de vidrio y carbono, a partir de la identificación de sus vibraciones características, las cuales permitirán establecer las condiciones de funcionamiento de la plataforma, con la finalidad de identificar sus propiedades elásticas a diferente temperatura. Actualmente se reportan resultados en América y en Europa de este tipo de pruebas a temperatura ambiente (23-25 °C) ya que tienen una razón de crecimiento de generación de energía eólica del 20% - 30% por año registrada durante la última década, sin embargo, no consideran condiciones de temperatura menores o mayores, donde los materiales compuestos pueden presentar comportamiento dinámico distinto. Es importante mencionar que la plataforma no está restringida solo a materiales compuestos, tiene la capacidad de realizar pruebas de cualquier tipo de material.

## **ABSTRACT**

One of the most important elements of a wind turbine are the blades, which represent an approximate cost of 15% to 20% of the total value of the turbine, and which must be made of composite materials due to their mechanical properties. The blades are subject to impacts, static and dynamic loads too, latter these loads can generate fatigue on the material, which causes a period of initiation and growth of cracks that lead the material to the failure. For this reason, this work proposes the design and manufacture of a platform that dynamically evaluates the composite materials in this case glass fiber and carbon fiber, based on the identification of their vibrating characteristics, which will allow establish the operation conditions of the platform, in order to identify their elastic properties at different temperatures. Currently, results are reported in America and Europe of this type of test at room temperature (23 – 25 °C) since they have a rate growth of wind power generation of 20% - 30% per year registered during the last decade, however, they will not consider lower or higher temperature conditions, where the composite materials can present a different behavior. It is important to mention that the platform is not restricted to only composite materials, it has the ability to test any type of material.

# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Las pruebas que han sido reportadas en los análisis dinámicos realizados a los materiales utilizados para la fabricación de las palas en aerogeneradores se han llevado a cabo en condiciones de temperatura ambiente (23 a 25° C), cabe mencionar que los generadores eólicos se instalan en regiones con diferentes condiciones ambientales, por ejemplo, a altas temperaturas su comportamiento dinámico es distinto con respecto a otras regiones donde existan temperaturas menores. Es por esta razón, que se propone el diseño de esta plataforma de pruebas dinámicas con control de temperatura, la cual nos permitirá realizar el estudio de los materiales bajo distintas condiciones de temperatura, así como determinar posibles fallas.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN**

En la actualidad los ecosistemas se han visto afectados por la contaminación debido al alto consumo de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica, un hecho que ha generado un gran impacto al planeta con cambios climáticos no esperados. Por tal motivo, es necesaria la innovación y el desarrollo de fuentes de energías renovables, dentro de las cuales se encuentran los generadores eólicos (aerogeneradores ó turbinas de viento) que producen energía eléctrica a partir de un recurso natural, inagotable y no contaminante. Un tema de interés son los materiales utilizados para la fabricación de las palas de los generadores eólicos, que son el elemento que aprovecha la energía cinética del viento para producir un movimiento rotacional que permite la generación de la energía eléctrica. Recientemente se han utilizado materiales compuestos (fibra de vidrio, fibra de carbono y kevlar), por sus buenas propiedades mecánicas en las palas. Para determinar el comportamiento y los efectos de las palas ante las diferentes condiciones del viento, se realiza un análisis dinámico a temperatura ambiente (de 23 a 25°), el cual permite predecir la respuesta dinámica de una estructura cuando está rotando o las posibles fallas que se pueden presentar. Hasta el momento no se han reportado este tipo de estudios a diferentes condiciones de temperatura, lo que resulta importante debido a que los materiales compuestos utilizados tienen una matriz de resina epóxica o de poliéster, que presentan una temperatura de transición vítrea (reordenamiento de las cadenas poliméricas o punto intermedio de temperatura entre el estado fundido y el estado rígido) entre 80 y 120 °C. Los generadores eólicos son instalados en regiones óptimas con respecto al aprovechamiento del viento, pero se pueden presentar diferentes

condiciones de temperatura, por lo que, a temperaturas mayores a las del ambiente, se puede comportar mecánicamente diferente el material. Es por esto, que la fabricación de una plataforma de pruebas dinámicas con control de temperatura nos permitirá, a partir de los resultados obtenidos realizar una selección adecuada de los materiales con base a la región donde se instalara el generador eólico, con la finalidad de aumentar su eficiencia, el tiempo de vida y disminuir los costos por mantenimiento correctivo, ya que las palas de los generadores eólicos representan un costo aproximado del 15 – 20% del total de la turbina [1].

### **1.3. HIPÓTESIS**

La plataforma propuesta brindará información para determinar el comportamiento mecánico, debido a que, a diferentes temperaturas se presentarán diferentes conductas dinámicas a partir de las vibraciones. Esto permitirá determinar bajo qué condiciones de temperatura fallaran mecánicamente las palas fabricadas de diversos materiales compuestos.

### **1.4. OBJETIVOS**

#### **1.4.1. Objetivo general**

Diseñar y fabricar una plataforma de pruebas dinámicas a partir de vibraciones forzadas con control de temperatura, con la finalidad de determinar el comportamiento y posibles fallas de los materiales aplicados en las palas de los generadores eólicos ante diferentes condiciones de temperatura.

#### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Revisar el estado del arte, principalmente artículos científicos para confirmar la idea innovadora que representa el proyecto desarrollado en este trabajo de tesis.
- Diseñar la plataforma de pruebas dinámicas a partir de la metodología de diseño estructurada Nigel Cross para asegurar la fabricación de una plataforma funcional.
- Fabricar la plataforma de pruebas dinámicas a partir del diseño definitivo para confirmar su funcionalidad.
- Desarrollar los sistemas electrónicos utilizando plataformas programables, los cuales permitirán controlar las condiciones principales de funcionamiento.
- Ensamblar el sistema mecánico y electrónico para evaluar su operación y control de las condiciones de la plataforma.
- Validar el funcionamiento de la plataforma utilizando un material de referencia para revisar cada una de las condiciones de operación.

## 2. ESTADO DEL ARTE

Mariana Correa Álvarez y colaboradores demostraron en 2016 que las propiedades mecánicas permiten conocer las condiciones límite a las que el material está sujeto para definir el diseño estructural de la hoja de la turbina de viento. Su metodología fue a partir de la caracterización mecánica de la fibra de carbono generando una simulación aerodinámica utilizando dinámica de fluidos computacionales (CFD) de manera que obtuvieron la distribución de presión en el perfil de la pala.

Su trabajo está enfocado en dos tipos de materiales de fibra de carbono: fibra unidireccional (UD) y tela tejida. Los resultados generados se compararon con los valores obtenidos en condiciones similares de fabricación y prueba, porque en comparación con los métodos más complejos y automatizados, la posibilidad de defectos en la fabricación es más baja y las propiedades son más altas. Esta diferencia también es causada por el proceso de corte, errores, fabricación, etcétera [2].

Por otro lado J. Sabatier y colaboradores mostraron en su investigación en el año 2016 un sistema de anti hielo o anti deshielo para hojas de una turbina de viento con pintura conductora de electricidad aplicada en áreas de formación de hielo.

Basado en la temperatura medida por varios sensores ubicados en la hoja, el sistema de control se usó para prevenir el congelamiento durante la operación de la turbina. El voltaje aplicado sobre la pintura permitió el calentamiento.

Sus principales contribuciones son el comportamiento dinámico térmico de la hoja y el sistema de control térmico usando CRONE control, que es un control estratégico basado en diferenciación fraccional. El control CRONE es usado para tener en cuenta las perturbaciones generadas por factores como:

- Localización en la hoja del sensor utilizado en la alimentación.
- Espesor.
- Velocidad de rotación de la hoja.

La planta controlada enlaza las mediciones de la temperatura en la hoja en varios puntos o ubicaciones con un atenuador electrónico como entrada que suministra la pintura [3].

L. Mishnaevsky junto a su equipo de investigación mostraron en el 2017 que se debe de reducir el consumo de combustibles fósiles a partir de la expansión de la energía renovable, y enfocarlo particularmente en la energía eólica. Ellos mostraron que una de las partes más importantes de la turbina, como lo son las palas, deben ser fabricadas de materiales compuestos, dado que están sujetas a impacto combinado (el aire y sus partículas que impactan y erosionan el borde de ataque), y también a cargas cíclicas estáticas y dinámicas, enfatizaron en reducir cargas como la gravedad al usar materiales compuestos de polímeros de fibra reforzada.

No obstante, usar vidrio E y un material compuesto epóxico para su fabricación también ofrece reducción de costos en la fabricación de la turbina de viento.

Se mostró un listado de algunos materiales que sean amigables con el medio ambiente, no dejando de lado un bajo costo, que mejoraron la calidad de la pala, con mínimos defectos en su fabricación, resinas con un rápido curado a temperatura ambiente de manera que se reduce el tiempo de proceso [4].

En el 2019 Ismail H. Tuncer y sus colegas, obtuvieron una metodología exitosa para predecir la generación de hielo en álabes de la turbina de viento bajo condiciones atmosféricas de congelamiento y posteriormente la pérdida de producción de energía eléctrica.

Su estudio presentó un eficiente método numérico para desarrollar la investigación en el “momento del elemento del álabes”, BEM, por sus siglas en inglés (Blade element momentum), usando como herramienta XFOIL, un modelo de análisis en 2D que simula un flujo turbulento. Esta herramienta estimó la escarcha y aglomeración de formaciones de hielo, por lo tanto, es fácil de emplear para el diseño electro-térmico o para sistemas de flujo de aire caliente para deshielo [5].

B. Yang y D. Sun, presentaron las pruebas, inspecciones y monitoreo a las que se someten las aspas del aerogenerador, pruebas estáticas, de fatiga, análisis modal, ensayos no destructivos, monitoreo de estructura interna y condiciones son analizadas a detalle.

Las técnicas ofrecieron información respecto a las propiedades del material y se observaron diferentes defectos.

Se hizo énfasis en las pruebas e inspecciones dado que las aspas son los componentes más importantes del aerogenerador [6].

J. Ye y su equipo de trabajo realizaron el estudio generalizado de un modelo multi-escala con el cual se investigó la evolución del daño en una hoja. El modelo propuesto multi-escala incluye análisis microscópicos, laminares y estructurales.

El modelo de validación fue usado para simular la evolución de la hoja perteneciente a la turbina de viento a partir de un daño inicial. Los resultados numéricos revelaron que el daño en la matriz aparece primero en la raíz de la hoja en la parte superficial. Con un aumento adicional en la carga externa se notó que aparecen fallas en la matriz cerca del borde de ataque y en la parte más baja de la raíz de la hoja.

En el contexto de la escala microscópica se calcularon los esfuerzos, también se evaluó la rigidez laminar.

El modelado en 3D fue implementado en el software de diseño ANSYS y otro llamado LS – DYNA, de tal manera que la información obtenida se comparó con la información experimental, demostrando que la propuesta multi escala es adecuada para predecir las propiedades mecánicas de estructuras complejas de materiales compositos [7].

Por otra parte, de manera individual L. Mishnaevsky, realizó la investigación de la reparación de álabes de generadores eólicos como una tarea importante para desarrollos tecnológicos de la energía, esto es decisivo en el futuro de las energías renovables.

Es importante tomar en cuenta los desarrollos de reparación tecnológica que incluyen modelos computacionales de varios aspectos en la reparación de los álabes y se pueden usar como herramientas de base para la optimización. Se detalla una breve descripción de las técnicas de reparación para los álabes, el modelado computacional involucra técnicas como la degradación del generador y la formación de defectos que normalmente son a partir de las propiedades del material, flujo, distribución, formación y curado de los pegamentos que son alterados por la viscosidad, transiciones de fase, y sus propiedades estructurales.

Se muestra la degradación en los álabes causada por erosión en la superficie, agrietamiento, y delaminación, y sus procedimientos de reparación como parches de recubrimiento, inyección y curado de adhesivos, los cuales son controladas a partir de la geometría, por las propiedades mecánicas, distribución de esfuerzos, humedad y temperatura [8].

La influencia de la naturaleza del patrón de tejido del yute (material ecológico y biodegradable parecido al corcho) y el compuesto tejido de poliéster en mecánica dinámica y las vibraciones libres fueron analizadas por M. Rajesh. El efecto de hibridación por dentro de capas se logra al mantener la deformación y las direcciones en combinaciones diferentes que también se analizan en los compuestos tejidos por dentro de sus capas.

Los resultados revelan un tipo de tejido con forma de canasta, que tienen mejores propiedades dinámicas y una mayor temperatura de transición para los tejidos yute y tejidos compuestos.

También se observa que la forma del tejido y la hibridación por dentro de las capas reforzadas de fibras naturales mejora el almacenamiento sin disminuir las propiedades del módulo del compuesto comparados con los compuestos orientados con fibras cortas y aleatorias para la misma cantidad de carga de fibras.

Frecuencias de vibración libres y amortiguación del eje longitudinal como estructuras hechas de un tejido o hibridación por dentro de las capas compuestas muestran la variación del comportamiento dinámico con la naturaleza del tejido e hibridación por dentro de las capas [9].

R. K. Bhangale y N. Ganesan obtuvieron resultados en su investigación respecto al pandeo por la carga térmica y un análisis de vibración a partir de un análisis de elemento finito. Las conclusiones obtenidas en su estudio fueron las siguientes:

La magnitud de temperatura más baja del pandeo depende de la composición del compuesto metal – cerámico. La temperatura del pandeo depende del coeficiente de expansión térmica. Los materiales con un bajo coeficiente de expansión térmica presentan un pandeo mayor.

Al aumentar el radio entre el núcleo y la capa rígida, aumenta la temperatura de pandeo [10].

La energía eólica se ha desarrollado rápidamente durante las últimas dos décadas hasta convertirse en una de las más prometedoras y económicas fuentes viables de energía renovable. Sin embargo la energía eólica es llamada para proporcionar energía renovable libre de emisiones durante la operación. Las álabes, uno de los componentes más importantes en las turbinas eólicas, están hechas de materiales compuestos, que actualmente son materiales no reciclables, ya que no hay rutas de reciclaje industrial para estos componentes. Los materiales compuestos son de fabricación intensiva en energía y parte del material tiene un alto valor, lo que significa que tienen un gran

potencial de reciclaje en términos de las perspectivas ambientales y económicas. Los materiales compuestos representan más del 90% del peso en las álabes de las turbinas eólicas.

Se han realizado algunos estudios sobre diferentes aspectos de la ecología en la energía eólica. Para el volumen de desperdicio de álabes, Red estima cerca de 260,000 toneladas de material utilizado en la manufactura de las álabes de las turbinas en 2008 y este número se incrementará a 1.18 millones de toneladas en el 2017. [11]

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1. Generador eólico

La mayor parte de los generadores eólicos tienen las mismas partes básicas: álabes, ejes, engranes, generador, cabe mencionar que algunas turbinas no tienen caja de transmisión.

Estos componentes funcionan juntos para convertir la energía del viento en electricidad. Las turbinas de viento capturan la mayor energía dependiente en sus palas como hélices. Para aumentar la energía de conversión eficiente, el tamaño de las palas de la turbina de viento se vuelve más y más largas cuyo diámetro abarca rangos desde los 20 m hasta los 100 m o más [6].

#### 3.2. Partes de un generador eólico

##### 3.2.1. Generador no síncrono (alternador o generador de energía alterna)

El alternador es diseñado para cargar (almacenar) baterías (acumuladores). El alternador convierte la energía mecánica (rotacional) del rotor en electricidad (corriente alterna trifásica). Los imanes están en el rotor, permiten la supresión de los anillos y las escobillas para la conexión. A continuación se muestra una imagen (Figura 1) donde se puede ver donde se encuentra el alternador.

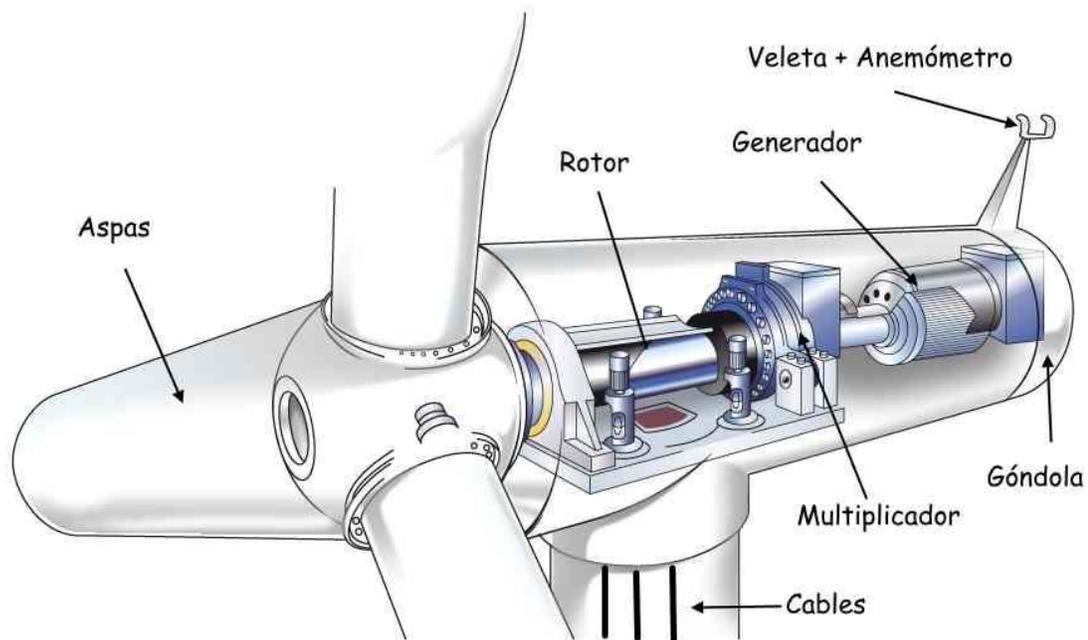


Figura 1. Generador en una turbina eólica.

### 3.2.2. Sistema del rotor

Permite la conversión eficiente del movimiento lineal del viento en movimiento de rotación del alternador. El rotor del aerogenerador se puede apreciar en la Figura 2.



Figura 2. Rotor del aerogenerador.

### 3.2.3. Veleta

Mantiene el rotor alineado con el viento, excepto cuando la velocidad del viento excede los límites de seguridad, cuando esto sucede, un sistema de articulación especial gira al rotor de lado al viento para limitar la velocidad alta de los vientos, y la turbina sigue produciendo energía. La veleta se muestra en la parte posterior de todo el aerogenerador en conjunto, como se observa en la Figura 3.

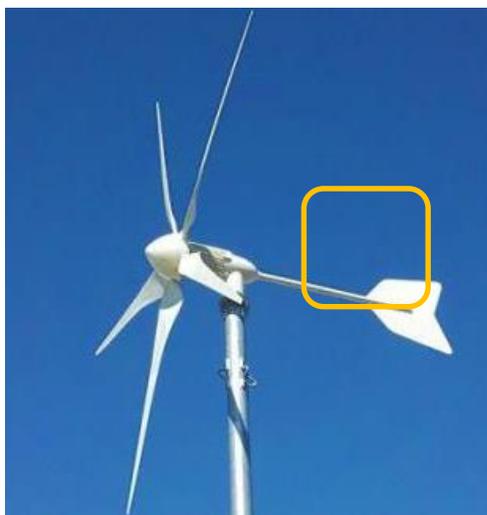


Figura 3. Veleta de un aerogenerador.

### 3.2.4. Torre

Es la columna que soporta la góndola, así como los componentes internos, debe soportar las cargas de empuje que transmite el rotor, así como las cargas que ejerce el viento a lo largo de ésta misma. Se debe considerar la frecuencia natural para que no entre en resonancia, esto va ligado con el material con el que se fabrica, la torre del aerogenerador se muestra a continuación, Figura 4.



Figura 4. Torre de turbina eólica.

### 3.2.5. Álabes

Las palas de las turbinas de viento están hechas de materiales anisotrópicos, los cuales usualmente están hechos de matrices poliméricas de materiales compuestos, en combinación con un monolito (capa simple) y compuestos entre paredes, en la Figura 5 se muestran las palas.

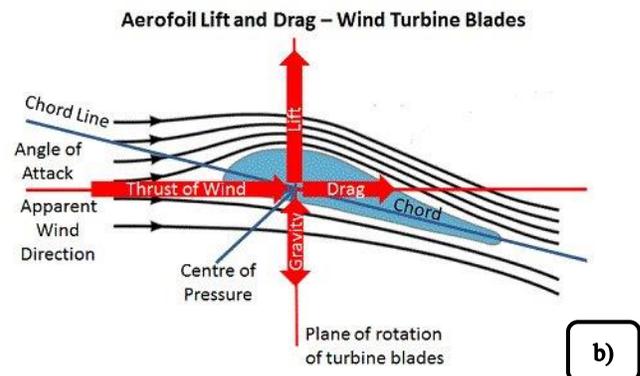


Figura 5. Palas de generador eólico a) álabes, b) fuerzas que interactúan con el álabe.

Los materiales de las palas afectan significativamente el rendimiento y las propiedades de éstas, tales como el peso, el mecanismo que pueda dañarlas, o la resistencia a la fatiga.

En la actualidad, los diseños están basados principalmente en compuestos de fibra de vidrio reforzado, pero para álabes muy largos los compuestos de fibra de carbón reforzado siguen incrementando su uso para reducir el peso. Las estructuras entre paredes pueden ser considerados un tipo especial de compuestos laminares y han ganado una amplia aceptación como manera de obtener componentes extremadamente ligeros y estructuras con gran rigidez a la flexión, alta resistencia, y buena resistencia al pandeo.

La localización y el peso son los principales factores para la eficiencia del sistema. El flujo laminar del viento sobre la superficie de la tierra es perturbado por muchos obstáculos y variaciones topográficas. Existen dos consecuencias: la velocidad del viento disminuye cerca de la superficie de la tierra y las turbulencias [12].

Las pruebas de propiedades mecánicas se llevan a cabo en componentes con una cara representativa y un proceso de rutas similares a las del álabe en cuestión. Las propiedades mecánicas son medidas bajo tensión, compresión y cargas de cizalladura, o combinaciones de estas mismas que incluyen mayoritariamente pruebas estáticas, pruebas de fatiga y pruebas modales. El propósito de las pruebas estáticas es verificar la capacidad para sostener una carga límite. Generalmente una carga segura es aplicada en una dirección predeterminada, y esta puede ser usada para probar su estabilidad al pandeo. La prueba de fatiga es llevada a cabo bajo cargas cíclicas, normalmente con una amplitud constante. El propósito fundamental de modelar la prueba de fatiga en las palas de la turbina es demostrar que la pala tiene la confiabilidad prescrita y vida de servicio. La prueba modal es un proceso para determinar los parámetros modales (frecuencias naturales, razones de amortiguamiento y formas modales) para la construcción, y es común usar un método para caracterizar las propiedades dinámicas del sistema mecánico [6].

### **3.3. Materiales compuestos**

Los materiales compuestos se obtienen a partir de la combinación de dos o más materiales, la cual puede presentar una unión química o no química. Estos materiales ofrecen la gran ventaja de un diseño flexible, es decir, se puede adaptar el material según las especificaciones de un diseño óptimo. Esta es una declaración mucho más poderosa de lo que podría parecer a primera impresión [13].

Los compuestos se pueden seleccionar para alcanzar combinaciones no usuales de rigidez, peso, desempeño a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad. En los compuestos son importantes las propiedades y fracciones volumétricas de cada fase individual; también es importante la conectividad de las fases. En general la fase matriz es la fase continua y la otra fase es la fase dispersa.

Los compuestos se pueden organizar en tres clases: con partículas, con fibras y laminares [14].

La Figura 6 muestra a los diferentes materiales compuestos.

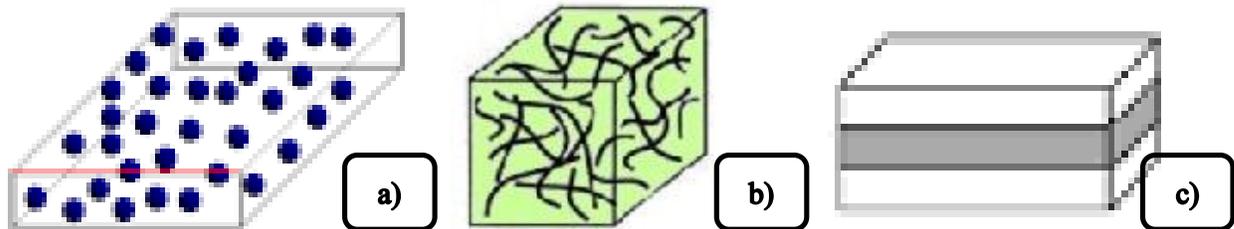


Figura 6. Materiales compuestos a) por partículas, b) por fibras, c) por laminas.

Dado el diseño más eficiente de una estructura aeroespacial, un automóvil, un barco o un motor eléctrico, se puede desarrollar un material compuesto que satisfaga la necesidad. Schier y Juergens (1983) examinaron el impacto del diseño de compuestos en aviones de combate. Acorde a estos autores, “los compuestos tienen una extraordinaria fluidez en la ingeniería de diseño, lo que obligó al diseñador-analista crear un material diferente para cada aplicación a medida que persigue ahorros en el peso y costo” [13].

Entre las funciones estructurales más importantes de un sistema de materiales compuestos se encuentran la rigidez, resistencia, tenacidad a la fractura, ductilidad, resistencia a la fatiga, absorción de energía, amortiguación y estabilidad térmica [15].

### 3.3.1. Proceso de hilado de fibras

El hilado de fibras es un proceso que consiste en extruir un líquido a través de pequeños agujeros o hileras para formar filamentos sólidos. Naturalmente, el gusano de seda y las arañas producen filamentos a partir de este proceso. Existen una gran variedad diferente de técnicas de hilado de fibras; algunas de las más importantes se muestran a continuación:

Hilado Húmedo.- Una solución es extruida dentro de un baño coagulante. Los chorros de líquido congelado o endurecido en el baño coagulante tienen como resultado cambios físicos o químicos.

Hilado en seco.- Una solución que consiste en un material formado de fibras y un solvente que son extruidos a través de una hilera. Una corriente de aire caliente afecta a los chorros de la solución emergente de la hilera, el solvente se evapora y solo quedan los filamentos sólidos.

Hilado de fundición.- El material formado de fibras es calentado por encima de su punto de fusión, y el material fundido es extruido a través de la hilera. Los chorros de líquido se endurecen hasta convertirse en filamentos sólidos al emerger de la hilera.

Hilado seco-húmedo.- Es un proceso especial diseñado para el hilado de fibras de arámdia. En éste proceso una solución de cristal líquido de polímero es extruida a través de los agujeros de la hilera, pasan a través de un espacio con aire antes de entrar a un baño de coagulación para posteriormente enrollarse en un carrete.

### 3.3.2. Fibra de vidrio

Este tipo de materiales compuestos comúnmente están hechos a base de sílice (50-60% SiO<sub>2</sub>) y contienen algunos otros óxidos de calcio, boro, sodio, aluminio, y hierro. La Tabla 1 muestra las composiciones de algunos comúnmente usados en fibras de vidrio.

En la siguiente tabla se muestran las composiciones químicas de algunos materiales de fibras de vidrio convencionales, así como también la estructura cristalina de la red del vidrio de sílica y una red modificada de este mismo.

Tabla 1. Composiciones químicas aproximadas para algunos materiales de fibra de vidrio.

Composición	Vidrio E	Vidrio C	Vidrio S
SiO <sub>2</sub>	55.2	65	65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8	4	25
CaO	18.7	14	-
MgO	4.6	3	10
Na <sub>2</sub> O	0.3	8.5	0.3
K <sub>2</sub> O	0.2	-	-
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.3	5	-

La letra E significa que el vidrio E es un buen aislante eléctrico, además de tener buena resistencia y un módulo de Young razonable; C significa corrosión, el vidrio C ofrece una mejor resistencia a

la corrosión química; S significa el alto contenido de sílice lo que hace que el vidrio S resista temperaturas altas, a continuación se muestra la Figura 7, donde se aprecia la estructura amorfa del vidrio, a base de sílica y una red modificada.

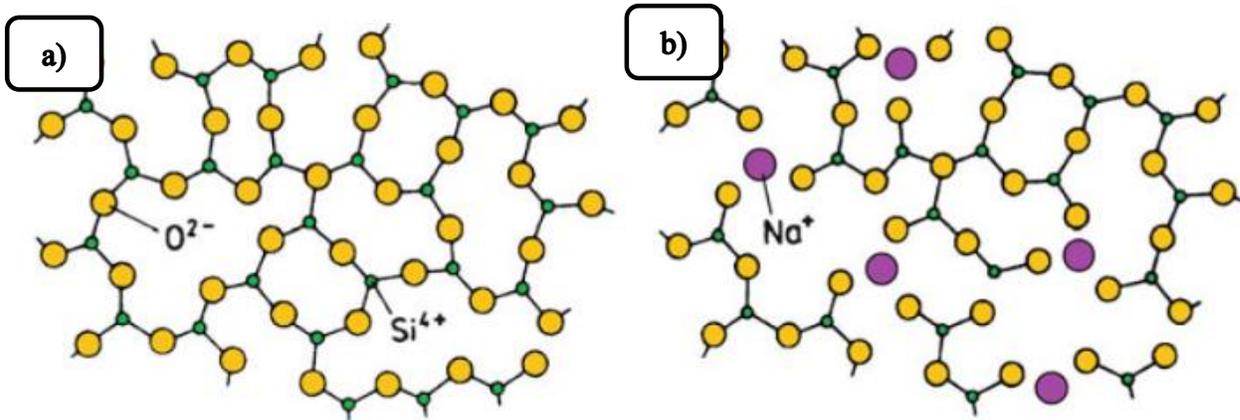


Figura 7. Estructura amorfa del vidrio: a) representación bidimensional de red del vidrio de sílica. b) Una red modificada que resulta cuando Na<sub>2</sub>O es adicionada en a), note que Na<sup>+</sup> es un enlace iónico con O<sup>2-</sup> pero no se junta con la red directamente.

### 3.3.3. Fibra de carbono

El Carbono es un elemento muy ligero con una densidad equivalente a 2.268 g/cm<sup>3</sup>. El carbono existe en una variedad de formas cristalinas. Es de interés el de estructura gráfica donde los átomos de carbono están arreglados en patrones hexagonales como se puede ver en la Figura 8. La otra forma conocida del carbono es la estructura de diamante covalente donde los átomos de carbono están arreglados en una configuración tridimensional con poca estructura flexible. El carbono en su forma gráfica es altamente anisotrópico, los enlaces de alta resistencia entre los átomos de carbono en el plano de la capa dan como resultado un módulo de Young alto mientras que en los enlaces tipo Van der Waals presentan un enlace más débil y resulta un módulo más bajo en esa dirección. Las fibras de carbono con un alto módulo de Young pueden ser hechas por carbonización de fibras orgánicas precursoras seguidas de la grafitización a altas temperaturas.

Gran parte de los procesos de fabricación de fibra de carbono se engloban en los siguientes enunciados:

Un procedimiento de fibrización para hacer fibra precursora. Esto generalmente implica mojado-secado hilado en seco o fundido, seguido de un estiramiento.

Un tratamiento de estabilización que previene que la fibra se derrita de manera posterior a tratamientos con temperaturas altas.

Un tratamiento térmico llamado carbonización que remueve la mayoría de los elementos no carbonatados.

Un tratamiento térmico llamado grafitización que mejora las propiedades de la fibra de carbono obtenidas en el paso anterior.

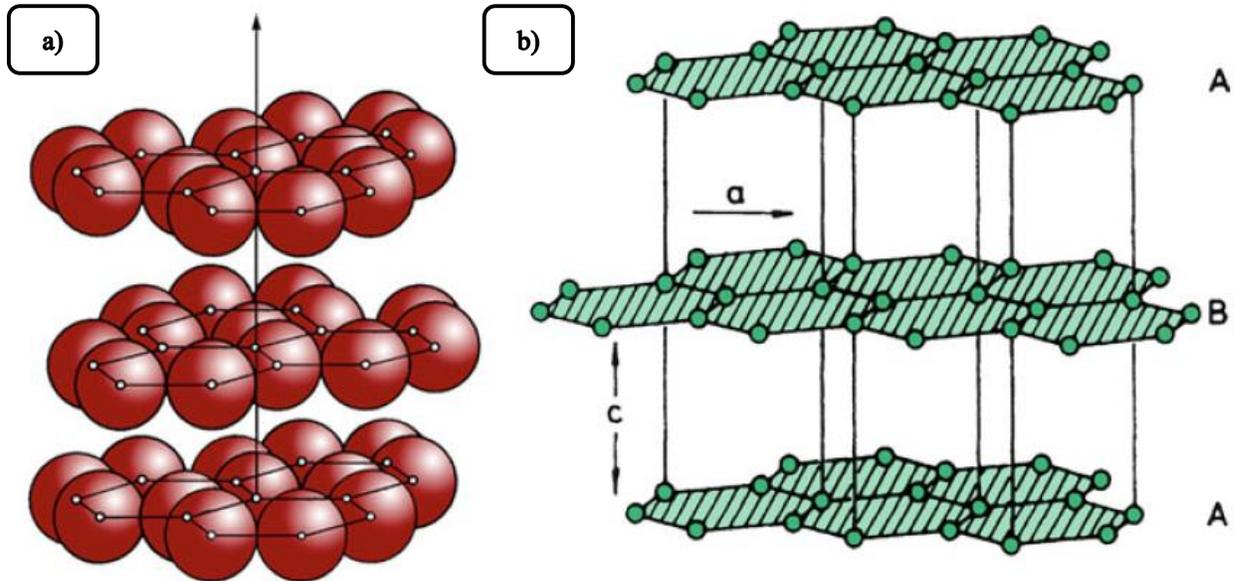


Figura 8. Estructura hexagonal de grafito: a) estructura de la capa gráfitica, b) las capas se muestran sin contacto para facilitar la visualización.

#### 3.3.4. Polímeros

Son baratos y fácilmente pueden ser procesados. Los polímeros tienen una baja resistencia y módulo elástico, y bajos límites de temperatura. A una exposición prolongada a la luz ultravioleta y a algunos solventes pueden causar la degradación de sus propiedades. Los polímeros generalmente son pobres conductores del calor y de la electricidad. Sin embargo, son más resistentes a los químicos que a los metales. Estructuralmente, los polímeros son grandes moléculas en forma de cadenas (macromoléculas). El proceso de formar moléculas grandes a partir de moléculas pequeñas se llama polimerización, esto es, el proceso de unir muchos monómeros, bloques de construcción básicos, para formar polímeros. Hay 2 clases importantes de polimerización:

Condensación por polimerización, en este proceso una reacción gradual de moléculas ocurre y en cada paso una molécula simple se conforma, generalmente se forma agua como subproducto.

Polimerización por adición, en este proceso los monómeros se unen para formar un polímero sin producir algún otro subproducto, la polimerización por adición ocurre generalmente en presencia de catalizadores. La adición lineal de moléculas de etileno (CH<sub>2</sub>) resulta en polietileno (una cadena de moléculas de etileno) con la masa final del polímero siendo la suma de las masas de los monómeros.

### 3.3.5. Matrices de materiales termoestables

Entre las más comunes matrices de polímeros usadas con fibras continuas están el poliéster y las resinas epóxicas.

Epóxicas.- Este es un polímero que contiene un grupo epóxido (1 átomo de oxígeno y 2 átomos de carbono) en su estructura química. Frecuentemente se usan varios aditivos para modificar las características de los epóxicos, por ejemplo, los diluyentes son usados para reducir la viscosidad. Agentes flexibilizadores son usados para volver a la epóxica flexible, otros agentes son usados para protección contra radiación ultravioleta, los agentes de curado son compuestos orgánicos de aminoácidos o ácidos y la articulación es obtenida introduciendo químicos que reaccionan con los grupos epóxicos e hidróxidos entre las cadenas adyacentes. Su estructura química es la que se muestra en la siguiente imagen, Figura 9.

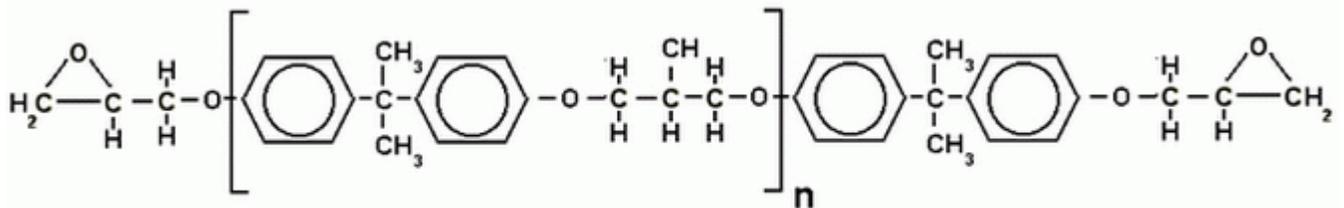


Figura 9. Estructura química de la resina epóxica.

Las resinas epóxicas son más costosas que el poliéster, pero tienen mejor resistencia a la humedad, baja contracción en el proceso de curado (cerca de un 3%), una temperatura máxima de uso más alta, una buena adhesión con las fibras de vidrio. Las matrices de resinas epóxicas fueron originalmente formuladas para resistir un servicio prolongado de 180°C (~350 °F). En la Tabla 2 se muestran algunas propiedades de la epóxica.

*Tabla 2. Algunas características importantes de la epóxica.*

Densidad, $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Resistencia, $\sigma$ (MPa)	Modulo, E (Gpa)	Razón de Poisson, $\nu$	CTE, $\alpha$ (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	Contracción de curado (%)	Temperatura de uso (°C)
1.2-1.3	50-125	2.5-4	0.2-0.33	50-100	1-5	150

### 3.3.6. Matrices comunes de materiales termoplásticos

Los termoplásticos están caracterizados por cadenas moleculares lineales y pueden ser repetidamente derretidas o reprocesadas. Es importante notar que el tiempo de enfriamiento afecta el grado de cristalinidad del termoplástico. Esto es porque las cadenas del polímero necesitan tiempo para estar organizadas en el patrón ordenado del estado cristalino; una razón de enfriamiento demasiado rápida no permitirá que la cristalización ocurra. Las moléculas lineales en un termoplástico dan como resultado valores de deformación hasta la falla más altos en comparación con los termoestables, los termoplásticos son más resistentes que los termoestables.

Los materiales termoplásticos pueden tener tensiones de falla que varían entre un 30 y 100%, mientras que los termoestables suelen oscilar entre un 1 y 3 %, el rango de deformaciones de falla en los termoplásticos se deriva de las variaciones bastante grandes en la cantidad de cristalinidad.

Las resinas comunes termoplásticas usadas como matrices en materiales compuestos incluyen algunos termoplásticos convencionales como el polipropileno, nylon, poliéster termoplástico (PET PBT), y policarbonatos, los cuales se muestran en la Figura 10.

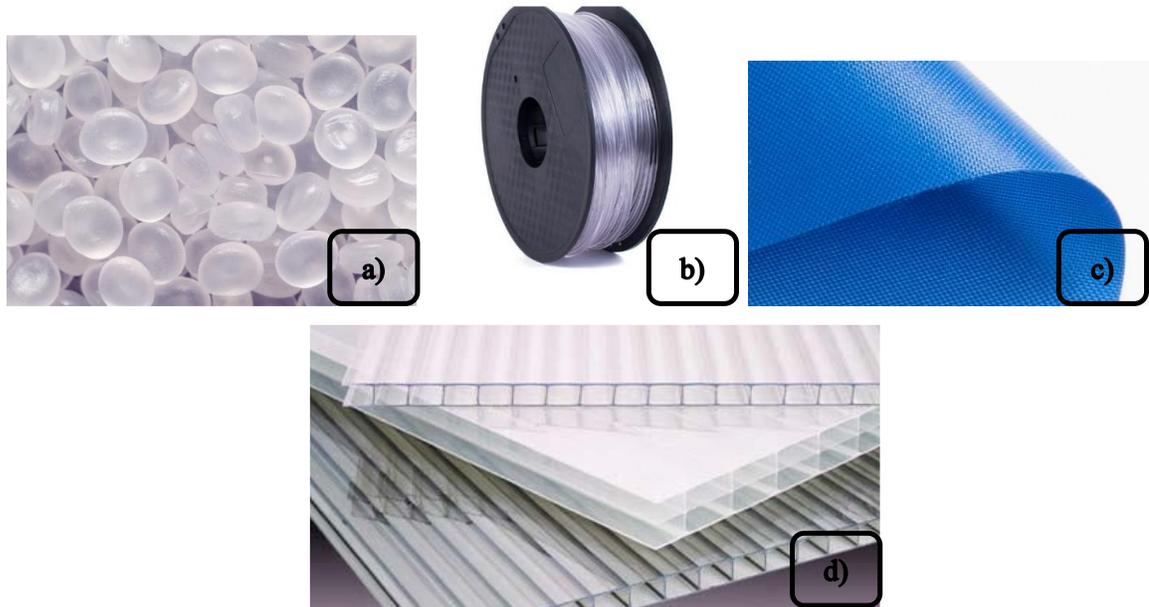


Figura 10. Termoplásticos convencionales a) polipropileno, b) nylon, c) poliéster, d) policarbonato.

En la Tabla 3 se muestran algunas propiedades como la resistencia a la tensión, el módulo a la flexión, densidad, temperatura de servicio continuo, coeficiente de expansión térmico y la absorción de agua de algunas matrices poliméricas.

Tabla 3. Propiedades representativas de algunas matrices de materiales poliméricas.

Propiedad	Epóxica	Poliamida	PEEK	Poliamidaimida	Polieterimida	Polisulfona	Polipropileno de sulfuro	Fenólica
Resistencia a la tensión (Mpa)	35-85	120	92	95	105	75	70	50-55
Módulo a la flexión (Mpa)	15-35	35	40	50	35	28	40	-
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.38	1.46	1.3	1.38	-	1.25	1.32	1.3
Temperatura de servicio continuo (°C)	25-85	260-425	310	-	170	175-190	260	150-175
Coefficiente de expansión térmica (10 <sup>-5</sup> °C <sup>-1</sup> )	8-11	9	-	6.3	5.6	9.4-10	9.9	4.5-11
Absorción de agua (24 h %)	0.1	0.3	0.1	0.3	0.25	0.2	0.2	0.1-0.2

### **3.3.7. Compuestos de fibra de carbono/matriz de carbono**

El carbono es un material versátil. Existe en una variedad de formas; amorfo, grafito, diamante, fulerenos, grafeno, nanotubos, etc. A continuación, se muestran algunas características de algunas formas importantes del carbono:

Diamante.- el carbono en forma de diamante tiene una estructura FCC, cada átomo C esta covalentemente unido a 4 átomos de carbono en los vértices de un tetraedro, el carbono en forma de diamante tiene propiedades isotrópicas, es uno de los materiales más duros.

Grafito.- El carbono en forma de grafito tiene una estructura hexagonal, los átomos están arreglados en capas, el enlace entre los átomos en el plano de la capa es covalente pero el enlace entre las capas es débil, es un enlace de tipo Van der Waals, esta diferencia entre los enlaces en diferentes direcciones hacen que el grafito sea altamente anisotrópico.

Grafito pirolítico.- Es producido a partir de una fase gaseosa vía pirolisis de hidrocarburos, esta resulta en carbono, que es depositada en un sustrato caliente, el grafito pirolítico tiene una alta estructura orientada y de esta forma es altamente anisotrópico.

Carbono negro.- es un término genérico dado para el polvo de carbono de un tamaño extremadamente fino (rango en nm) y una superficie de área muy alta. Es en esencia carbono elemental (>97%), conductor eléctrico y tiene un uso extensivo como refuerzo en neumáticos y otros productos de caucho, así como en tintas e impresión.

Nanotubos de carbono.- Son huecos, son tubos cilíndricos de átomos de carbono con diámetro en un rango entre 5-20 nm, frecuentemente se refieren a ellos como CNTs, estos muestran propiedades inusuales tales como rigidez extremadamente alta y resistencia [13].

### **3.4. Fatiga**

La vida de la fatiga esta usualmente dividida en el periodo de iniciación de la grieta y el periodo de crecimiento de la grieta. En el periodo de iniciación se supone algún crecimiento de micro fisuras, las grietas por fatiga son muy pequeñas para ser visibles en este periodo. En el segundo periodo, la grieta está creciendo hasta la falla completa. Los tipos de equipos utilizados para el ensayo de fatiga por flexión rotativa son acorde a la norma DIN50113-1982 e ISO 1143-2010 y sirven para determinar propiedades de resistencia a la flexión utilizando probetas redondas con carga rotativa, al estar rotando la probeta está sujeta a la carga alternante, los esfuerzos de tensión ocurren propiamente en las fibras más alejadas, es decir, en la superficie de la probeta.

### **3.4.1. Diferentes fases en la vida de la fatiga**

El límite de la fatiga es el nivel de esfuerzo cíclico por debajo del cual una falla no debe ocurrir. Después de que la microfisura ha sido nucleada, el crecimiento de la grieta aún puede ser un proceso lento y errático, debido a los efectos de las microestructuras. Ambientes corrosivos pueden afectar la iniciación y el crecimiento de la grieta, pero de una manera diferente para los dos periodos.

### **3.4.2. Iniciación de la grieta**

La iniciación y el crecimiento de las grietas por fatiga son una consecuencia del deslizamiento cíclico, esto implica actividades de dislocación, la deformación plástica está limitada a un número pequeño de granos del material.

El deslizamiento cíclico requiere un esfuerzo cortante cíclico. En la micro escala el esfuerzo cortante no está distribuido homogéneamente a través del material, el esfuerzo cortante en los planos de deslizamiento cristalográficos difiere de un grano a otro, dependiendo de la forma y tamaño y forma de los granos, y de la anisotropía elástica del material.

### **3.4.3. Crecimiento de la grieta**

Siempre que el tamaño de la microfisura sea del orden de un solo grano, la microfisura está presente en un material elásticamente anisotrópico con una estructura cristalina y un número de sistemas diferente de deslizamiento. La microfisura contribuye a una distribución de tensión no homogénea a un micro nivel, con una concentración de esfuerzos en la punta de la fisura, como resultado, más de un sistema de deslizamiento puede ser activado.

El crecimiento de la fisura es dependiente de la plasticidad cíclica, barreras de deslizamiento que puedan implicar un umbral para su crecimiento. La dirección del crecimiento de la fisura se desviará de la orientación inicial de la banda de deslizamiento [16].

En la mayoría de los sistemas mecánicos y estructuras, la vibración es indeseada e incluso destructiva. La vibración inducida por el viento y terremotos medianos inducen vibración que pueden causar fracturas y roturas.

La vibración es el estudio repetitivo de movimientos de objetos relativos a un cuadro estacionario de referencia o posición nominal (usualmente equilibrados).

La excitación armónica se refiere a una fuerza externa sinusoidal de frecuencia simple aplicada a un sistema.

La resonancia es el fenómeno dinámico en que la respuesta del sistema crece indefinidamente en función del tiempo y se debe a que la frecuencia de excitación coincide con la frecuencia natural del sistema que está vibrando.

Las excitaciones armónicas son una fuente muy común de fuerzas externas aplicadas en máquinas y estructuras. Maquinas rotatorias, motores eléctricos, y maquinas reciprocantes transmiten una fuerza sinusoidal variante a los componentes adyacentes. Desde que las ecuaciones de movimiento son consideradas como lineales, sabemos que las respuestas en términos individuales en las series permiten que la respuesta total sea representada como la suma de la respuesta de los términos independientes [17].

En el diseño de una turbina de viento, el análisis de vibración lineal de una pala de un aerogenerador debe ser realizado para obtener las características vibratorias y con esto, evadir la resonancia estructural.

Cuando las palas giran, su rigidez cambia debido al estiramiento causado por las fuerzas de inercia centrífuga [18].

### **3.5. Flexibilidad**

Se encuentra en función de su rigidez elástica y sus dimensiones de la sección transversal. Intuitivamente, uno puede fácilmente visualizar que cuanto mayor sea la rigidez del material, menos flexible será éste. A continuación, se muestra la ecuación de flexibilidad:

De resistencia de los materiales, tenemos la siguiente ecuación (1) para una viga doblada un radio R; [13]

$$Flexibilidad = \frac{1}{MR} = \frac{64}{E \pi D^4}$$

*Ecuación 1. Flexibilidad*

donde D es el diámetro equivalente, M es el momento de flexión, R es el radio que va a ser doblado, MR se define como la rigidez a la flexión para una flexión elástica en una viga. Se pueden asumir implicaciones importantes para la ecuación mostrada, tales como:

La flexibilidad de una fibra es una función sensible respecto a su diámetro.

Dado un diámetro suficientemente pequeño, es posible producir, en principio, una fibra tan flexible como un polímero, un metal o un material cerámico.

Se pueden hacer fibras muy flexibles a partir de materiales como el vidrio, carburo de silicio, alúmina, etc. Siempre que se pueda dar forma a estos materiales en una fibra de diámetro fino.

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS.

### 4.1. Materiales

En general, los materiales utilizados para la fabricación de las diferentes piezas requeridas para el desarrollo del prototipo fueron acero 4143, acero 4140, PLA, placa de aluminio y aluminio estructural de 4 x 4 cm.

Dentro de los equipos o elementos que se adquirieron esta un motorreductor, es decir, a pesar de parecer una sola pieza ensamblada, como el que se muestra en la Figura 11, hay que distinguir que hay un reductor y un motor.

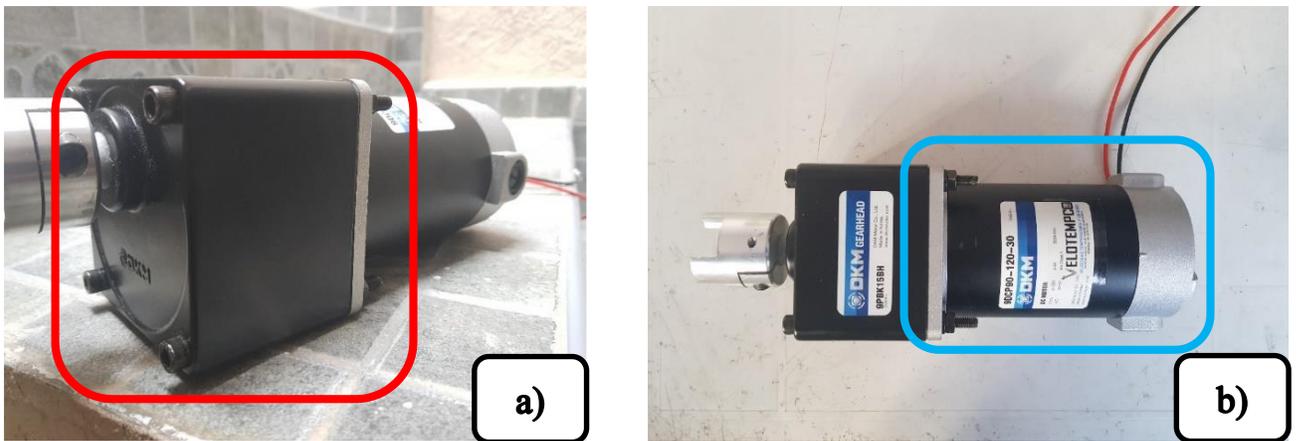


Figura 11. Motor DKM a) Reductor del motor, b) Motor.

Éste motor está conectado a un reductor de velocidad (potenciometro), el cual, como su nombre lo dice, tiene la función de reducir la velocidad angular máxima que posee el motor, para variar la velocidad en la salida del reductor, en otras palabras, una perilla donde se puede ir del máximo hasta el mínimo y viceversa, la Figura 12 muestra al reductor de velocidad.



Figura 12. Reductor de velocidad para el motor DKM.

Se adquirió un acoplamiento de elastómero tipo a – b, esto quiere decir que, un diámetro es mayor que otro, en resumen, para diámetros diferentes, el eje saliente del motorreductor tiene un diámetro de 15.2 mm y el eje conductor tiene un diámetro de 12.7 mm, la Figura 13 muestra la imagen real del acoplamiento de elastómero.



*Figura 13. Acoplamiento de elastómero a – b.*

Resulta conveniente mencionar que para soportar al eje conductor se utilizó un balero de pared como el que se muestra en la Figura 14, el cual se empotra al depósito de lubricante por medio de tornillería convencional.



*Figura 14. Balero de pared.*

Se utilizó un balero de guías lineales, para soportar al eje saliente del acoplador, estos baleros de guías lineales tienen la característica de proveer un buen ajuste con respecto al eje que pasa a través de ellos, reduciendo la fricción, evitando que los elementos se sobrecalienten entre sí, con ayuda de una impresora 3D se hizo el marco (cuadro blanco) para sujetar dicho elemento mostrado en la Figura 15.



*Figura 15. Balero de guías lineales con marco impresión 3D.*

Para soportar la placa donde se ubica la probeta de sección rectangular, se usaron guías lineales, como se mencionó anteriormente, estos elementos reducen considerablemente la fricción, las guías lineales se muestran en la Figura 16.



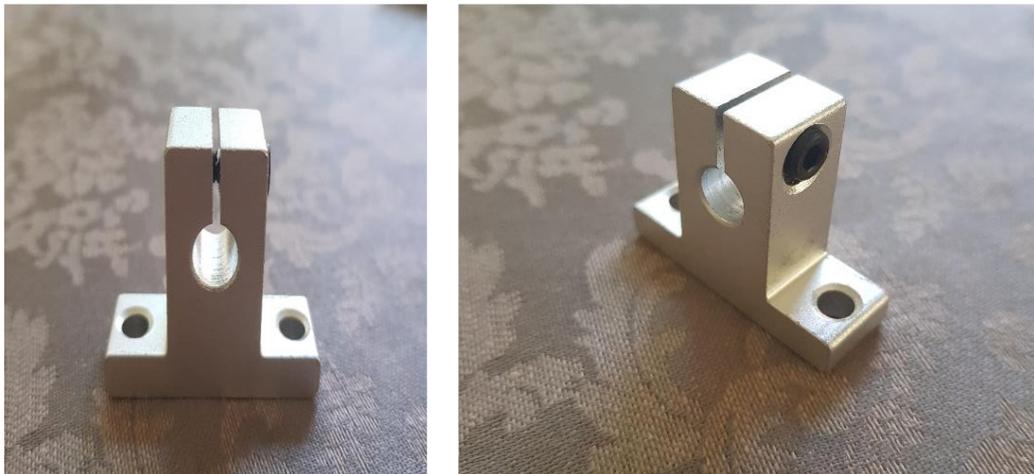
*Figura 16. Guías lineales.*

A través de estas guías lineales pasan sus respectivos ejes, los cuáles son de acero, la Figura 17 muestra un eje de longitud de 40 cm, que para términos prácticos se cortó por la mitad para obtener 2 de la misma longitud, resultando en 2 ejes de 20 cm cada uno.



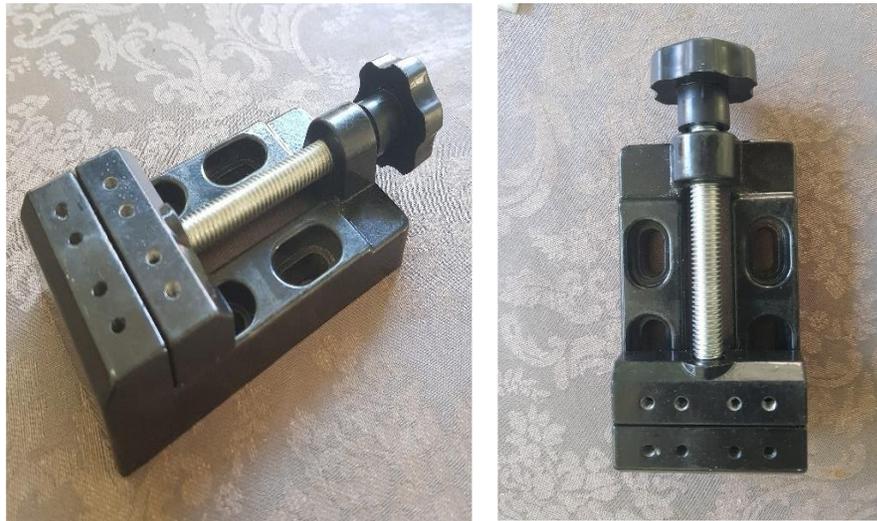
*Figura 17. Eje para guías lineales.*

Estos ejes se soportan por medio de los siguientes elementos mostrados en la Figura 18, de igual manera poseen el diámetro adecuado para que el eje pase a través de ellos y quede fijo este acoplamiento sin que se desarmen por los movimientos ocasionados por la vibración.



*Figura 18. Soportes para ejes de guías lineales.*

Para sujetar la probeta se utilizó un tornillo mini, a partir del cual se sujeta la probeta sin riesgo a que se salga de su lugar golpeando la cámara de calentamiento que posteriormente se mostrará, el tornillo es el que se muestra en la Figura 19.



*Figura 19. Tornillo mini.*

El ensamble donde la probeta estará sujeta para realizar pruebas se muestra a continuación en la Figura 20.



*Figura 20. Ensamble final del carro para sujeción de probetas.*

Se observan algunos elementos como los soportes, los ejes el tornillo mini, la plaza como base, donde las guías lineales se encuentran por la parte de abajo.

Es importante mencionar que algunos componentes también se dibujaron en SolidWorks, los cuales fueron los elementos que se maquinaron.

El eje conductor tiene la función de ensamblar al acoplamiento de elastómero con el disco que pertenece al mecanismo de yugo escocés, en uno de sus extremos tiene la forma adecuada para introducir una cuña y hacer un acople a presión, como se muestra a continuación en la Figura 21 donde se muestra la pieza dibujada en SolidWorks junto a la imagen real del elemento.

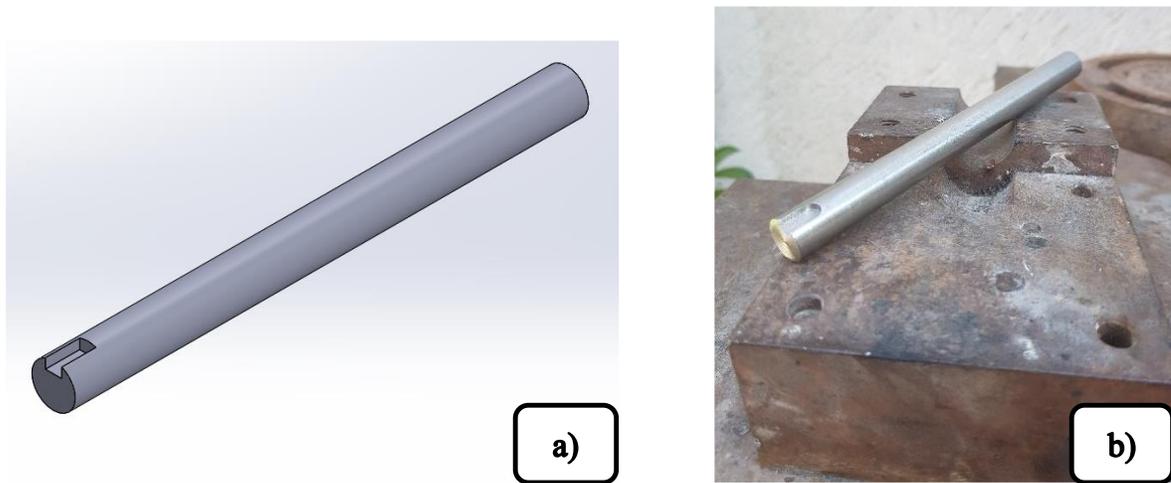


Figura 21. Eje conductor de velocidad angular a) Eje en SolidWorks, b) Eje real.

La velocidad angular se transfiere desde el eje conductor hasta el disco del yugo escocés, el cual hace la función de actuar como manivela de un mecanismo de cuatro barras, este disco posee una distancia entre su centro y el centro de un barreno con cuerda interna donde se acopla el excéntrico, no dejemos de lado la geometría donde entra la cuña a presión para unir al eje conductor, la Figura 22 muestra estas características.

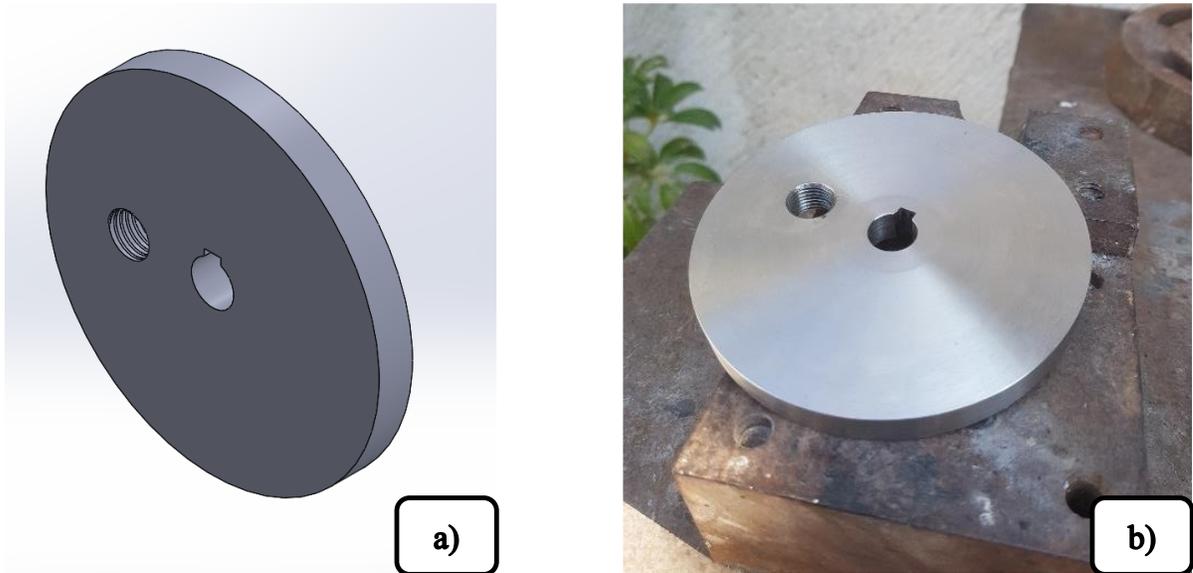


Figura 22. Disco (manivela) del mecanismo de yugo escocés a) Disco en SolidWorks, b) Disco real.

Como se mencionó, a este disco se ensambla un perno conocido como excéntrico, el cual es de sumo interés dado que la distancia entre centros entre el punto medio del disco y el punto medio del excéntrico multiplicado por 2 otorgan como resultado la carrera máxima que desarrollará el acoplador ya sea en mm o cm, incluso metros si son dimensiones mayores, el cual describiremos posteriormente, el ensamble entre el disco y el excéntrico se hace por medio de la cuerda interna contenida en el disco y la cuerda externa contenida en el excéntrico, la Figura 23 muestra al excéntrico descrito.

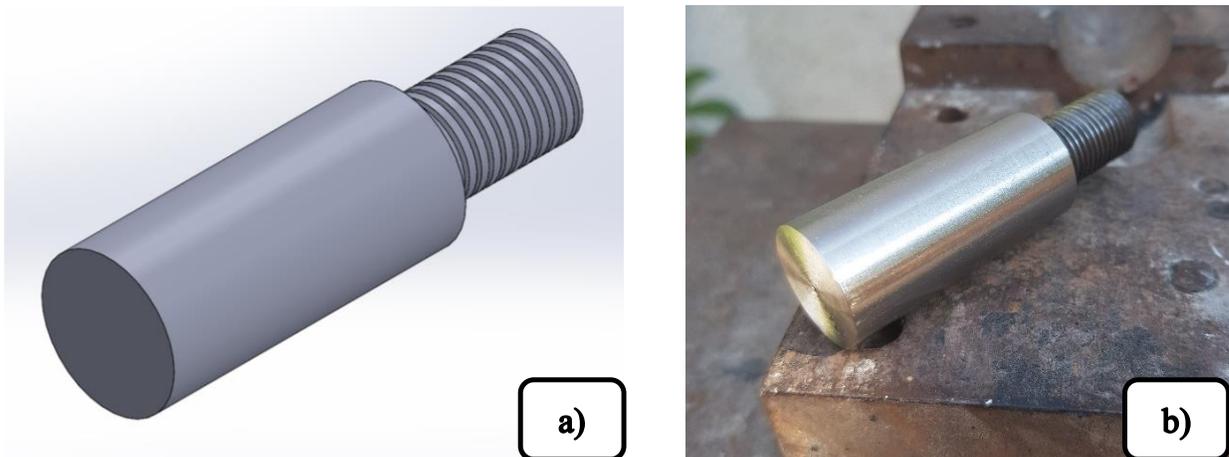


Figura 23. Perno excéntrico a) Perno en SolidWorks, b) Perno real.

El eslabón que moverá el perno excéntrico es el acoplador el cual consta de 2 elementos, el primero es el marco donde se encuentra el excéntrico contenido, dada la configuración del mecanismo de yugo escocés en este caso el acoplador solo se moverá de manera horizontal, es decir, de derecha a izquierda como se muestra en la Figura 24, es importante mencionar que este es el único elemento hecho de acero AISI 4140, de igual forma se puede ver que tiene un barreno con cuerda interna.

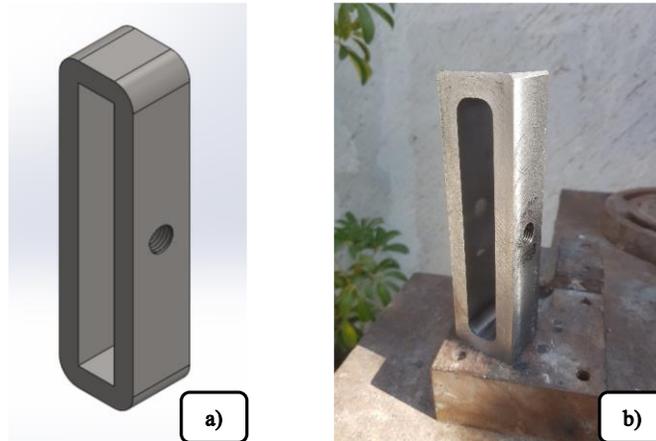


Figura 24. Marco del acoplador a) Acoplador en SolidWorks, b) Acoplador real.

Al acoplador se le ensambla un eje de salida, este eje tiene la función de conectar todo el movimiento generado por el mecanismo de yugo escocés al carro donde se sujeta la probeta, no está por demás decir que en uno de sus extremos posee una cuerda interna para unirlo con el marco rectangular descrito anteriormente y en el extremo contrario un acabado con una sección rectangular, la Figura 25 muestra las características antes mencionadas.

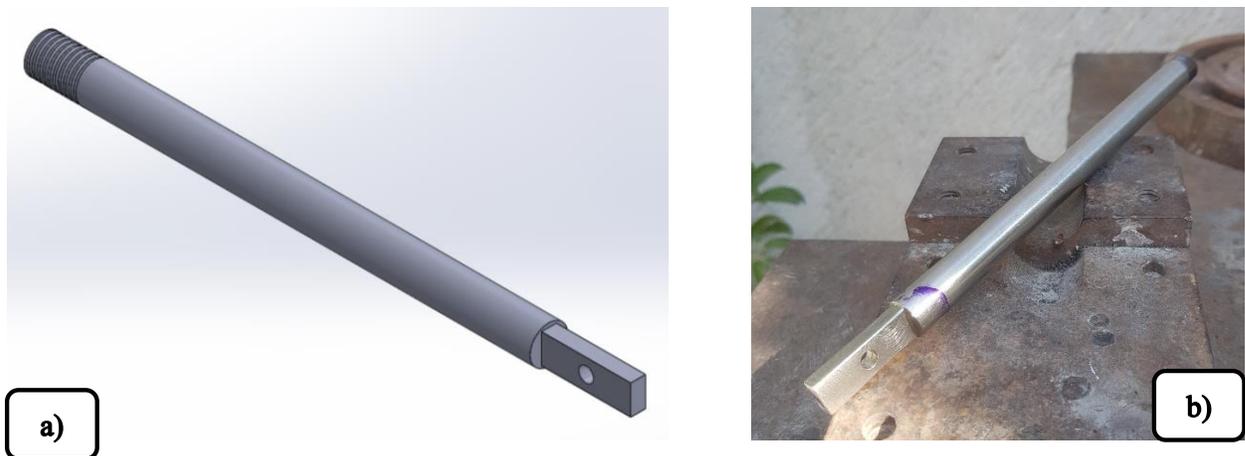


Figura 25. Eje de salida del acoplador a) Eje de salida en SolidWorks, b) Eje de salida real.

Se realizó la construcción de la caja de lubricación que contiene a los elementos del mecanismo de yugo escocés, una vez que se rellene hasta cierto nivel con aceite lubricante, se espera reducir

significativamente la fricción entre componentes, así como también el calentamiento excesivo, (Figura 26).

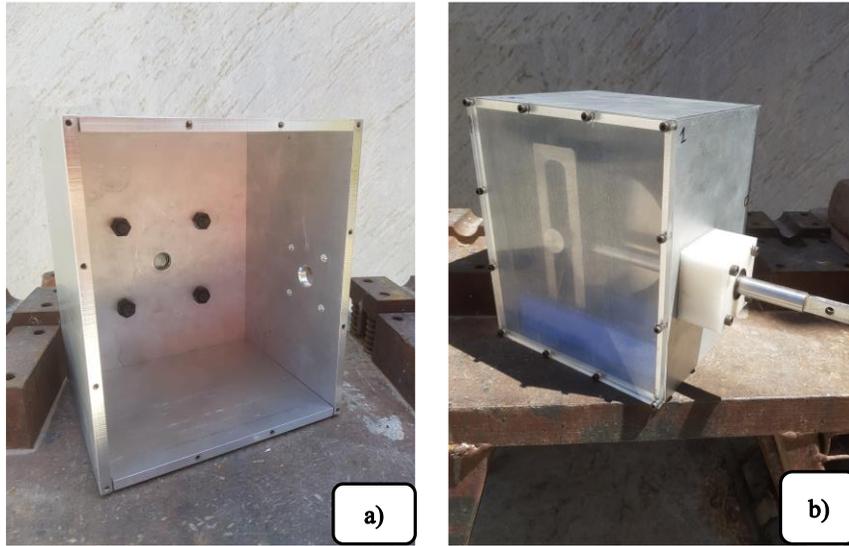


Figura 26. Caja de aluminio a) Sin componentes en su interior, b) Con componentes en su interior.

Una guía dentro de la caja de lubricante se fabricó por medio de la impresión 3D, esta guía funciona como carril en donde se puede desplazar el acoplador sin riesgo a que se gire, mientras el perno excéntrico lo conduce, la Figura 27 muestra éste carril.



Figura 27. Carril guía de acoplador.

Para el armado de la mesa que soporta el mecanismo, se utilizó perfil estructural de aluminio de 40 x 40 mm para hacer la construcción del marco, los elementos que se unieron fueron tornillos y sus contras, la Figura 28 muestra la mesa ensamblada.



*Figura 28. Marco de mesa de soporte.*

Como parte superior en el marco de la mesa se colocó una placa de acero con  $\frac{1}{4}$  de espesor, donde sus lados poseen dimensiones de 70 cm respectivamente, es claro que, el marco de la mesa anteriormente mostrada posee estas dimensiones para que la placa pueda descansar sobre éste, la Figura 29 muestra la placa de acero utilizada.



*Figura 29. Placa de acero.*

Para acoplar el carro que sujeta a la probeta con el eje de salida del yugo escocés, se diseñó acorde a las dimensiones requeridas un sujetador en SolidWorks y para su fabricación se usó aluminio como material a maquinar, este sujetador posee un barreno por donde se introduce un tornillo con

la finalidad de unir éste mismo con la parte final del eje de salida, que tiene una geometría de un rectángulo con un barreno en su centro, hay que mencionar que se atornilla a la placa de aluminio perteneciente al carro que sujeta la probeta, en la Figura 30 se muestra el sujetador.

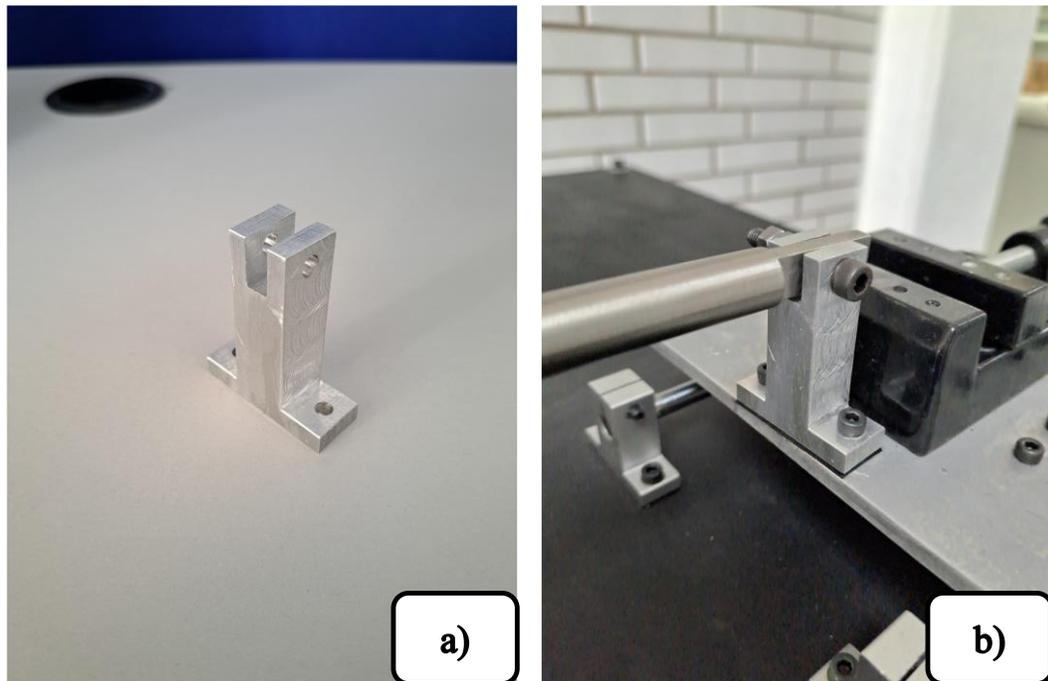
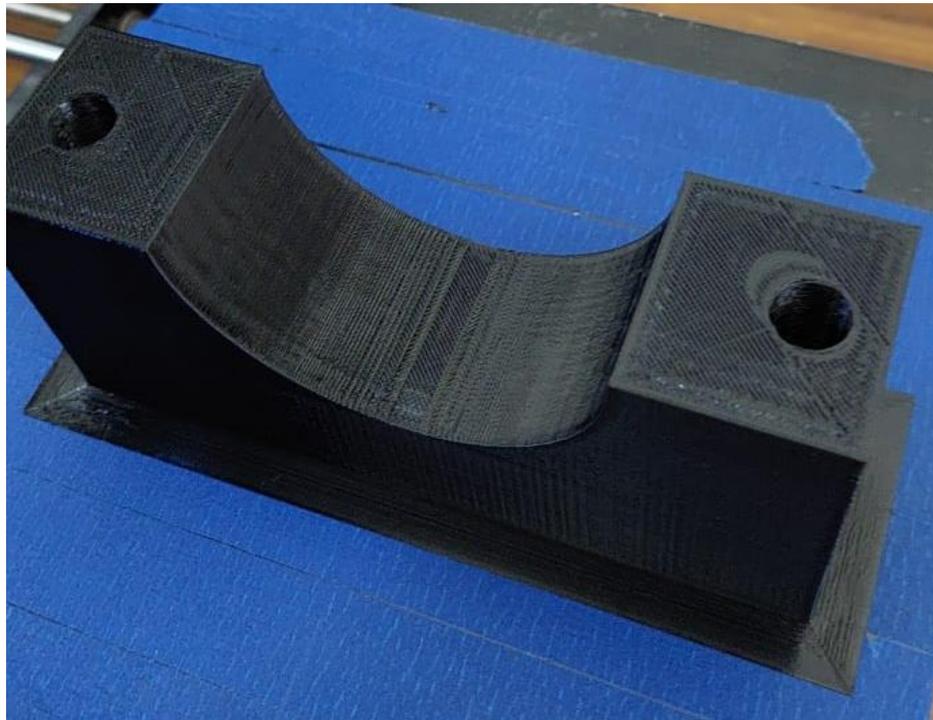


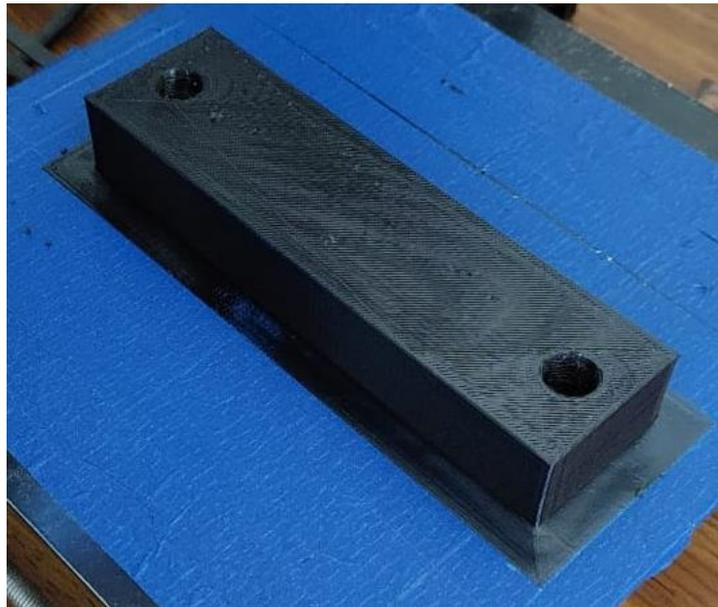
Figura 30. Sujetador a) Desacoplado, b) Acoplado con el carro.

Algunos componentes necesitaron bases o soportes para mantenerlos en una posición adecuada, como lo es en el caso del motorreductor, al unirlo por medio del acoplamiento de elastómero al eje que mueve el mecanismo de yugo escocés, dicho elemento quedó separado de su base con respecto a la mesa donde descansa todo el ensamble, es por ello que se necesitaron impresiones 3D, para corregir y ayudar a que el motor descansa sobre una superficie sólida y éste no quede desalineado. Estas bases ó aumentos surgen de tomar 2 diferentes mediciones en las caras de interés donde debe descansar el objeto, la primera corresponde al cuerpo o cilindro, esta medición representa la distancia que existe entre los puntos perimetrales de la mitad de la circunferencia del cilindro del motorreductor hasta la mesa de soporte, con el fin de que el motor no este vibrando y salga de la posición establecida, impidiendo que trabaje adecuadamente, en la Figura 31 podemos observar la geometría.



*Figura 31. Base de cilindro del motor.*

La segunda distancia es tomada desde la cara recta del reductor hasta la mesa de soporte, de igual manera, este aumento sirve para sujetar esta parte del motor y para alinearlo con respecto a la altura necesaria para que el buje de salida coincida con el acoplamiento de elastómero, la Figura 32 muestra este aumento.



*Figura 32. Soporte en cara recta del reductor.*

El acoplamiento de elastómero está sujeto a velocidad angular, propiamente, la brida de conexión junto con el eje principal del mecanismo de yugo escocés puede recorrerse hacia enfrente dado que no están limitados estos componentes con algún otro elemento, no obstante, para evitar este desplazamiento, y que el acoplamiento se separe entre sus mismos componentes, como lo es la estrella de polímero y la brida de conexión, se imprimió un retén formado por 2 cuerpos que envuelven a este objeto como se puede ver en la Figura 33.

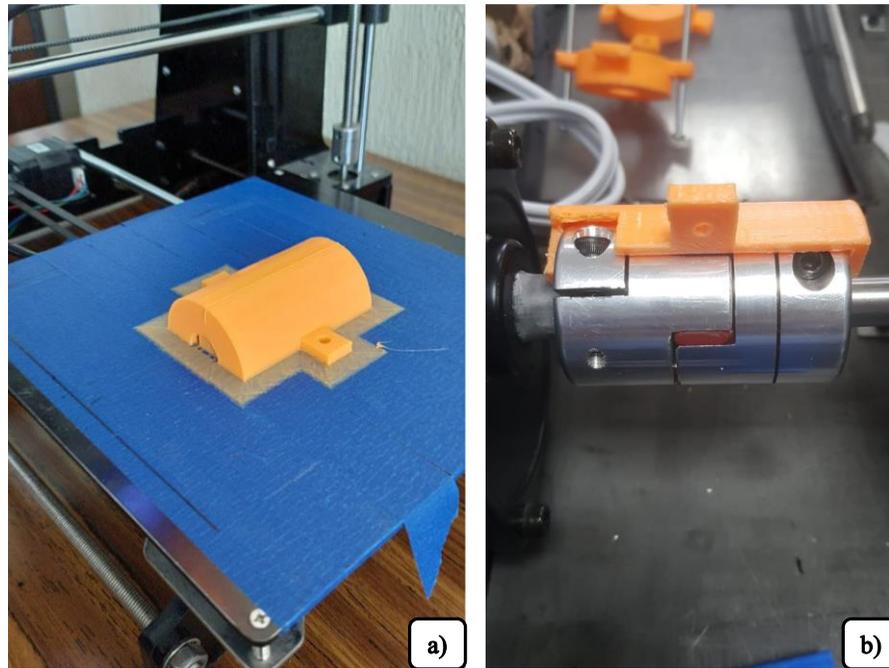


Figura 33. Retén de acoplamiento.

Se construyó una cámara de calentamiento, de manera introductoria, los materiales a evaluar están sujetos a cambios de temperatura, entonces resulta conveniente tener una cámara en donde se pueda aislar o disminuir el flujo o corriente de aire y calentar el aire contenido en el volumen. La cámara de temperatura se propuso como un prisma rectangular en donde las probetas no impacten con sus paredes internas al oscilar, este ensamble es como si fuera un emparedado, en donde se busca aislar las paredes internas de la sección transversal con respecto a las paredes externas, posteriormente se describen los componentes involucrados.

Para la construcción de la cámara de calentamiento, se adquirieron dos placas de aluminio con dimensiones de 122 cm x 30.5 cm x 3 mm de espesor, como ya se ha visto, el aluminio es un buen conductor térmico por lo que al tener una fuente que proporcione calor, éste material lo transferirá rápidamente al aire o a la superficie en caso de estar en contacto con algún otro componente, posteriormente se muestra el ensamble de la cámara de calentamiento con las placas de aluminio

montadas, por ahora solo se mostrará la estructura de la cámara de calentamiento, las placas de aluminio se pueden ver en la Figura 34.



*Figura 34. Placa de aluminio.*

Para sujetar las placas de aluminio, se compraron hojas de mdf (Medium density fibreboard) tabla de fibra de densidad media, con distintos espesores, el mdf es un material fácil de maquinar según las necesidades, con el uso de tornillos y sus tuercas correspondientes se logró este ensamble, el primer espesor del mdf adquirido es de 3mm y el segundo de 1.2 cm, esta diferencia de espesores surgen dado que, para las paredes internas en la cámara de calentamiento se utilizó el mdf con el espesor menor y en las paredes externas de dicha cámara se utilizó el espesor mayor.

Mencionamos que esta estructura posee características como tipo emparedado, entonces como material aislante se adquirió unicel para separar los dos tipos de hojas de mdf antes descritas.

El orden en la cámara de calentamiento es, placa de aluminio, primera pared hecha con mdf, unicel y al final es otra pared de mdf, si tomamos una dirección desde dentro hacia afuera.

La estructura de la cámara de calentamiento luce como se muestra en la Figura 35.

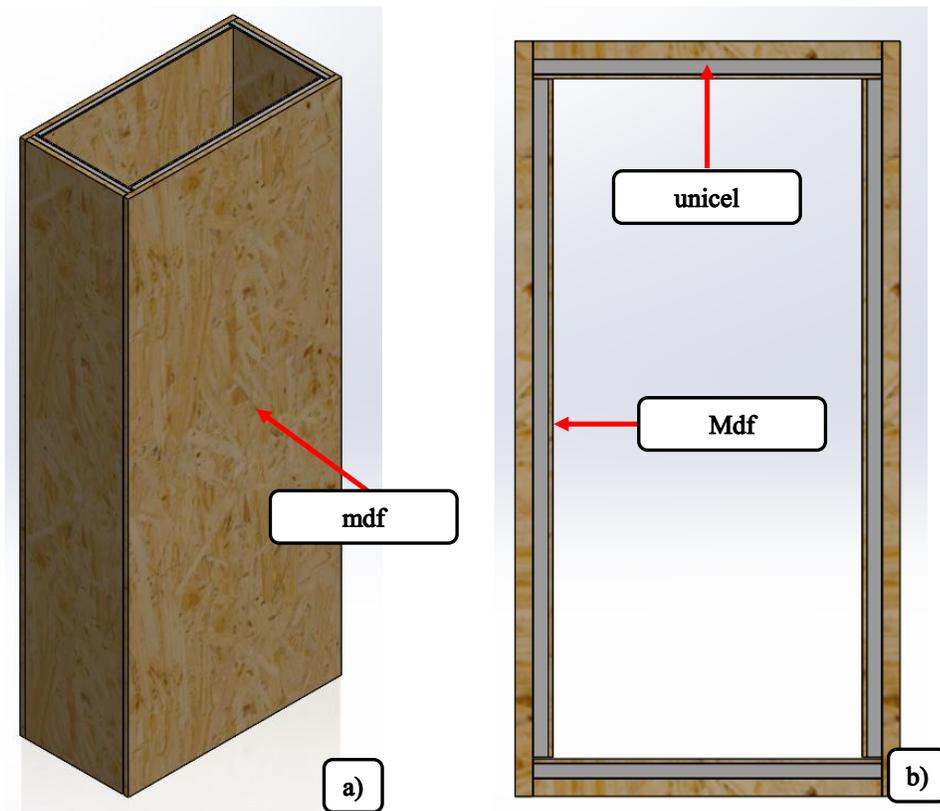


Figura 35. Estructura de la cámara de calentamiento a) Vista isométrica, b) Vista superior.

Se ha mencionado que dentro de la cámara de temperatura se evaluarán materiales, como elementos generadores de calor se compraron resistencias, las cuales, a partir de la circulación de energía eléctrica, dicha resistencia comenzará a calentarse y a otorgar el calor a las placas de aluminio por medio de la conducción térmica, de manera que el aire contenido en la cavidad empezará a calentarse y a su vez, éste aire calentará la probeta en su interior. A continuación se muestra la Figura 36 en donde se puede observar el tipo de resistencias que se usaron.



*Figura 36. Resistencia calefactora.*

Para controlar la temperatura de las resistencias, se adquirió un controlador de temperatura, de manera que se pueda variar la temperatura que se entrega en la camisa o resistencia, acorde a conveniencia del usuario, la Figura 37 muestra el controlador.



*Figura 37. Controlador de temperatura.*

La metodología que se desarrollará en este trabajo de tesis se presenta a continuación en la Figura 38.

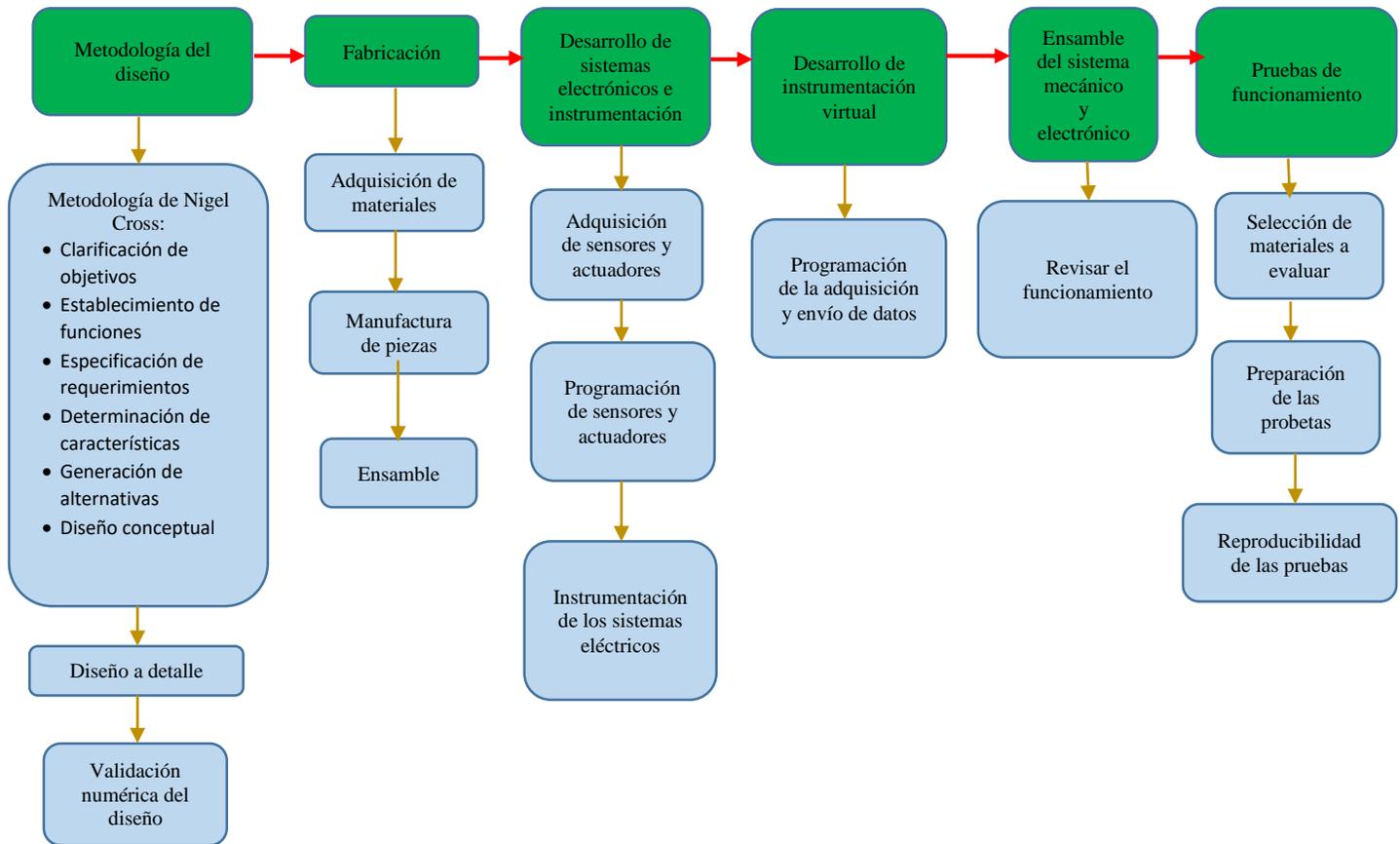


Figura 38. Etapas de la metodología.

De forma general la metodología es el procedimiento ordenado para concluir de manera exitosa la investigación que tiene como propósito final producir conocimiento y elaborar teorías, sustentado bajo las pruebas realizadas en la experimentación donde se demuestran resultados verídicos los cuales deben de ser confiables. Se requiere de un conjunto de actividades con conocimientos ingenieriles para llevar a cabo un diseño eficaz. El método que se usará para el desarrollo de este proyecto es el teórico experimental, ya que se toman casos particulares, donde se pueden tomar los resultados para obtener conclusiones a partir de la observación y experimentación, se pueden integrar los requerimientos y expectativas en el proceso, de manera que sea un método racional para establecer el mejor diseño posible.

A continuación, se presenta la descripción de las etapas de la metodología que se seguirán para el desarrollo de este trabajo de tesis.

## 4.2. Metodología de diseño

Se requiere de un conjunto de actividades con conocimientos ingenieriles para llevar a cabo un diseño eficaz. Para iniciar con el proceso de diseño se debe de identificar una necesidad, la definición clara del problema, sus datos de entrada y salida, características y dimensiones, una síntesis donde se evalúa que análisis son de utilidad y cuales no lo son, donde se puedan describir fenómenos reales por medio de análisis matemáticos, los resultados arrojados deben de satisfacer y cumplir con los objetivos deseados, de no ser así se debe entrar en una etapa donde se realicen distintas pruebas a manera que sea un proceso iterativo donde se muestre información apegada al comportamiento real del objeto de estudio, este proceso permite acercarse al objetivo deseado, y cuando es alcanzado se pueden resaltar las aportaciones científicas debido a que se realizó un proceso de diseño adecuado.

### 4.2.1. Revisión de patentes

Esto se sugiere dado que se consultó la plataforma del instituto mexicano de la propiedad industrial (por sus siglas IMPI), en la cual se realizó la búsqueda de patentes de aerogeneradores la cual arrojó 111 resultados como se muestra a continuación en la Figura 39.

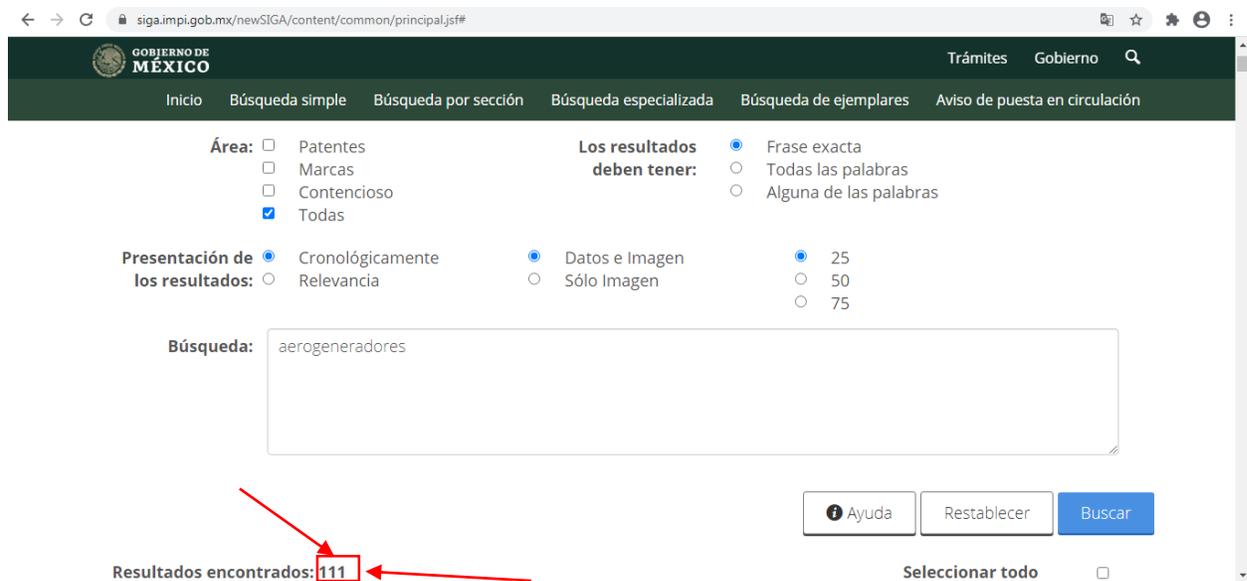


Figura 39. Plataforma del instituto mexicano de la propiedad industrial.

De los cuales destacan proyectos como sistemas de pararrayos en álabes, monitoreo en los componentes, torres de andamio y limpiadores, sistemas de transmisión de rayos, metodologías y moldes para la fabricación de turbinas tipo savonius helicoidal, procedimientos de acceso a la

Diseño y fabricación de una plataforma dinámica para la evaluación de materiales aplicados en palas de generadores eólicos

superficie exterior de torres de generadores, entre otros más que no están relacionados con plataformas que evalúen materiales usados en palas.

También se consultó el buscador de normas AENOR usando palabras clave como wind turbines, en lo cual se mostraron 98 resultados, como se muestra a continuación en la Figura 40.

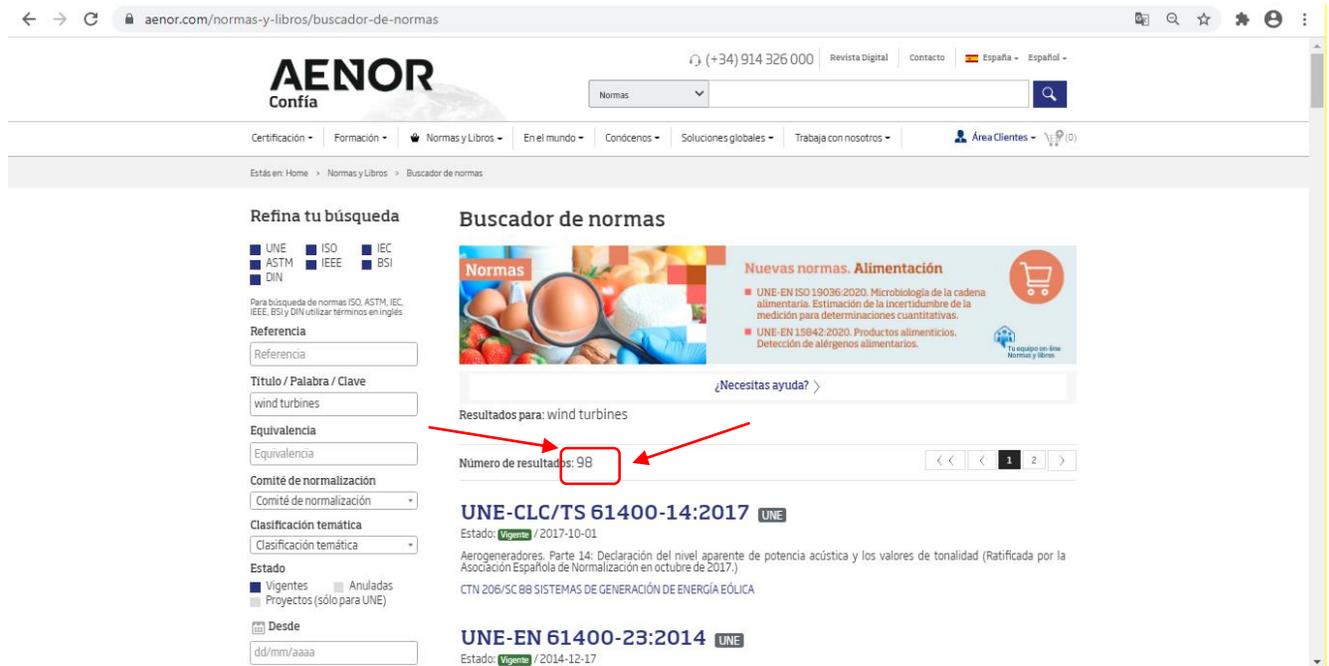


Figura 40. Plataforma de normas AENOR.

#### 4.2.2. Clarificación de los objetivos

Se debe realizar un diagrama de árbol de objetivos como se muestra en la Figura 41, donde los objetivos se definen y se ordenan de manera que se puedan apreciar cuales son los de mayor importancia y cuáles son los de menor importancia, deben ser concretos y claros. Entre los principales se encuentran:

- Obtener una reproducibilidad de las pruebas para disminuir errores.
- La plataforma debe ser fácil de operar para optimizar tiempo.
- Seguridad del operador.
- Riesgo bajo de daño a la pieza de trabajo o herramienta.

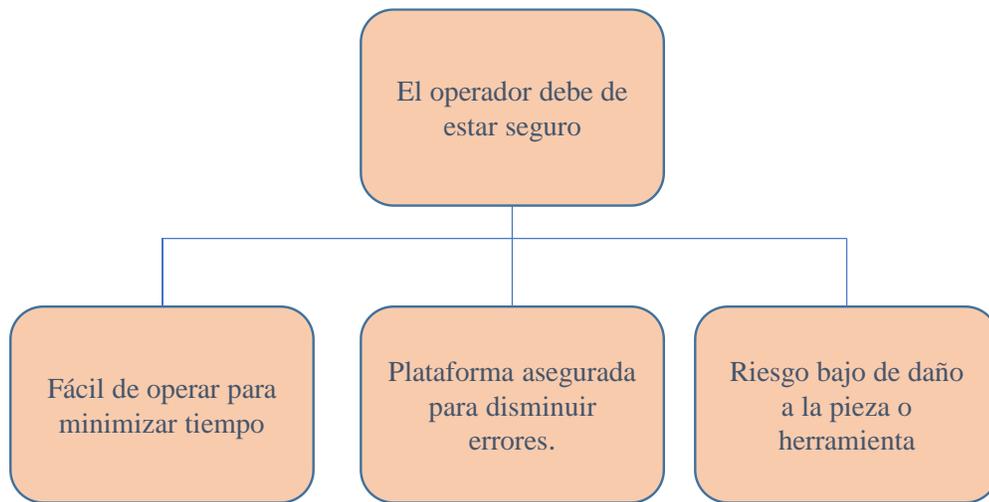


Figura 41. Diagrama de árbol de objetivos.

Este árbol de objetivos resulta principalmente de los siguientes puntos:

Preparar una lista de objetivos de diseño.- son tomados de un diseño breve propuesto, que necesidades tiene el cliente y las diferentes aportaciones que puedan surgir por medio de un debate entre los miembros del equipo de trabajo.

Se ordena la lista de enunciados generada, dando a notar cuales objetivos son más importantes o que tienen un mayor nivel de importancia.

Representar las raíces y las relaciones existentes entre los objetivos logrados.

#### 4.2.3. Establecimiento de funciones

Se debe de resaltar la característica o contribución principal ya que se conoce el propósito fundamental de los dispositivos como los son los aerogeneradores, se conocen los valores requeridos a la entrada del sistema y a la salida del sistema.

- Expresar las funciones en términos de entrada y salida.
- Desglosar de manera general todas las tareas que se deben de cumplir en la plataforma.
- Delimitar el volumen que se puede contener dentro de la plataforma.
- Buscar los componentes adecuados para realizar las pruebas.

#### 4.2.4. Especificación de requerimientos

Se deben de establecer con base al costo, tamaño de la plataforma, objetivos de diseño, mediante una descripción de los requerimientos necesarios para el diseño y fabricación de la plataforma:

Requerimientos mecánicos.- Son el tipo de materiales a usar y las dimensiones de la plataforma.

Requerimientos de electrónica e instrumentación.- Son el tipo de sensores y actuadores que trabajaran en conjunto en la plataforma.

Instrumentación virtual.- Partes fundamentales que debe de tener la plataforma como interfaz para la valoración del operador.

Condiciones de operación.- bajo que parámetros se encuentra trabajando la plataforma.

#### **4.2.5. Determinación de características**

Determinación de características.- Que la plataforma acepte las probetas elaboradas con distintos materiales, que se pueda generar un mantenimiento fácil, que opere bajo distintas condiciones de temperatura y también con distintos valores en el análisis dinámico.

Determinación de cliente.- se evalúan e identifican los fenómenos que ocasionan la falla en las palas de generadores eólicos. Debido a que no se someten los materiales de dichas palas a pruebas bajo condiciones de temperatura específicas es necesario diseñar la plataforma para simular condiciones de trabajo similares a las cuales estará sometida el álabe una vez que este instalada en su ubicación destinada.

#### **4.2.6. Generación de alternativas**

Se debe generar la matriz de calidad para identificar relaciones de parámetros, de esta manera se pueden generar alternativas que orienten mejor el proceso del diseño y que se pueda ofrecer la mejor solución.

#### **4.2.7. Diseño conceptual**

Se toma el planteamiento del problema para proponer posibles soluciones, aquí es donde se proponen las mejoras, dado que se debe de conocer la investigación a detalle así como su desarrollo cronológico para cumplir con el proyecto de manera exitosa.

### **4.3. Diseño a detalle**

Se calcularán las dimensiones de la plataforma con base a las dimensiones de las probetas que se someterán a pruebas dinámicas, tomando en cuenta el peso de las mismas.

#### **4.4. Validación numérica del diseño**

Es la aportación de datos que se arrojan, están respaldados por el buen uso del software así como de las pruebas experimentales, las condiciones para la validación de datos pueden ser o no reales, es decir, pueden ser simuladas también. Los cálculos se elaboraron en el software de Ansys, donde se editó el material que se usó en la elaboración de las piezas acero AISI 4340 así como también acero AISI 4140, con las piezas dibujadas en SolidWorks terminación .SLDPRT, se deben guardar también en terminación .X\_T, la cual es una de las terminaciones de archivos que son compatibles con Ansys, para hacer la simulación se deben de importar las piezas con la extensión mencionada con anterioridad, se genera un mallado con sus respectivas consideraciones en las piezas, se insertan soportes ya sean fijos, sin desplazamiento, según sea el caso, se indican las cargas a las cuales están sujetas las piezas o ensambles, y se piden resultados como esfuerzos y deformaciones, los cuales son de particular interés en nuestro mecanismo.

#### **4.5. Fabricación**

##### **4.5.1. Adquisición de materiales**

Se refiere a los materiales de prueba, materiales que serán de utilidad para la construcción del prototipo.

Deben ser buenos aislantes eléctricos, buena resistencia, también deben poseer un módulo de Young alto, resistentes a la corrosión, y resistir cambios bruscos en la temperatura. Se debe de tomar en cuenta que el material sea ligero porque eso se verá reflejado de manera significativa en el costo.

##### **4.5.2. Manufactura de piezas**

Se refiere a la manufactura de las piezas necesarias que se usarán para el ensamble y acoplamiento del diseño final del prototipo.

##### **4.5.3. Ensamble**

Es el ensamble de las piezas teniendo sus componentes o piezas maquinadas.

#### **4.6. Desarrollo de sistemas electrónicos e instrumentación**

Los sistemas electrónicos permitirán detectar y ajustar las condiciones de operación de la plataforma.

#### **4.6.1. Adquisición de sensores y actuadores**

Se realizará la adquisición o compra de los sensores y actuadores necesarios para implementarlos en el prototipo, estos elementos permitirán la lectura de datos y generar las condiciones de funcionamiento del prototipo.

Sensores.- Es un dispositivo que realiza la conversión del valor físico, como temperatura, en un valor que resulte más fácil de medir. Este valor puede ser un parámetro eléctrico como la tensión, una corriente, una variación de carga o una impedancia.

#### **4.6.2. Programación de sensores y actuadores**

Esto se refiere a la conexión con plataforma electrónicas programables como arduino, tarjetas national instruments, rasperry, etc, que permitan la adquisición de datos para obtener la lectura a partir de los sensores y para realizar movimientos o ajustes en el prototipo a través de los actuadores.

#### **4.6.3. Instrumentación de los sistemas eléctricos**

Su principal objetivo es extraer información contenida en las señales medidas. Se hará el uso de controladores, ya que estos se pueden programar para realizar las actividades que se requieran al procesar información digital, así como la comunicación, estos pueden almacenar tipos de datos como instrucciones y los registros para el control de las diferentes funciones, esto es en base a los requerimientos obtenidos en la metodología del diseño.

### **4.7. Desarrollo de instrumentación virtual**

#### **4.7.1. Programación de la adquisición y envío de datos**

Se considera la utilización de software, ya que estos presentan buenas capacidades en cuanto al análisis, donde se permite integrar el control de los instrumentos, de manera que se pueden comparar y verificar los resultados que se obtienen de manera experimental con los datos arrojados por el software.

## **4.8. Ensamble del sistema mecánico y electrónico**

### **4.8.1. Revisar el funcionamiento**

Verificar las pruebas de funcionamiento del prototipo en sus ensamblajes mecánicos y electrónicos sin que presenten anomalías, como falta de material en sus componentes, o falta de dispositivos electrónicos.

## **4.9. Pruebas de funcionamiento**

### **4.9.1. Selección de materiales a evaluar**

Son los materiales candidatos a ser evaluados en la plataforma, serán fibra de vidrio y fibra de carbono.

### **4.9.2. Preparación de las probetas**

Se propusieron las dimensiones de las probetas para poder evaluarlas dentro de la plataforma bajo las condiciones de operación requeridas. Las dimensiones de las probetas corresponden a tamaños como 12.7 mm ( $\frac{1}{2}$ " ) ó 25.4 mm (1" ) en su base por 1.58 mm ( $\frac{1}{16}$ " ) ó 3.175 mm ( $\frac{1}{8}$ " ) de espesor hablando de su sección transversal por alturas que van desde los 100 mm hasta los 900 cm.

### **4.9.3. Reproducibilidad de las pruebas**

Hacer varias pruebas esperando que el prototipo presente precisión bajo diferentes condiciones de operación.

## **5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **5.1. Metodología de diseño de yugo escocés**

Con los nuevos avances en la tecnología, el diseño de equipo y automatización son áreas de gran interés, por lo que, actualmente el estudio y desarrollo de mecanismos eficientes se vuelven temas relevantes. Un mecanismo que presenta características que pueden ser ampliamente aprovechadas, es la variación biela-manivela-deslizador conocida como yugo escocés, el cual a partir de un movimiento rotativo (velocidad angular y torque) proporcionado por un motor y un excéntrico presenta una carrera y un retroceso en el deslizador (movimiento reciprocante), generando un movimiento armónico simple [19]. El uso del mecanismo de yugo escocés ha sido reportado en numerosos campos de aplicación como lo es en actuadores de válvulas, en máquinas de combustión interna, máquinas de vapor, sistemas de bombeo y en compresores de aire [20-22]. Recientemente, también se han implementado estos mecanismos en configuraciones de motores que ofrecen máquinas con pistones eficientes, con razones de velocidades de hasta 3500 revoluciones por minuto [23].

En esta sección describimos la metodología de diseño Nigel Cross, la cual nos permitió determinar parámetros, materiales y elementos, a partir del siguiente procedimiento: clarificación de objetivos, establecimiento de funciones, la fijación de requerimientos, determinación de características, generación de alternativas, evaluación de alternativas, mejora de detalles, estrategias de diseño y su validación numérica, para obtener como producto el diseño final de un yugo escocés de alta velocidad lineal. Este diseño presentará un amplio intervalo de frecuencias o velocidades de desplazamiento, por lo que, puede tener diversas aplicaciones, una de ellas es en un sistema que permita la evaluación dinámica de diversos materiales bajo la condición de vibraciones forzadas. Por esta razón se aplicó la metodología en el proceso del diseño, la cual se dirige de manera adecuada esclareciendo los objetivos que se persiguen, las características que debe poseer el producto, funcionalidad y resultados esperados, a partir de la aplicación del siguiente procedimiento o pasos:

1. Clarificación de objetivos.
2. Establecimiento de funciones.
3. Fijación de requerimientos
4. Determinación de características.
5. Generación de alternativas.

## 6. Evaluación de alternativas.

### 5.1.1. Clarificación de objetivos

Al aplicar la metodología Nigel Cross es posible planificar el producto o servicio. Debido a que existe una búsqueda sistemática que muestra de manera evidente los objetivos perseguidos, así como su nivel de importancia por medio de un diagrama de objetivos como se muestra en la Figura 42.

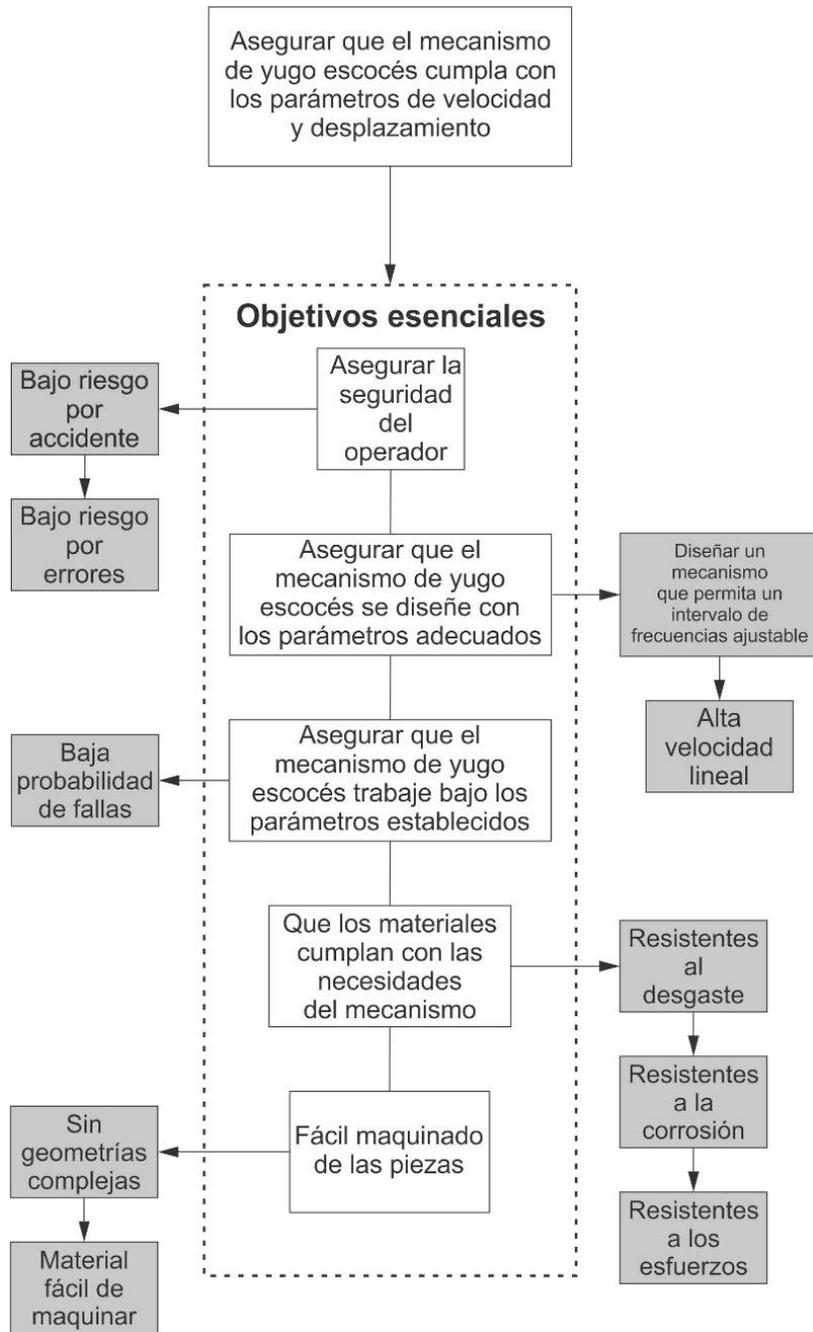


Figura 42. Árbol de objetivos.

### 5.1.2. Establecimiento de funciones

Se establecen las funciones del sistema en términos de entrada y salida, así como también un desglose donde se muestren algunas operaciones que ocurren en ciertas funciones del sistema en general como se puede apreciar en la Figura 43, mostrada a continuación.

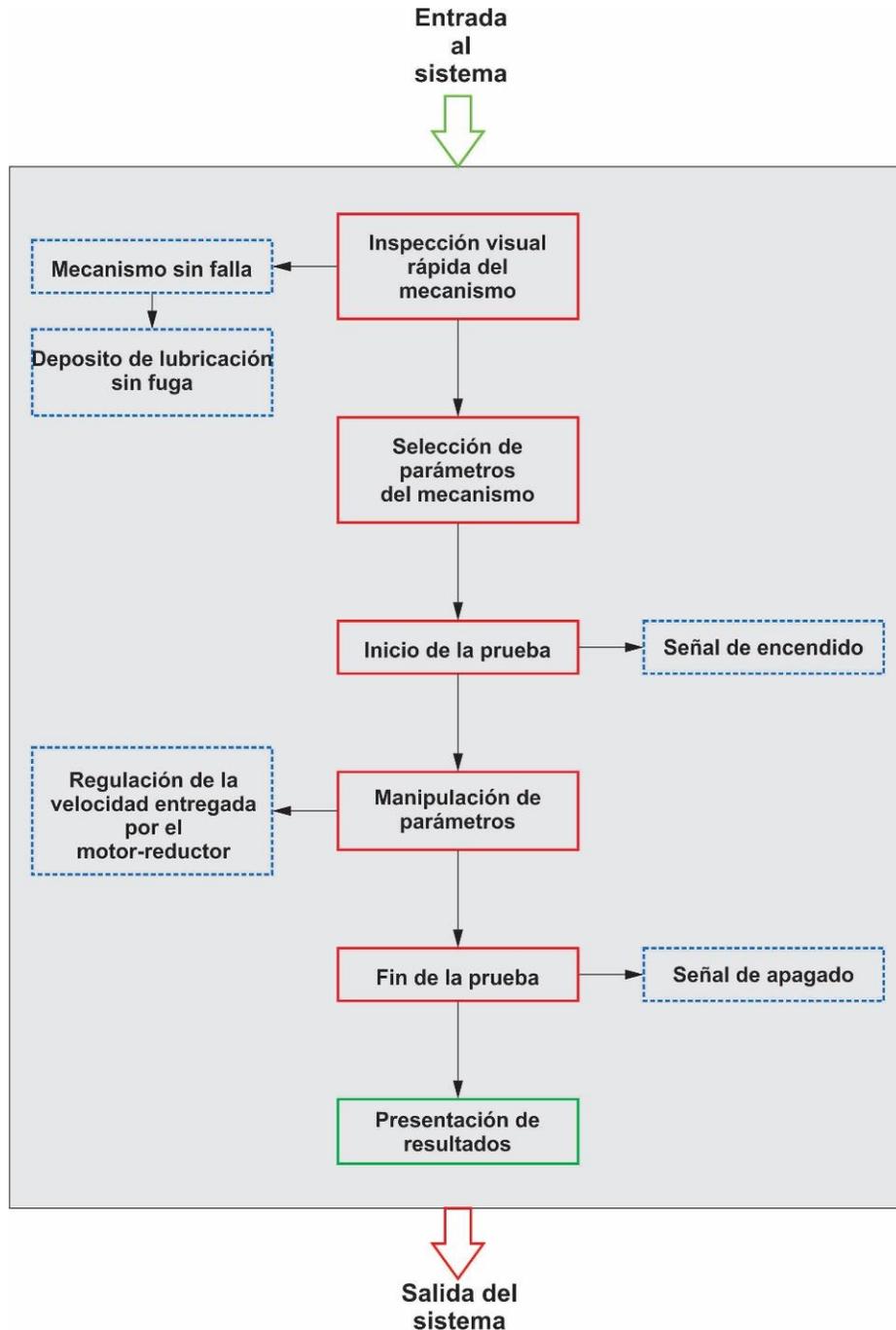


Figura 43. Establecimiento de funciones.

### 5.1.3. Fijación de requerimientos

Posteriormente, a partir de los requerimientos de los clientes, se elabora la fijación de requerimientos en la Tabla 4.

Tabla 4. *Requerimientos sobre el diseño de un mecanismo de yugo escocés.*

#	Requerimientos
1	Mecanismo de alta velocidad lineal
2	Velocidad angular ajustable
3	Materiales resistentes al desgaste
4	Materiales resistentes a la corrosión
5	Materiales comerciales
6	Desplazamiento lineal a la longitud establecida
7	Depósito de aceite lubricante sin fugas
8	Soporte en el acoplador
9	Fácil de operar
10	Fácil mantenimiento
11	Fácil ensamble
12	Piezas fáciles de maquinar
13	Seguridad del operador
14	Materiales resistentes a los esfuerzos mecánicos

Una vez identificados los requerimientos, se procedió a definir los requerimientos que son demandas (D) y los que son deseables (d) por parte del cliente, así como definir la sección en la que se encuentran mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5. *Clasificación de requerimientos.*

Requerimientos	(D)	(d)
Interfaz	Velocidad angular ajustable: 0- 20.944 rad/s	X
Costo	Piezas fáciles de maquinar	X
Manufactura	Depósito de aceite lubricante sin fugas	X
	Soporte en el acoplador	X
Diseño	Mecanismo de alta velocidad lineal: 0-0.5 m/s	X
	Desplazamiento lineal de 5 cm	X
Materiales	Materiales resistentes al desgaste	X
	Materiales resistentes a la corrosión	X

	Materiales comerciales	X
	Materiales resistentes a los esfuerzos mecánicos	X
Operación	Fácil de operar	X
	Fácil mantenimiento	X
	Fácil ensamble	X
	Seguridad de operación	X

#### 5.1.4. Determinación de características

Ya definidos los requerimientos, se identificaron los requerimientos del cliente en términos de atributos del producto, es decir, las características del producto. Se determinó la importancia relativa de los atributos por medio de la asignación de valores donde 1 corresponde a una importancia baja, 3 media, 5 alta y 7 muy alta. En la Figura 44 se presentan los atributos del cliente de mayor interés.

		Asignación de puntos		Importancia relativa
		1	Importancia Baja	
		3	Importancia Media	
		5	Importancia Alta	
		7	Importancia muy Alta	
Atributos del cliente				
Interfaz	Velocidad angular ajustable: 0-20.944 rad/s			7
Costo	Piezas fáciles de maquinar			5
Manufactura	Depósito de aceite lubricante sin fugas			7
	Soporte en el acoplador			5
Diseño	Mecanismo de alta velocidad lineal: 0-0.5 m/s			7
	Desplazamiento lineal a la longitud establecida: 0.05 m			7
Materiales	Materiales resistentes al desgaste			5
	Materiales resistentes a la corrosión			5
	Materiales resistentes a los esfuerzos mecánicos			5
Operación	Fácil de operar			5
	Fácil mantenimiento			5
	Fácil ensamble			3
	Seguridad de operación			5

Figura 44. Atributos del cliente y su valor.

Se realizó una comparativa entre los productos de la competencia, productos que comparten atributos similares con los propuestos, identificados como fabricante A [21] y fabricante B [24], cada uno con su simbología correspondiente como se muestra en la Figura 45, (usando la misma asignación de puntos como en la Figura 44).

Atributos del cliente		Percepciones del cliente			
		1	3	5	7
Interfaz	Velocidad angular ajustable: 0-20.944 rad/s	☯△			
	Costo	Piezas fáciles de maquinar	☯△		
Manufactura	Depósito de aceite lubricante sin fugas	☯△			
	Soporte en el acoplador				☯△
Diseño	Mecanismo de alta velocidad lineal: 0-0.5 m/s		△	☯	
	Desplazamiento lineal a la longitud establecida: 0.05 m		△	☯	
Materiales	Materiales resistentes al desgaste			☯△	
	Materiales resistentes a la corrosión		△	☯	
	Materiales resistentes a los esfuerzos mecánicos			☯△	
Operación	Fácil de operar			☯△	
	Fácil mantenimiento		☯△		
	Fácil ensamble	☯△			
	Seguridad de operación		☯		△
		Fabricante A			☯
		Fabricante B			△

Figura 45. Comparativa entre fabricantes.

Se elaboró la matriz que relaciona los atributos del cliente y las características de ingeniería propuesta, donde los atributos están de lado izquierdo como filas y las características de ingeniería se encuentran por la parte superior como columnas, en la intersección entre las filas y columnas se coloca el símbolo correspondiente que determina la relación existente mostrado en la Figura 46.

		Características de Ingeniería												
		Torque para mover el mecanismo: 6.3271 Nm	Potencia consumida en el motor: 90 V CD	Fuerza en el deslizador	Velocidad en el deslizador	Resistencia a los esfuerzos	Selección de materiales duros	Coefficiente de fricción cinético	Lubricación Hidrodinámica	Carrera máxima en el deslizador: 0.05m	Bajo calentamiento entre componentes	Revoluciones entregadas por el motorreductor: 200 RPM	Control de velocidad	
		Relación												
			Muy fuerte											
			Fuerte											
		=	Débil											
		-	Muy débil											
Atributos del cliente	Interfaz	Velocidad angular ajustable: 0 -20.944 rad/s												
	Costo	Piezas fáciles de maquinar												
	Manufactura	Depósito de aceite lubricante sin fugas												
		Soporte en el acoplador												
	Diseño	Mecanismo de alta velocidad lineal: 0-0.5 m/s												
		Desplazamiento lineal a la longitud establecida: 0.05 m												
	Materiales	Materiales resistentes al desgaste												
		Materiales resistentes a la corrosión												
		Materiales resistentes a los esfuerzos mecánicos												
	Operación	Fácil de operar												
		Fácil mantenimiento												
		Fácil ensamble												
		Seguridad de operación												

Figura 46. Matriz entre atributos del cliente y características de ingeniería.

### 5.1.5. Generación de alternativas

La elaboración de la generación de alternativas, permitió orientar el proceso de diseño con los elementos disponibles en el mercado, iniciando con la elaboración de una lista de funciones esenciales para el producto.

A partir de esta lista de elementos se generó el diagrama morfológico, donde por la parte superior se muestra el número de soluciones disponibles, y en la parte izquierda se muestran las sub soluciones o soluciones secundarias a disposición, ver Figura 47.

Sub-soluciones	Alternativas			
	1	2	3	4
Tipo de maquina generadora de torque	Motor comercial 	Motorreductor 	Manivela manual 	
Eje conductor	Eje conductor de torque 	Eje con cambios de diámetro 		
Acoplamiento	Bridas 	Elastómero 	Trenes de engranajes 	Adhesivo epóxico 
Excéntrico	Tornillo de grado 	Balero 	Perno de madera 	
Guías del mecanismo	Guías lineales 	Chumaceras 	Abrazaderas 	
Contenedor de lubricante	Lubricación manual 	Contenedor de acrílico 	Sistema de bombeo de lubricante 	
Tipo de lubricante (Mineral o sintético)	Aceite sintético 	Polvo de grafito 	Grasa animal 	Grasa sintética 
Tipos de materiales a utilizar	Metálicos 	No metálicos 	Compósitos 	

Figura 47. Diagrama morfológico.

### 5.1.6. Evaluación de alternativas

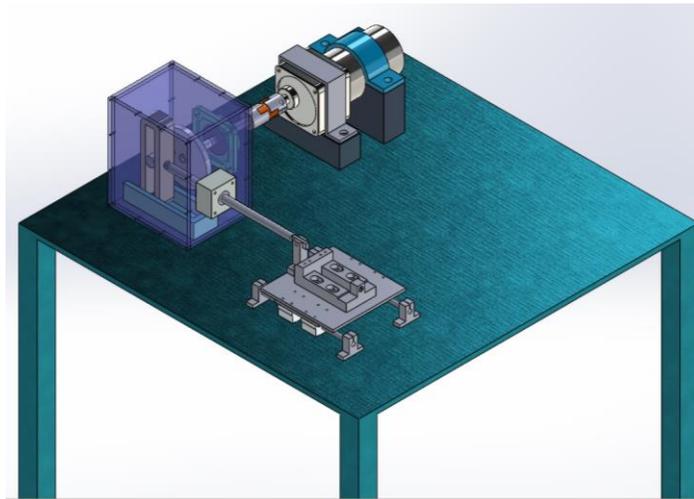
Para la evaluación de las alternativas se hace uso de las comparativas que existen entre cada subfunción con base a los criterios de diseño pertinentes, considerando ventajas y desventajas de cada alternativa, los valores asignados van de 1 a 3, donde 1 es la calificación más baja o mala, 2 es la calificación media y 3 la más alta o mejor como se ve en la Figura 48, presentada a continuación.

Sub función	Criterios de evaluación							
	Tipo de maquina generadora de movimiento	Control de velocidad	Transmisión de par	Velocidad constante	Sustentable	Mantenimiento	Fácil operación	Seguridad
Motor comercial (Motor de corriente alterna)	1	3	3	1	2	2	1	13
Motorreductor (Motor del corriente directa)	3	3	3	1	2	2	1	15
Manivela manual	1	1	1	3	2	2	1	11
Eje conductor	-	Ensamble	Utilidad	Sustentable	Mantenimiento	Fácil operación	Seguridad	Total
Eje circular (único diámetro)	-	2	3	1	2	3	1	12
Eje circular con cambios de diámetro	-	2	3	1	2	2	1	11
Acoplamiento	Transmisión de par	Vibración	Utilidad	Sustentable	Mantenimiento	Fácil operación	Seguridad	Total
Bridas	3	2	2	1	2	1	1	12
Elastómero	3	2	2	1	2	2	1	13
Trenes de engranajes	3	1	2	1	2	1	1	11
Adhesivo epóxico	2	1	1	2	2	1	1	10
Excéntrico	Resistencia	Ensamble	Utilidad	Sustentable	Mantenimiento	Fácil operación	Seguridad	Total
Tornillo de grado	3	2	2	1	2	2	2	14
Balero	3	2	3	1	2	2	2	15
Perno de madera	1	2	1	3	2	2	1	12
Guías del mecanismo	Fricción	Empotramiento	Utilidad	Sustentable	Mantenimiento	Fácil operación	Seguridad	Total
Guías lineales	3	2	3	2	2	2	1	15
Chumaceras	2	2	2	2	2	2	1	13
Abrazaderas	1	2	1	2	2	1	1	10
Contenedor de lubricante	-	Ensamble	Utilidad	Sustentable	Mantenimiento	Fácil operación	Seguridad	Total
Lubricación manual	-	1	1	1	2	2	1	8
Recipiente de acrílico	-	2	3	1	2	3	3	14
Sistema de bombeo	-	3	3	1	3	1	1	12
Tipo de lubricante	-	-	Utilidad	Sustentable	Mantenimiento	Fácil operación	Seguridad	Total
Aceite sintético	-	-	3	1	2	3	2	11
Polvo de grafito	-	-	2	3	2	1	2	10
Grasa animal	-	-	2	3	2	1	2	10
Grasa sintética	-	-	2	2	2	2	2	10
Tipos de materiales a utilizar	-	Ensamble	Utilidad	Sustentable	Mantenimiento	Fácil operación	Seguridad	Total
Metálicos	-	2	3	1	2	3	2	13
No metálicos	-	2	2	1	2	3	2	12
Compósitos	-	1	1	1	2	2	2	9
1	Malo							
2	Medio							
3	Mejor							

Figura 48. Evaluación de alternativas.

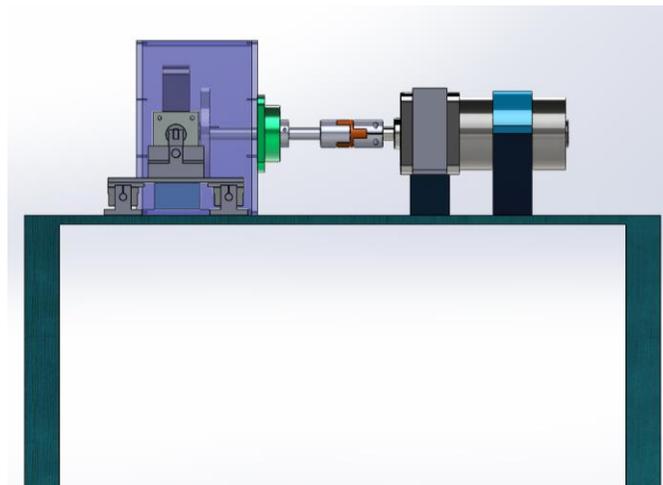
### 5.1.7. Diseño conceptual

Con base a los resultados obtenidos en la Figura 36, se desarrolló la etapa de diseño conceptual, se consideraron los totales más altos de cada sub función como las mejores opciones, lo cual ofrece una buena selección de alternativas. Posteriormente en la Figura 49 se muestra el diseño conceptual, donde se puede ver el motorreductor, acoplamiento de elastómero, el excéntrico, el contenedor o depósito de aceite lubricante entre otros elementos desde una vista isométrica.



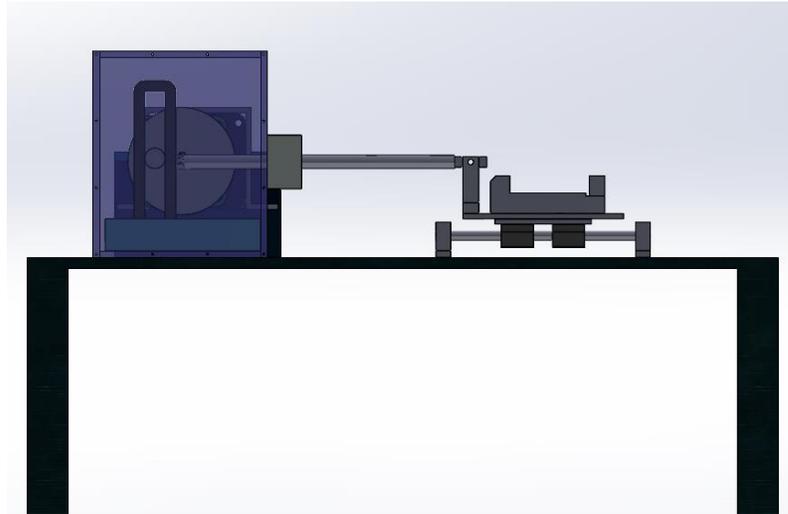
*Figura 49. Diseño conceptual al evaluar alternativas, vista isométrica.*

La Figura 50 muestra una vista lateral del diseño conceptual mostrado con anterioridad.



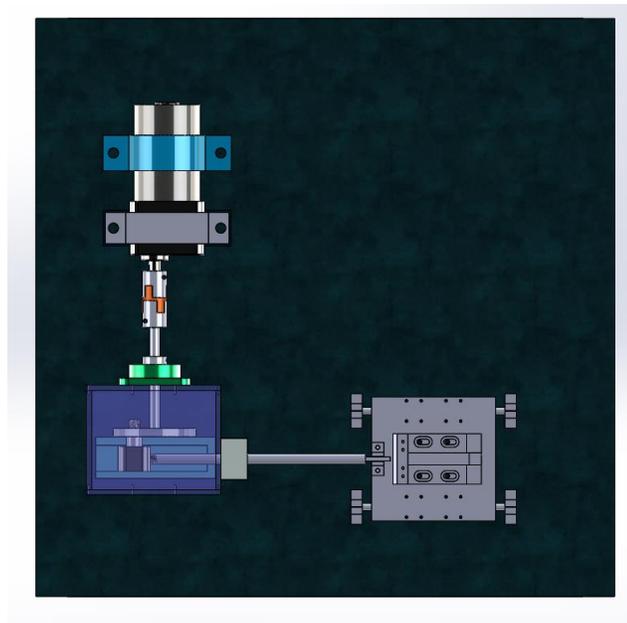
*Figura 50. Vista lateral del diseño conceptual.*

De manera similar, se muestra la vista frontal del diseño conceptual en la Figura 51 mostrada a continuación.



*Figura 51. Vista frontal del diseño conceptual.*

Como figura complementaria a estas vistas mostradas se encuentra la Figura 52, en donde se muestra una vista superior del diseño conceptual.



*Figura 52. Vista superior del diseño conceptual.*

El material utilizado para el mecanismo de yugo escocés fue acero AISI 4340, es acero inoxidable, buen contenido de cromo, resistente a la corrosión y al desgaste, con la única excepción de que en

el rectángulo perteneciente al acoplador se utilizó acero AISI 4140, también se utilizó aluminio para la elaboración de la placa que soporta el tornillo mini, material disponible en el Tecnológico Nacional de México unidad Pachuca.

## 5.2. Cálculo de las frecuencias naturales

Por la parte de vibraciones mecánicas se obtuvo el cálculo de las frecuencias naturales de las probetas con sus dimensiones propuestas, este cálculo se hizo en Microsoft Excel, donde se hizo su análisis a la velocidad rotacional más baja entregada por el motorreductor correspondiente a 200 RPM, se pueden observar datos como desplazamiento, velocidad y aceleración en función del tiempo.

Se muestran las ecuaciones para el cálculo del desplazamiento en el deslizador, la velocidad y su aceleración, el momento de inercia de un rectángulo, la rigidez de una probeta de sección rectangular, el cálculo de la masa de dicha probeta, su frecuencia natural.

La Figura 53 muestra un mecanismo de yugo escocés a manera de que se pueda mostrar como es que surgen las ecuaciones de movimiento, velocidad y aceleración en sus elementos:

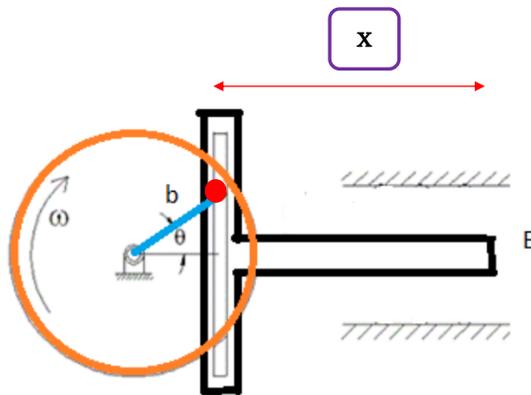


Figura 53. Mecanismo de yugo escocés.

Para calcular el desplazamiento del deslizador de un mecanismo de yugo escocés se emplea la Ecuación 2.

$$\text{Desplazamiento en el punto } B = XB = b \cos \theta + x \quad (2)$$

Ecuación 2. Desplazamiento en el punto B.

Donde  $b$  es la longitud desde el centro del disco hasta el centro del excéntrico (punto rojo),  $x$  es la distancia horizontal desde el excéntrico hasta el punto B, esta distancia siempre es la misma y de manera física esta representada por la suma del radio de ese excéntrico más la longitud del eje que pertenece al acoplador y “ $\theta$ ” es el ángulo que se forma con la horizontal en radianes.

Para calcular la velocidad en el deslizador es suficiente con derivar la ecuación del desplazamiento que se describió antes (Ecuación 3)

$$\text{Velocidad del punto B} = VB = \dot{X}B = -b \text{ Sen } \theta (\dot{\theta}) = -b \omega \text{ Sen } \theta \quad (3)$$

*Ecuación 3. Velocidad del punto B.*

Donde “ $\dot{\theta}$ ” es “ $\omega$ ” y representa la velocidad angular en radianes por segundo como unidades (velocidad rotacional proporcionada por el motor).

Como ecuación final para describir la aceleración en el punto B perteneciente al mecanismo de yugo escocés ejemplificado, se debe derivar con respecto al tiempo la expresión correspondiente a la velocidad VB, obtenida con anterioridad, la Ecuación 4 muestra la aceleración.

$$\begin{aligned} \text{Aceleración del punto B} &= \ddot{X}B = -b [\dot{\theta} \text{ Cos } \theta (\dot{\theta}) + \text{ Sen } \theta (\ddot{\theta})] \\ &= -b (\dot{\theta})^2 \text{ Cos } \theta - b \text{ Sen } \theta (\ddot{\theta}) = -b \omega^2 \text{ Cos } \theta - b \text{ Sen } \theta (\alpha) \end{aligned} \quad (4)$$

*Ecuación 4. Aceleración del punto B.*

Donde “ $\ddot{\theta}$ ” es “ $\alpha$ ” la cual es la aceleración angular, expresada en radianes por segundo al cuadrado. De esta manera, estas ecuaciones se introducen en Excel y se obtienen los valores de desplazamiento, velocidad y aceleración en la siguiente Figura 54.

Velocidad de 200 revoluciones por minuto (velocidad mínima).					
Revolución	Radianes	Grados		Longitud de su acoplador en metros	
1	6.2832	360		l	0.209525
Radio ó excéntrico en metros			Valor de la aceleración angular en la manivela (rad/s <sup>2</sup> )		
b	0.025			$\alpha$	0
Velocidad angular " $\omega$ " de entrada					
$\omega=$	200	rpm			
	20.944	rad/s			
$\omega^2=$	438.651136				
Tiempo (s)	Grados °	Radianes	XB (mts)	VB (m/s)	AB (m/s <sup>2</sup> )
0	0	0	0.234525	0	-10.966278
0.004167	5	0.08726667	0.23442987	-0.0456349	-10.924548
0.008334	10	0.17453333	0.23414519	-0.0909224	-10.799675
0.012501	15	0.2618	0.23367314	-0.135518	-10.59261
0.016668	20	0.34906667	0.23301731	-0.1790821	-10.304928
0.020835	25	0.43633333	0.23218268	-0.2212834	-9.9388188
0.025002	30	0.5236	0.23117562	-0.2618006	-9.497069
0.029169	35	0.61086667	0.23000378	-0.3003252	-8.9830404
0.033336	40	0.69813333	0.22867608	-0.3365642	-8.4006451
0.037503	45	0.7854	0.22720264	-0.3702418	-7.7543156
0.04167	50	0.87266667	0.22559465	-0.4011016	-7.0489707
0.045837	55	0.95993333	0.22386436	-0.4289087	-6.2899787
0.050004	60	1.0472	0.22202495	-0.4534515	-5.4831159
0.054171	65	1.13446667	0.2200904	-0.4745433	-4.6345231
0.058338	70	1.22173333	0.21807544	-0.4920236	-3.7506587
0.062505	75	1.309	0.2159954	-0.5057592	-2.8382493
0.066672	80	1.39626667	0.21386612	-0.5156456	-1.904239
0.070839	85	1.48353333	0.21170381	-0.5216077	-0.9557362
0.075006	90	1.5708	0.20952491	-0.5236	4.0281E-05
0.079173	95	1.65806667	0.20734601	-0.5216074	0.9558165
0.08334	100	1.74533333	0.2051837	-0.515645	1.90431834
0.087507	105	1.8326	0.20305442	-0.5057582	2.8383271
0.091674	110	1.91986667	0.20097439	-0.4920223	3.75073437
0.095841	115	2.00713333	0.19895944	-0.4745417	4.63459616
0.100008	120	2.0944	0.19702489	-0.4534496	5.48318571
0.104175	125	2.18166667	0.19518548	-0.4289065	6.29004471
0.108342	130	2.26893333	0.19345521	-0.4010991	7.04903245
0.112509	135	2.3562	0.19184723	-0.3702391	7.75437255

0.116676	140	2.44346667	0.1903738	-0.3365613	8.40069691		
0.120843	145	2.53073333	0.18904611	-0.3003221	8.98308659		
0.12501	150	2.618	0.18787429	-0.2617972	9.49710925		
0.129177	155	2.70526667	0.18686724	-0.2212799	9.93885283		
0.133344	160	2.79253333	0.18603263	-0.1790785	10.3049554		
0.137511	165	2.8798	0.18537681	-0.1355142	10.5926306		
0.141678	170	2.96706667	0.18490478	-0.0909186	10.7996892		
0.145845	175	3.05433333	0.18462012	-0.045631	10.9245552		
0.150012	180	3.1416	0.184525	3.8466E-06	10.9662784		
0.154179	185	3.22886667	0.18462015	0.04563869	10.9245412		
0.158346	190	3.31613333	0.18490484	0.09092618	10.7996612		
0.162513	195	3.4034	0.18537691	0.13552168	10.5925889		
0.16668	200	3.49066667	0.18603275	0.17908576	10.3049003		
0.170847	205	3.57793333	0.18686739	0.22128689	9.93878473		
0.175014	210	3.6652	0.18787447	0.26180389	9.49702868		
0.179181	215	3.75246667	0.18904632	0.30032839	8.98299418		
0.183348	220	3.83973333	0.19037403	0.33656719	8.40059334		
0.187515	225	3.927	0.19184749	0.37024451	7.75425861		
0.191682	230	4.01426667	0.19345549	0.40110403	7.04890902		
0.195849	235	4.10153333	0.19518579	0.42891089	6.28991273		
0.200016	240	4.1888	0.19702521	0.45345347	5.48304617		
0.204183	245	4.27606667	0.19895977	0.47454497	4.63445013		
0.20835	250	4.36333333	0.20097474	0.49202488	3.75058297		
0.212517	255	4.4506	0.20305478	0.50576017	2.83817146		
0.216684	260	4.53786667	0.20518406	0.5156463	1.90415966		
0.220851	265	4.62513333	0.20734638	0.52160804	0.95565598		
0.225018	270	4.7124	0.20952528	0.5236	-0.0001208		
0.229185	275	4.79966667	0.21170417	0.52160703	-0.9558968		
0.233352	280	4.88693333	0.21386649	0.5156443	-1.9043977		
0.237519	285	4.9742	0.21599576	0.50575719	-2.8384049		
0.241686	290	5.06146667	0.21807578	0.49202094	-3.7508101		
0.245853	295	5.14873333	0.22009073	0.47454009	-4.6346692		
0.25002	300	5.236	0.22202527	0.4534477	-5.4832555		
0.254187	305	5.32326667	0.22386467	0.42890427	-6.2901107		
0.258354	310	5.41053333	0.22559493	0.40109661	-7.0490942		
0.262521	315	5.4978	0.2272029	0.37023635	-7.7544295		
0.266688	320	5.58506667	0.22867632	0.33655835	-8.4007487		
0.270855	325	5.67233333	0.23000399	0.30031893	-8.9831328		
0.275022	330	5.7596	0.2311758	0.26179389	-9.4971495		
0.279189	335	5.84686667	0.23218284	0.22127643	-9.9388869		
0.283356	340	5.93413333	0.23301743	0.17907492	-10.304983		
0.287523	345	6.0214	0.23367324	0.13551053	-10.592651		
0.29169	350	6.10866667	0.23414526	0.09091482	-10.799703		
0.295857	355	6.19593333	0.2344299	0.04562719	-10.924562		
0.300024	360	6.2832	0.234525	-7.693E-06	-10.966278		

Figura 54. Valores obtenidos de desplazamiento, velocidad y aceleración a 200 rpm.

Los valores que se muestran en la gráfica surgen de seleccionar la columna del tiempo (t) y la columna de desplazamiento (XB) mostrado en la tabla anterior, se puede observar que el mayor desplazamiento alcanzado es de 0.234 m hasta 0.184 m como se ve en la siguiente Figura 55.

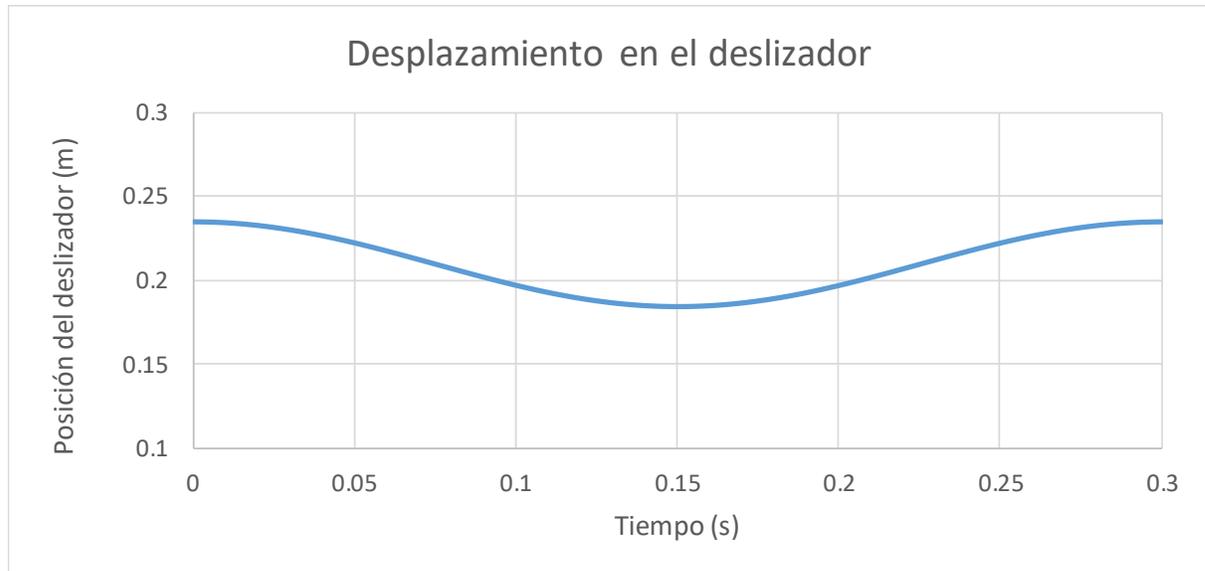


Figura 55. Posición del deslizador contra tiempo a 200 rpm.

En cuanto a la velocidad, de igual forma, se toma la columna de tiempo (t) y también la de VB, en un proceso similar al mencionado con anterioridad, se observa que la velocidad está comprendida entre 0 m/s hasta 0.5236 m/s como velocidad máxima, no olvidemos que esta velocidad está relacionada con las revoluciones por minuto entregadas por el motor que se regulan gracias al reductor, la Figura 56 muestra su gráfica correspondiente.

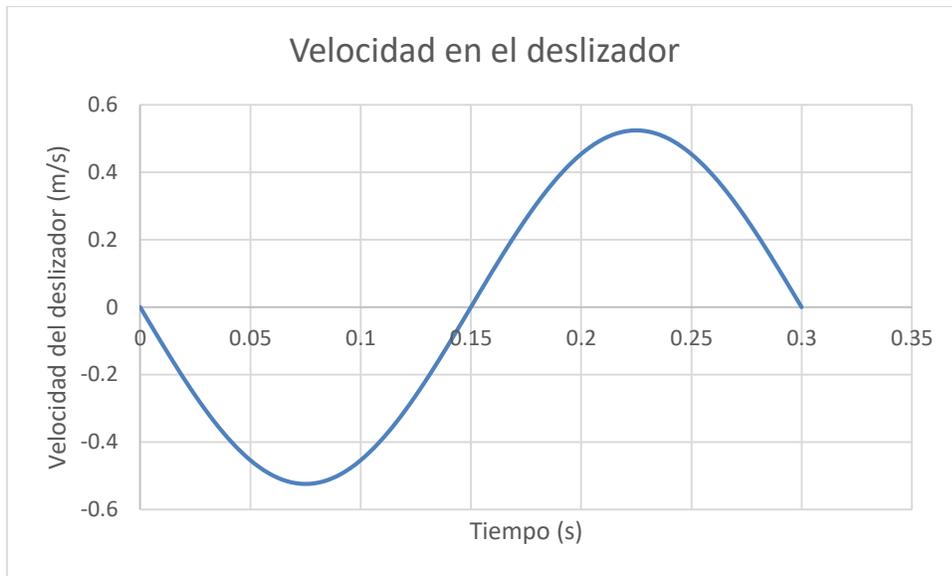


Figura 56. Velocidad en el deslizador contra tiempo a 200 rpm.

Es conveniente mostrar también los resultados de la aceleración, estos se encuentran en un valor de  $0 \text{ m/s}^2$  hasta  $10.9662 \text{ m/s}^2$ , como se ve a continuación en la Figura 57.



Figura 57. Aceleración en el deslizador contra tiempo a 200 rpm.

Cuando el motor está entregando su velocidad rotacional máxima correspondiente a 3000 rpm, es predecible que el desplazamiento máximo no se ve alterado, será de 5cm como máximo en todo

caso, pero la velocidad así como también la aceleración y sus valores, están sujetos a cambios significativos, por ello se elaboró la Figura 58, similar a la anterior mostrada cambiando parámetros de velocidad angular, la cual es la siguiente.

Con velocidad de 3000 revoluciones por minuto (velocidad máxima).					
Revolución	Radianes	Grados	Inserte la longitud de su acoplador (mts)		
1	6.2832	360	1	0.209525	
Inserte un radio ó excéntrico en metros			Aceleración angular (rad/s <sup>2</sup> )		
b	0.025		$\alpha$	0	
Velocidad angular " $\omega$ " de entrada					
$\omega$ =	3000	rpm			
	314.16	rad/s			
$\omega^2$ =	98696.5056				
Tiempo (s)	Grados °	Radianes	XB (mts)	VB (m/s)	AB (m/s <sup>2</sup> )
0	0	0	0.234525	0	-2467.4126
0.004167	5	0.08726667	0.23442987	-0.6845228	-2458.0233
0.008334	10	0.17453333	0.23414519	-1.3638359	-2429.9269
0.012501	15	0.2618	0.23367314	-2.0327694	-2383.3372
0.016668	20	0.34906667	0.23301731	-2.6862322	-2318.6088
0.020835	25	0.43633333	0.23218268	-3.3192511	-2236.2342
0.025002	30	0.5236	0.23117562	-3.9270083	-2136.8405
0.029169	35	0.61086667	0.23000378	-4.5048785	-2021.1841
0.033336	40	0.69813333	0.22867608	-5.0484637	-1890.1452
0.037503	45	0.7854	0.22720264	-5.5536269	-1744.721
0.04167	50	0.87266667	0.22559465	-6.0165234	-1586.0184
0.045837	55	0.95993333	0.22386436	-6.4336303	-1415.2452
0.050004	60	1.0472	0.22202495	-6.8017731	-1233.7011
0.054171	65	1.13446667	0.2200904	-7.1181502	-1042.7677
0.058338	70	1.22173333	0.21807544	-7.3803535	-843.8982
0.062505	75	1.309	0.2159954	-7.5863877	-638.60609
0.066672	80	1.39626667	0.21386612	-7.7346845	-428.45377
0.070839	85	1.48353333	0.21170381	-7.8241155	-215.04065
0.075006	90	1.5708	0.20952491	-7.854	0.00906331
0.079173	95	1.65806667	0.20734601	-7.8241105	215.058712
0.08334	100	1.74533333	0.2051837	-7.7346745	428.471626
0.087507	105	1.8326	0.20305442	-7.5863727	638.623597
0.091674	110	1.91986667	0.20097439	-7.3803338	843.915234
0.095841	115	2.00713333	0.19895944	-7.1181258	1042.78414
0.100008	120	2.0944	0.19702489	-6.8017443	1233.71679
0.104175	125	2.18166667	0.19518548	-6.4335972	1415.26006
0.108342	130	2.26893333	0.19345521	-6.0164863	1586.0323
0.112509	135	2.3562	0.19184723	-5.5535861	1744.73382

0.116676	140	2.44346667	0.1903738	-5.0484195	1890.1568
0.120843	145	2.53073333	0.18904611	-4.5048313	2021.19448
0.12501	150	2.618	0.18787429	-3.9269584	2136.84958
0.129177	155	2.70526667	0.18686724	-3.3191988	2236.24189
0.133344	160	2.79253333	0.18603263	-2.686178	2318.61496
0.137511	165	2.8798	0.18537681	-2.0327137	2383.34189
0.141678	170	2.96706667	0.18490478	-1.3637791	2429.93007
0.145845	175	3.05433333	0.18462012	-0.6844653	2458.02493
0.150012	180	3.1416	0.184525	5.7699E-05	2467.41264
0.154179	185	3.22886667	0.18462015	0.68458028	2458.02177
0.158346	190	3.31613333	0.18490484	1.36389277	2429.92378
0.162513	195	3.4034	0.18537691	2.03282516	2383.33251
0.16668	200	3.49066667	0.18603275	2.68628645	2318.60256
0.170847	205	3.57793333	0.18686739	3.31930338	2236.22656
0.175014	210	3.6652	0.18787447	3.9270583	2136.83145
0.179181	215	3.75246667	0.18904632	4.50492579	2021.17369
0.183348	220	3.83973333	0.19037403	5.04850791	1890.1335
0.187515	225	3.927	0.19184749	5.55366766	1744.70819
0.191682	230	4.01426667	0.19345549	6.01656045	1586.00453
0.195849	235	4.10153333	0.19518579	6.43366336	1415.23036
0.200016	240	4.1888	0.19702521	6.80180199	1233.68539
0.204183	245	4.27606667	0.19895977	7.11817455	1042.75128
0.20835	250	4.36333333	0.20097474	7.38037325	843.881167
0.212517	255	4.4506	0.20305478	7.5864026	638.588579
0.216684	260	4.53786667	0.20518406	7.73469456	428.435923
0.220851	265	4.62513333	0.20734638	7.82412056	215.022596
0.225018	270	4.7124	0.20952528	7.854	-0.0271899
0.229185	275	4.79966667	0.21170417	7.82410548	-215.07677
0.233352	280	4.88693333	0.21386649	7.73466451	-428.48948
0.237519	285	4.9742	0.21599576	7.58635779	-638.64111
0.241686	290	5.06146667	0.21807578	7.38031405	-843.93227
0.245853	295	5.14873333	0.22009073	7.1181014	-1042.8006
0.25002	300	5.236	0.22202527	6.80171544	-1233.7325
0.254187	305	5.32326667	0.22386467	6.43356408	-1415.2749
0.258354	310	5.41053333	0.22559493	6.01644918	-1586.0462
0.262521	315	5.4978	0.2272029	5.55354526	-1744.7466
0.266688	320	5.58506667	0.22867632	5.04837531	-1890.1685
0.270855	325	5.67233333	0.23000399	4.50478399	-2021.2049
0.275022	330	5.7596	0.2311758	3.92690839	-2136.8586
0.279189	335	5.84686667	0.23218284	3.3191465	-2236.2495
0.283356	340	5.93413333	0.23301743	2.68612379	-2318.6212
0.287523	345	6.0214	0.23367324	2.03265796	-2383.3466
0.29169	350	6.10866667	0.23414526	1.3637223	-2429.9332
0.295857	355	6.19593333	0.2344299	0.68440784	-2458.0265
0.300024	360	6.2832	0.234525	-0.0001154	-2467.4126

Figura 58. Valores obtenidos de desplazamiento, velocidad y aceleración a 3000 rpm.

Es adecuado mostrar las nuevas gráficas que surgen con la velocidad máxima en el motor, la Figura 59 de desplazamiento en el deslizador es la siguiente.

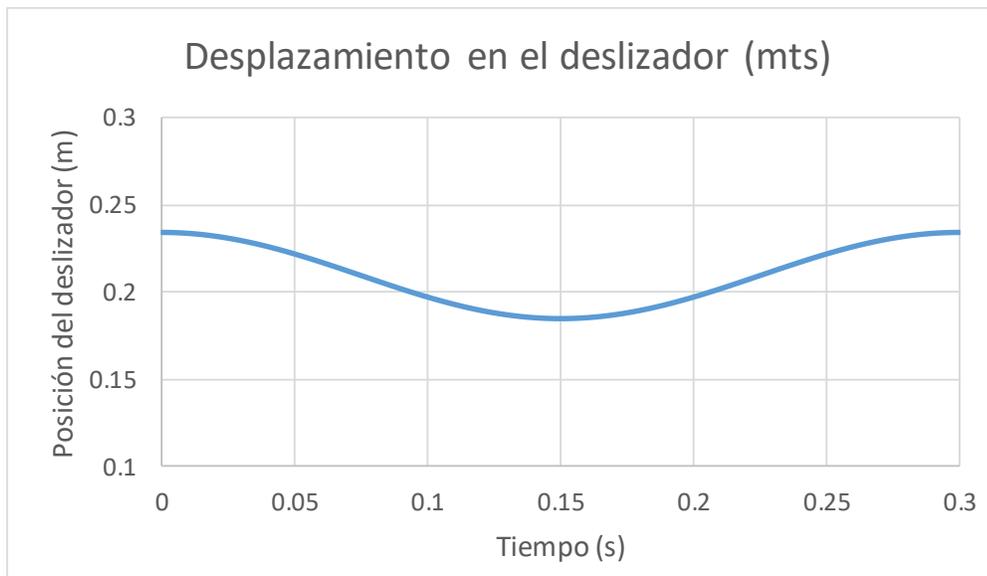


Figura 59. Posición del deslizador contra tiempo a 3000 rpm.

En la siguiente gráfica se muestra la velocidad, la gráfica parece ser la misma que la de la Figura 56 mostrada con anterioridad, sin embargo se puede observar un gran cambio con respecto a sus valores, la velocidad mínima es de 0 m/s y la máxima es de 7.85 m/s, su gráfica es la que se muestra en la Figura 60.



Figura 60. Velocidad en el deslizador contra tiempo a 3000 rpm.

Por último se muestra la gráfica de la aceleración en la Figura 61, de forma similar se puede ver un gran salto en los valores con respecto a la gráfica de aceleración anterior, los valores están comprendidos entre  $0 \text{ m/s}^2$  y  $2467.41 \text{ m/s}^2$ .



Figura 61. Aceleración en el deslizador contra tiempo a 3000 rpm.

Hablando de las probetas que se sujetan a pruebas dinámicas, dichas probetas tienen un comportamiento similar al de una viga en voladizo, de esta manera se pueden usar fórmulas para una viga en voladizo para conocer su rigidez (N/m), su momento de inercia ( $\text{m}^4$ ) y su masa (kg) correspondiente, esto con la finalidad de conocer su frecuencia natural, con respecto a las dimensiones propuestas.

La Ecuación 5 se utilizó para calcular la rigidez.

$$\text{Rigidez} = k = \frac{3 E I}{L^3}$$

Ecuación 5. Rigidez.

donde E representa el modulo de elasticidad del material, fibra de carbono o fibra de vidrio, I es el momento de inercia acorde a su sección transversal y L es la longitud o altura de la probeta.

Para calcular el momento de inercia I para una viga en voladizo se uso la Ecuación 6.

$$\text{Momento de inercia} = I = \frac{1}{12} b h^3$$

Ecuación 6. Momento de inercia.

donde la letra b representa la base y h la altura, en este caso el espesor.

También se calculó, a partir de la Ecuación 7, la masa equivalente en el extremo libre de la probeta acorde a sus dimensiones [25].

$$Masa = m = \frac{33}{140} \rho A L$$

*Ecuación 7. Masa.*

donde  $\rho$  representa la densidad particular correspondiente a cada material, A es el área de la sección transversal y L es la altura de la probeta.

Al obtener la masa y la rigidez de las probetas propuestas se calculó la frecuencia natural a la cual responden con el uso de la Ecuación 8.

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

*Ecuación 8. Frecuencia natural.*

Las unidades de la frecuencia natural son rad/s, la cual se puede convertir a hertz de la siguiente manera, con la Ecuación 9.

$$Hz = \frac{\omega}{2\pi}$$

*Ecuación 9. Hertz.*

En la Figura 62 se muestran los cálculos utilizando las ecuaciones anteriores descritas para la fibra de vidrio con sección rectangular de ½” por 1/16”, se aprecia con la letra E el módulo de elasticidad de cada material en particular y también se hace distinción entre los diferentes valores que hay en sus densidades.



				In	m	Área (m <sup>2</sup> )
Rectángulo sugerido sección transversal			Base	1"	0.0254	4.03225E-05
			Espesor	1/16"	0.0015875	
<b>Fibra de Vidrio</b>	Altura (m)	I (m <sup>4</sup> )	K (N/m)	m (kg)	ω (rad/s)	Hz
	0.1	8.46825E-12	1.99E+03	0.00242367	907.1585218	144.3784253
	0.15		5.91E+02	0.003635505	403.1815652	64.16818902
	0.2		2.49E+02	0.004847341	226.7896304	36.09460632
	0.25		1.28E+02	0.006059176	145.1453635	23.10054805
	0.3		7.39E+01	0.007271011	100.7953913	16.04204725
	0.35		4.65E+01	0.008482846	74.05375688	11.7859939
	0.4		3.12E+01	0.009694681	56.69740761	9.023651581
	0.45		2.19E+01	0.010906516	44.79795169	7.12979878
	0.5		1.60E+01	0.012118351	36.28634087	5.775137012
	0.55		1.20E+01	0.013330186	29.98871146	4.772840506
	0.6		9.23E+00	0.014542022	25.19884783	4.010511814
	0.65		7.26E+00	0.015753857	21.47120762	3.417240835
	0.7		5.81E+00	0.016965692	18.51343922	2.946498475
	0.75		4.73E+00	0.018177527	16.12726261	2.566727561
	0.8		3.90E+00	0.019389362	14.1743519	2.255912895
	0.85		3.25E+00	0.020601197	12.55582729	1.998317305
Sección transversal			Base	1/2"	0.0127	4.03225E-05
			Espesor	1/8"	0.003175	
<b>Fibra de Vidrio</b>	Altura (m)	I (m <sup>4</sup> )	K (N/m)	m (kg)	ω (rad/s)	Hz
	0.1	3.39E-11	7.98E+03	0.00242367	1814.317044	288.7568506
	0.15		2.36E+03	0.003635505	806.3631305	128.336378
	0.2		9.97E+02	0.004847341	453.5792609	72.18921265
	0.25		5.11E+02	0.006059176	290.290727	46.20109609
	0.3		2.95E+02	0.007271011	201.5907826	32.08409451
	0.35		1.86E+02	0.008482846	148.1075138	23.5719878
	0.4		1.25E+02	0.009694681	113.3948152	18.04730316
	0.45		8.76E+01	0.010906516	89.59590339	14.25959756
	0.5		6.38E+01	0.012118351	72.57268174	11.55027402
	0.55		4.80E+01	0.013330186	59.97742293	9.545681011
	0.6		3.69E+01	0.014542022	50.39769566	8.021023627
	0.65		2.91E+01	0.015753857	42.94241523	6.834481671
	0.7		2.33E+01	0.016965692	37.02687844	5.892996951
	0.75		1.89E+01	0.018177527	32.25452522	5.133455122
	0.8		1.56E+01	0.019389362	28.34870381	4.51182579
	0.85		1.30E+01	0.020601197	25.11165458	3.99663461

Figura 63. Diferencia de valores entre secciones transversales diferentes.

Estos valores únicamente representan cálculos hechos con el material de fibra de vidrio utilizado en las probetas.

También se elaboraron los cálculos para las frecuencias naturales cambiando el material, ahora se utilizó fibra de carbono, donde el módulo de elasticidad con respecto a la fibra de vidrio es diferente así como también la densidad de dicho material, se usaron las mismas secciones transversales y

mismos valores destinados para la longitud para saber que tanto varían sus frecuencias naturales. A continuación se muestra la Figura 64 donde se puede notar como cambian los valores.

Fibra de Carbono	Altura (m)	I (m <sup>4</sup> )	K (N/m)	m (kg)	$\omega$ (rad/s)	Hz
	0.1	4.23413E-12	3.02E+03	0.000841156	1895.800492	301.7253138
	0.15		8.96E+02	0.001261734	842.5779963	134.1001395
	0.2		3.78E+02	0.001682312	473.9501229	75.43132845
	0.25		1.93E+02	0.00210289	303.3280787	48.27605021
	0.3		1.12E+02	0.002523468	210.6444991	33.52503487
	0.35		7.05E+01	0.002944047	154.7592238	24.63063786
	0.4		4.72E+01	0.003364625	118.4875307	18.85783211
	0.45		3.32E+01	0.003785203	93.61977736	14.9000155
	0.5		2.42E+01	0.004205781	75.83201966	12.06901255
	0.55		1.82E+01	0.004626359	62.67109063	9.974390538
	0.6		1.40E+01	0.005046937	52.66112477	8.381258716
	0.65		1.10E+01	0.005467515	44.87101755	7.141427545
	0.7		8.81E+00	0.005888093	38.68980595	6.157659465
	0.75		7.17E+00	0.006308671	33.70311985	5.364005578
	0.8		5.90E+00	0.006729249	29.62188268	4.714458028
	0.85		4.92E+00	0.007149827	26.23945317	4.176128911

Figura 64. Frecuencias naturales y Hertz para probetas de fibra de carbono.

De la misma manera como ocurrió con la fibra de vidrio se hizo el cambio en las dimensiones de su sección transversal, obteniendo como resultado la Figura 65.



deformación máxima que sufren los elementos y corroborar que esta deformación sea pequeña, tal que los componentes puedan trabajar de manera correcta.

Hablando del eje conductor, este eje conductor soporta una carga que es el peso del disco del yugo escocés y el torque como producto de la transferencia de la carga generada en el motor, el mallado es de 3 mm, hay que destacar también que tiene un soporte que resulta ser el balero de pared, entre estos dos elementos se genera un contacto el cual se ve a continuación en la Figura 66.

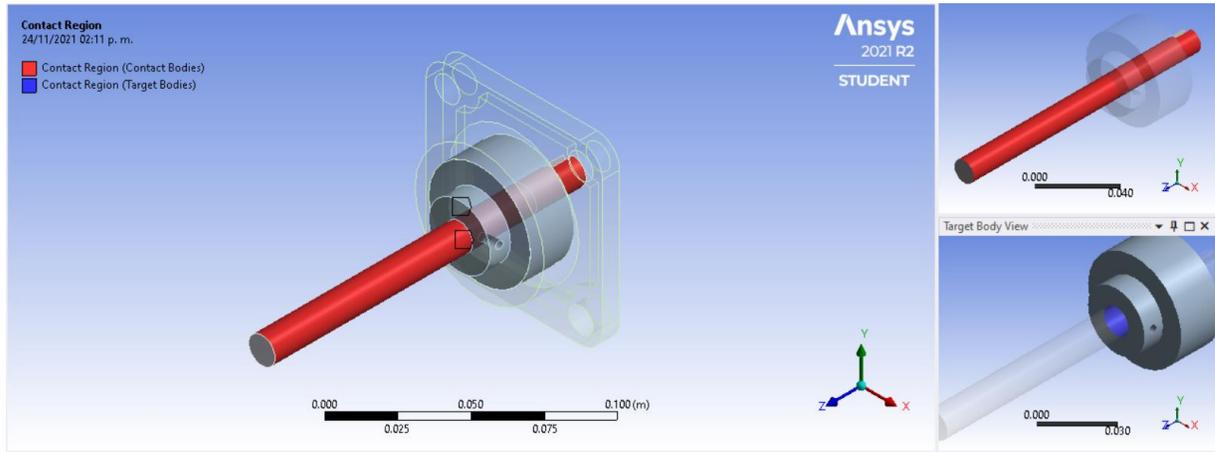


Figura 66. Región de contacto entre el eje principal y el balero de pared.

Es de nuestro interés conocer los esfuerzos a los que está sujeto el eje, los cuales se muestran a continuación en la Figura 67, donde se aprecia que el máximo esfuerzo corresponde a  $4.8144 \times 10^7$  Pa equivalentes a 48.144 MPa correspondiente a un valor que está muy por debajo del límite de resistencia a la fluencia ( $S_Y$ ) del acero 4340.

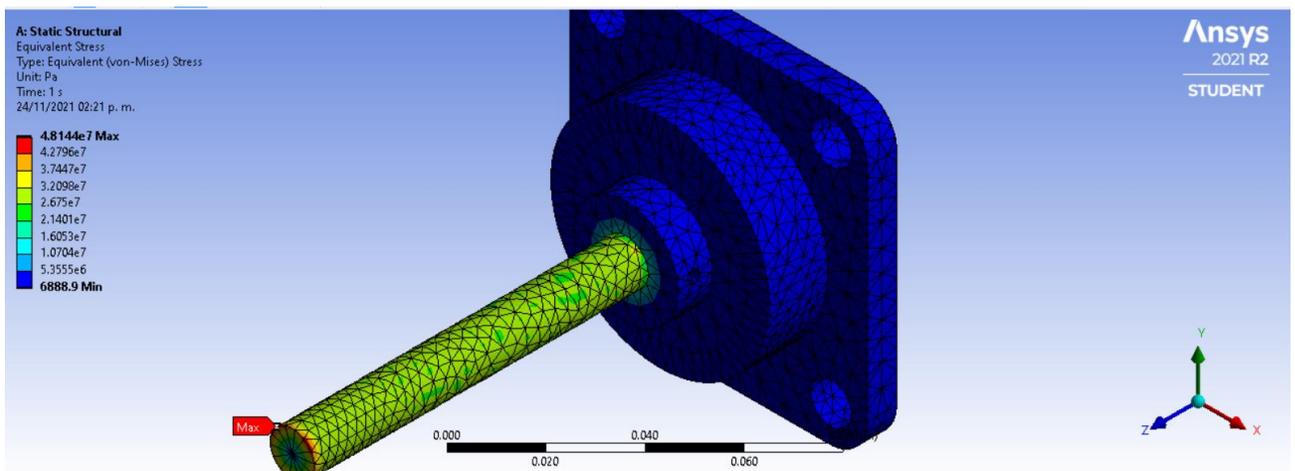


Figura 67. Esfuerzo equivalente de Von-Mises en eje conductor.

Y como resultado final de este análisis se muestra la deformación total máxima que sufre el eje conductor en la Figura 68.

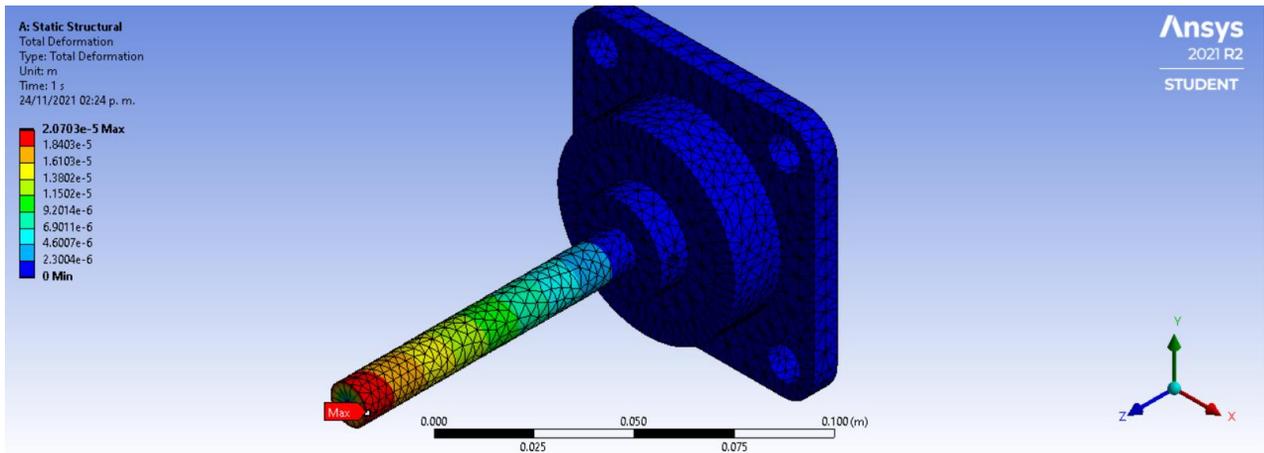


Figura 68. Deformación total máxima en el eje conductor.

Otro análisis que se elaboró es el del disco del yugo escocés y su perno excéntrico, se hizo un análisis estático estructural para saber si el perno no se deformaría con una carga horizontal. El mallado que se solicitó fue de 3 mm con refinamiento en partes donde se espera concentración de esfuerzos nivel 3: como se ve en la Figura 69.

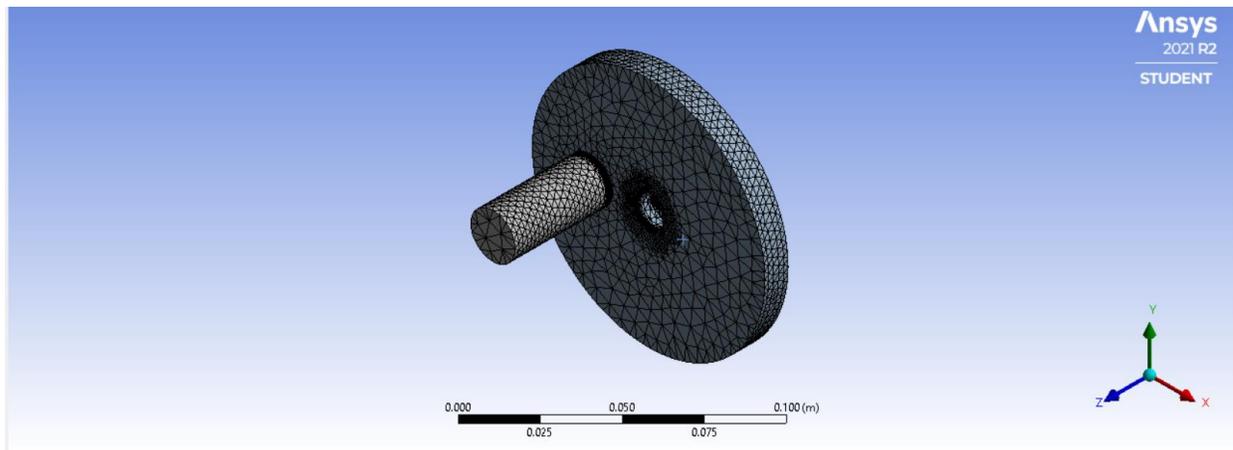


Figura 69. Mallado y refinamiento en el disco y perno excéntrico.

Se insertó una carga en el extremo del perno excéntrico, la carga está asociada a la cara del acoplador que está en contacto con el perno excéntrico sobre el eje x, sin embargo como condición extrema solo se concentró en la arista más lejana del excéntrico hasta el disco, la Figura 70 muestra la descripción, el torque también está considerado ya que también pasa desde el eje conductor al disco del yugo escocés.

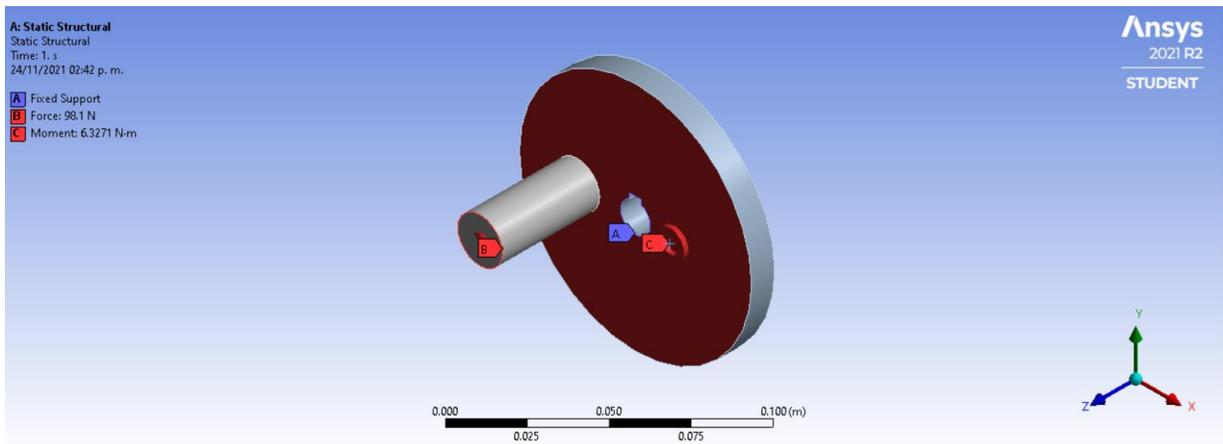


Figura 70. Cargas a las que está sujeto el disco y perno excéntrico.

Como resultado se obtuvo el esfuerzo de Von – Mises, para saber si es que se llega o no al límite de resistencia a la fluencia, la Figura 71 muestra el valor de esfuerzo, este esfuerzo aparece en la cara anterior al disco con un valor máximo de  $1.7682 \times 10^8$  Pa equivalentes a 176.82 MPa.

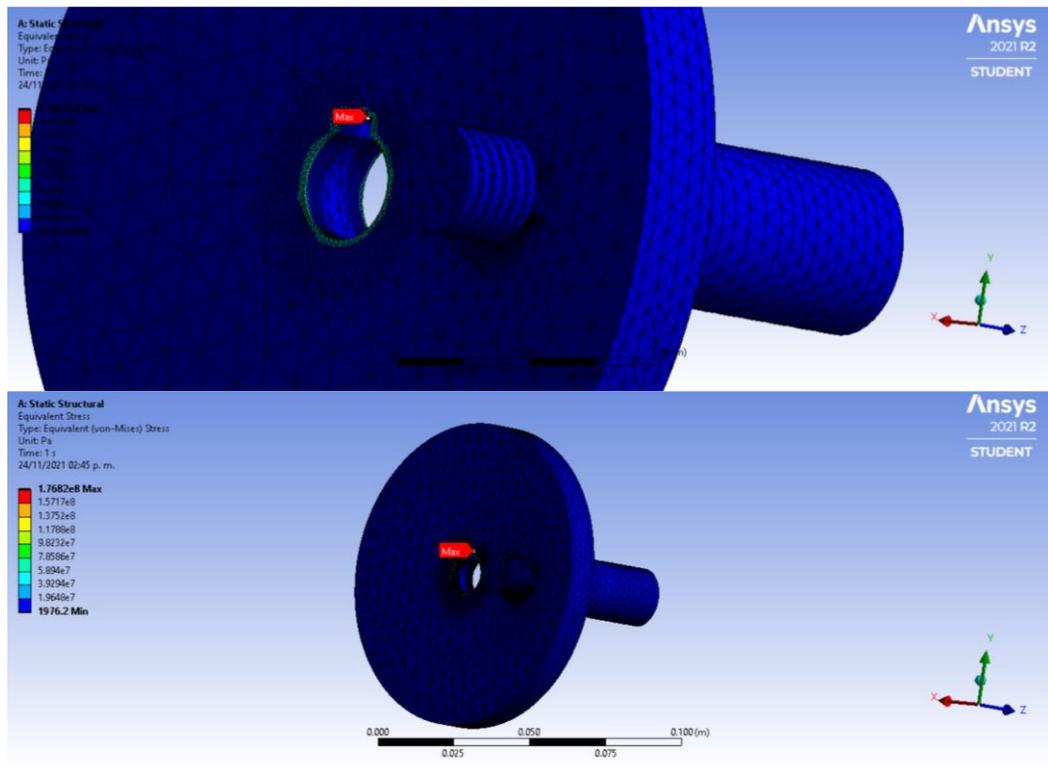


Figura 71. Esfuerzo de Von – Mises en disco de yugo escocés.

La deformación total máxima que se sufre en este ensamble se espera que sea en el perno excéntrico, ya que este está actuando como viga en voladizo, este elemento esta al contrario de

donde se sujeta el disco, por lo cual es evidente que ahí se espera la deformación máxima como se puede apreciar en la Figura 72, donde la máxima deformación en el elemento es de  $9.2344 \times 10^{-6}$  m.

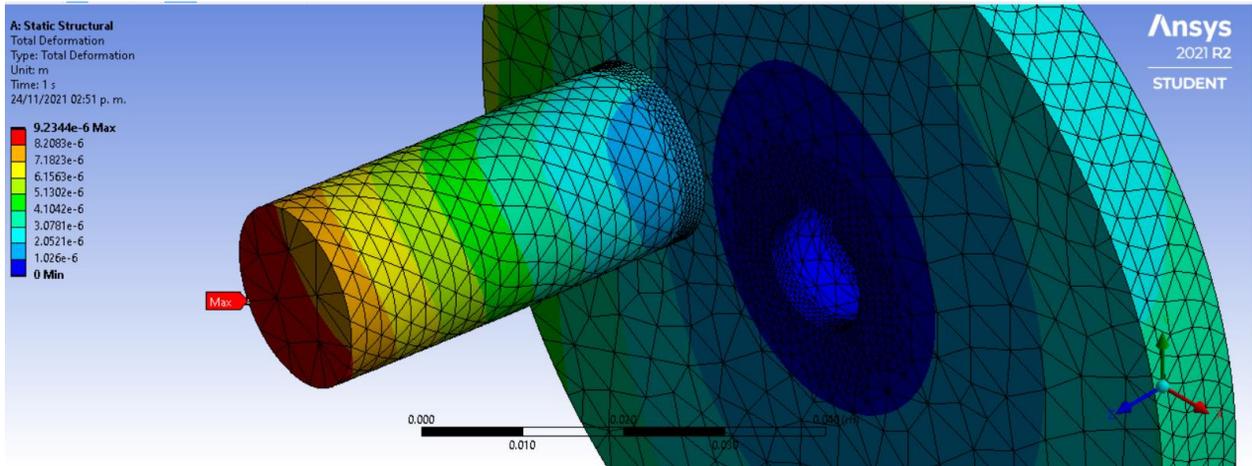


Figura 72. Deformación máxima ubicada en el perno excéntrico.

También se hizo el cálculo del esfuerzo de Von-Mises y deformación máxima generada en el acoplador dado que es el eje de salida el elemento que experimenta el vaivén producido por el disco del yugo escocés, de forma que se verificó que no se rebasara su límite de resistencia permitido o que se deformara tanto que no pudiera cumplir con su función de manera adecuada. En la Figura 73 se puede apreciar el valor más alto en pascales (Pa) que experimenta este eje correspondiente a  $3.9424 \times 10^6$  Pa equivalentes a 3.9424 MPa.

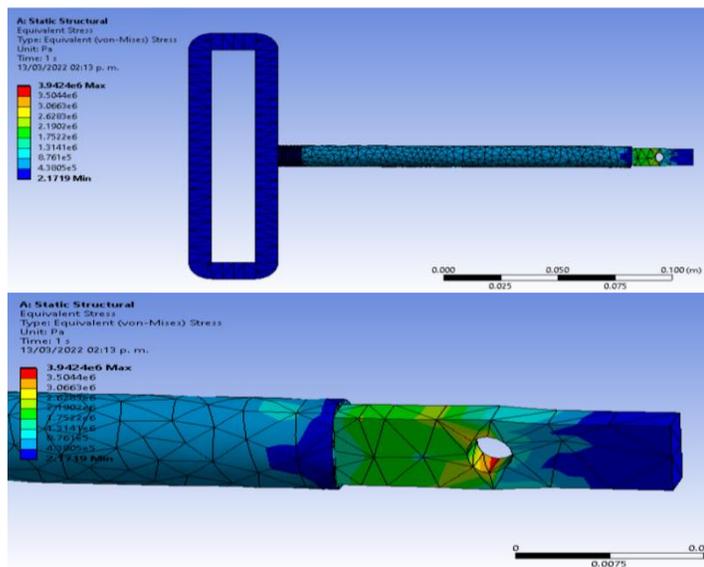


Figura 73. Esfuerzo de Von-Mises en eje de salida.

Como parte final de este elemento se solicitó la deformación total máxima donde se obtuvo un valor de  $8.9936 \times 10^{-7}$  m, lo cual es una dimensión permitida, la Figura 74 muestra el análisis.

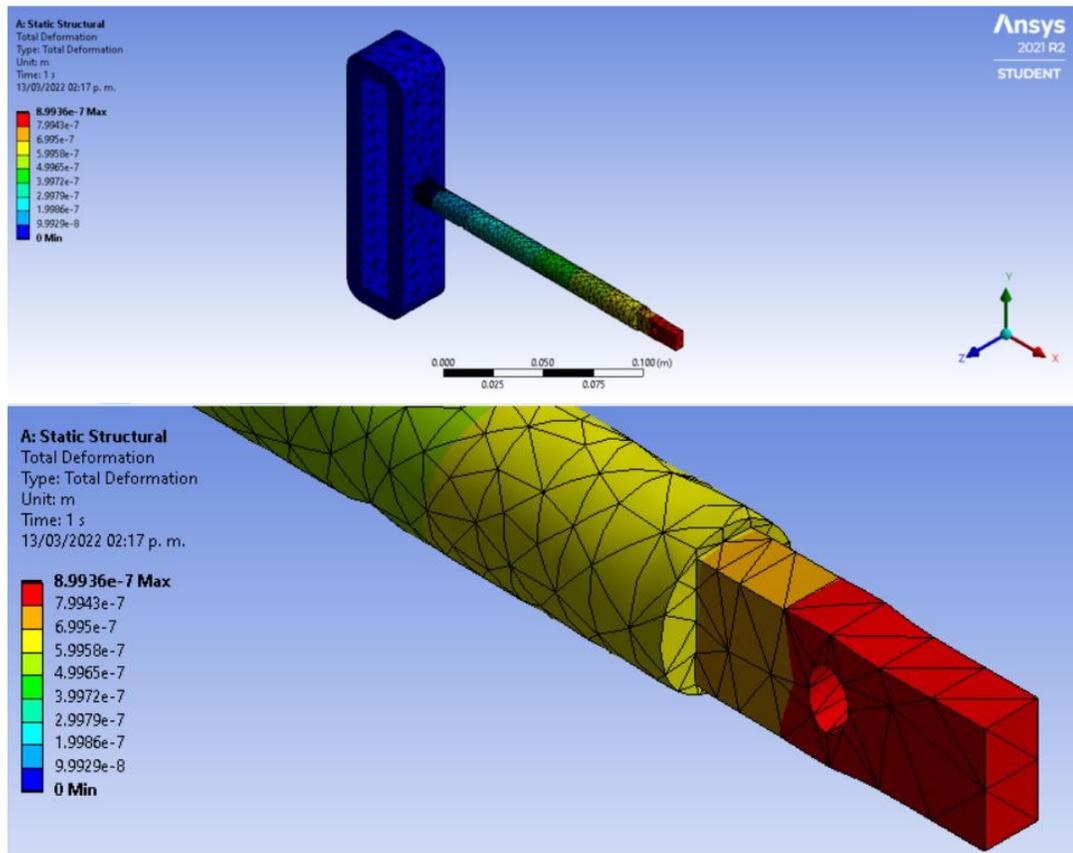


Figura 74. Deformación total máxima en el eje de salida.

#### 5.4. Análisis numérico de la cámara de temperatura

Se hizo el análisis numérico con respecto a la cámara de calentamiento en el software Ansys, propiamente utilizando únicamente a las placas y las resistencias en el modelo, este análisis se realizó para determinar en qué orientación conviene colocar las resistencias, equidistantes, que calentarán la placa de aluminio de manera que se pueda apreciar que la temperatura sea homogénea a lo largo de las placas de aluminio, dentro de Ansys workbench se usó el módulo de “transient thermal” (análisis térmico transitorio), para evaluar la propagación de la temperatura usando 3 resistencias de manera vertical y horizontal, posteriormente se repitió el análisis pero cambiando el número de resistencias a 6, de igual manera, de forma vertical y posteriormente horizontal, como se muestra en la siguiente Figura 75.

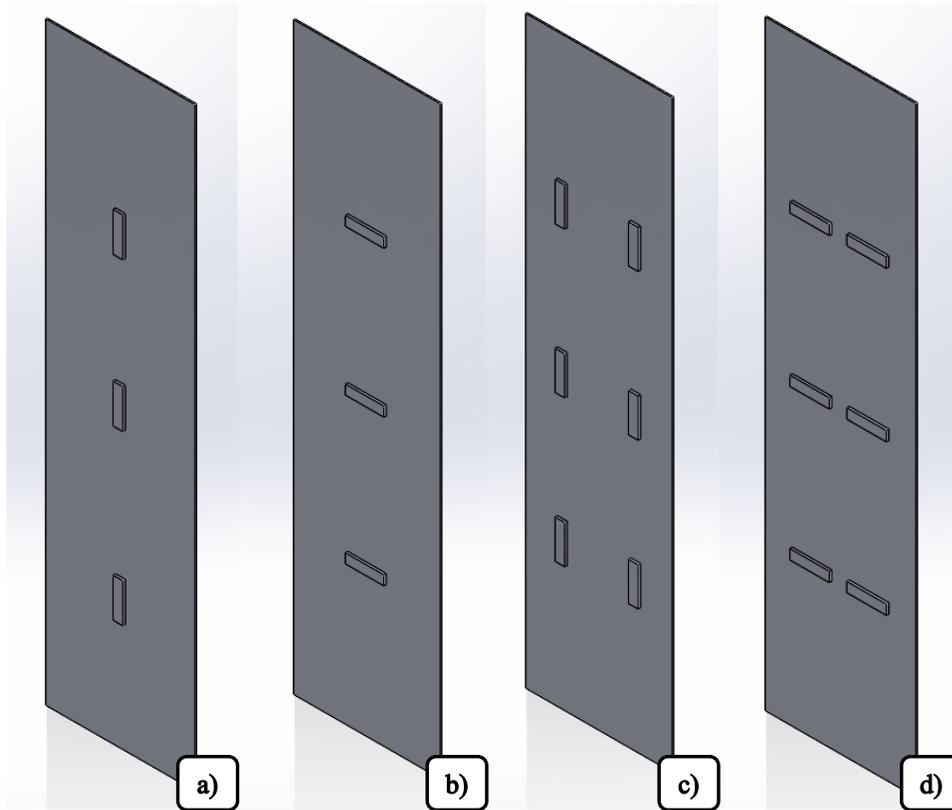


Figura 75. Placa de aluminio a)3 resistencias orientación vertical, b)3 resistencias orientación horizontal, c) 6 resistencias orientación vertical y d) 6 resistencias orientación horizontal.

Se insertó un tamaño de malla de 10 mm en todos los análisis, este tamaño de malla es el mismo que se aplicó en las resistencias, como se puede apreciar en la Figura 76.

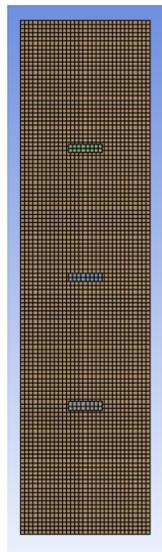


Figura 76. Tamaño de malla.

En las condiciones frontera del análisis térmico transitorio se colocó convección natural perteneciente al aire, y temperatura en las resistencias, como se puede apreciar en la Figura 77, cabe mencionar que el número de pasos puede ser declarado por cualquier número, y el incremento de pasos se declara en segundos, en este caso el incremento de pasos se declaró de 1 s, y un número de pasos de 30, lo cual resulta en un análisis comprendido en un lapso de 30 s, posteriormente se modificó el número de pasos con 60, 180, 300 y 600, de igual manera estos números corresponden al tiempo que se está analizando en Ansys, los cuales corresponden a 60 segundos (1 min), 180 segundos (3 min), 300 segundos (5 min) y 600 segundos (10 min) respectivamente.

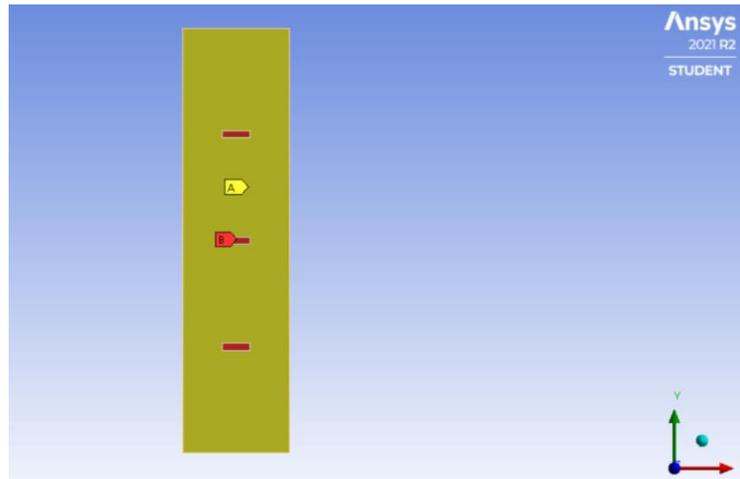


Figura 77. Condiciones de frontera.

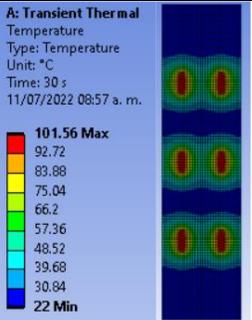
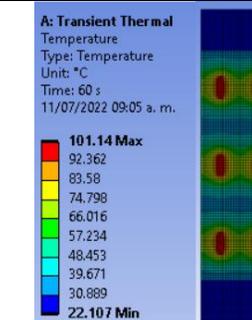
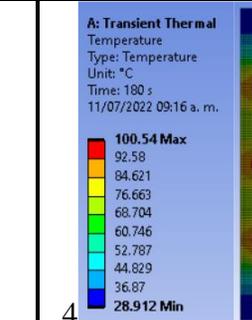
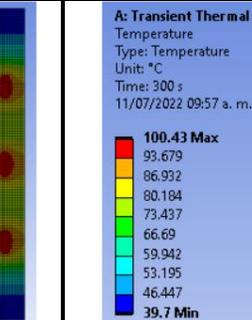
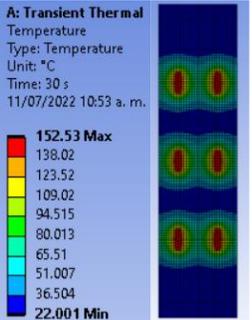
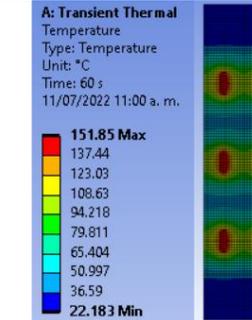
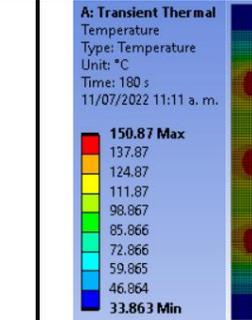
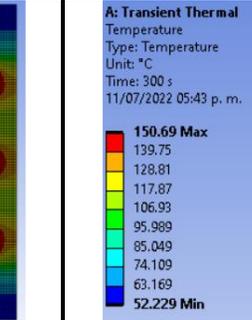
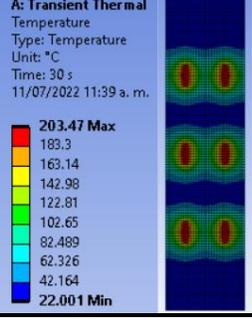
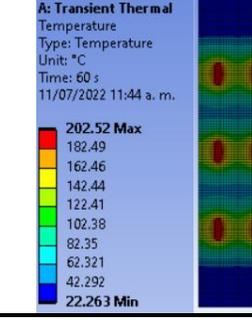
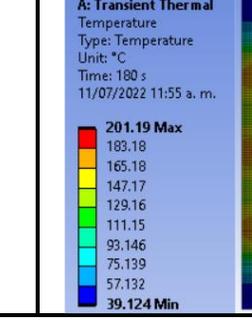
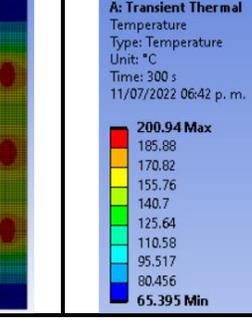
En la solución se solicitó la temperatura en la placa, de manera que se pudiera apreciar la distribución de temperatura, para comprobar cómo es que se comporta según la orientación de las resistencias, en la tabla 6 se tiene el primer análisis en la placa, en la primer columna se muestra el número de resistencias, en la columna siguiente se muestra la temperatura a la que se encuentran las resistencias, y en las siguientes se muestra el tiempo que se evaluó según cada análisis.

Tabla 6. 3 resistencias con orientación vertical.

Numero de Resistencias	Temperatura (°C)	Tiempo (s)			
		30	60	180	300
3	100	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 30 s 12/07/2022 04:18 p. m.</p> <p><b>101.03 Max</b> 92.249 83.468 74.687 65.905 57.124 48.343 39.562 30.781 <b>22 Min</b></p>	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 60 s 12/07/2022 04:21 p. m.</p> <p><b>100.87 Max</b> 92.106 83.347 74.587 65.828 57.068 48.309 39.549 30.79 <b>22.03 Min</b></p>	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 180 s 12/07/2022 04:31 p. m.</p> <p><b>100.61 Max</b> 92.267 83.924 75.581 67.238 58.895 50.552 42.208 33.865 <b>25.522 Min</b></p>	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 300 s 12/07/2022 04:46 p. m.</p> <p><b>100.46 Max</b> 92.9 85.34 77.781 70.221 62.661 55.102 47.542 39.982 <b>32.423 Min</b></p>
	150	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 30 s 12/07/2022 05:20 p. m.</p> <p><b>151.68 Max</b> 137.27 122.86 108.45 94.043 79.635 65.226 50.817 36.409 <b>22 Min</b></p>	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 60 s 12/07/2022 05:24 p. m.</p> <p><b>151.41 Max</b> 137.04 122.66 108.29 93.918 79.545 65.171 50.798 36.425 <b>22.051 Min</b></p>	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 180 s 12/07/2022 05:33 p. m.</p> <p><b>150.99 Max</b> 137.33 123.66 110 96.335 82.671 69.007 55.343 41.679 <b>28.016 Min</b></p>	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 300 s 12/07/2022 07:21 p. m.</p> <p><b>150.74 Max</b> 138.41 126.08 113.76 101.43 89.099 76.771 64.443 52.115 <b>39.787 Min</b></p>
	200	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 30 s 12/07/2022 07:59 p. m.</p> <p><b>202.3 Max</b> 182.27 162.24 142.2 122.17 102.14 82.101 62.068 42.034 <b>22 Min</b></p>	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 60 s 12/07/2022 08:04 p. m.</p> <p><b>201.94 Max</b> 181.95 161.97 141.98 122 102.01 82.028 62.044 42.059 <b>22.074 Min</b></p>	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 180 s 13/07/2022 10:21 a. m.</p> <p><b>201.35 Max</b> 182.39 163.42 144.45 125.49 106.52 87.552 68.584 49.617 <b>30.65 Min</b></p>	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 300 s 13/07/2022 10:37 a. m.</p> <p><b>201.01 Max</b> 183.96 166.9 149.85 132.8 115.75 98.702 81.652 64.601 <b>47.551 Min</b></p>

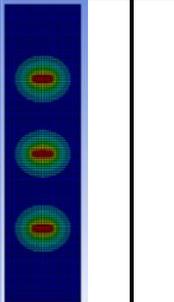
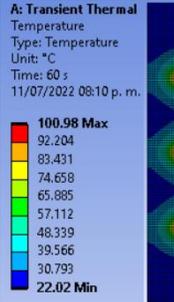
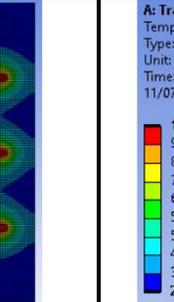
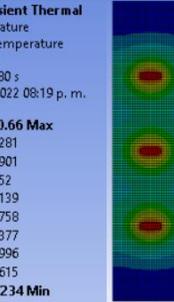
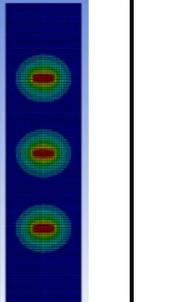
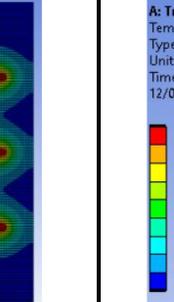
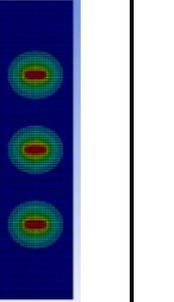
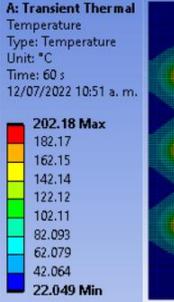
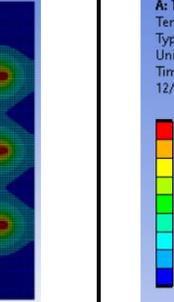
En la tabla 7 se muestran ahora 6 resistencias de manera vertical, misma temperatura entre éstas y mismo tiempo de simulación.

Tabla 7. 6 resistencias con orientación vertical.

Numero de Resistencias	Temperatura (°C)	Tiempo (s)			
		30	60	180	300
6	100	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 30 s 11/07/2022 08:57 a. m.</p> <p>101.56 Max 92.72 83.88 75.04 66.2 57.36 48.52 39.68 30.84 22 Min</p> 	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 60 s 11/07/2022 09:05 a. m.</p> <p>101.14 Max 92.362 83.58 74.798 66.016 57.234 48.453 39.671 30.889 22.107 Min</p> 	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 180 s 11/07/2022 09:16 a. m.</p> <p>100.54 Max 92.58 84.621 76.663 68.704 60.746 52.787 44.829 36.87 28.912 Min</p> 	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 300 s 11/07/2022 09:57 a. m.</p> <p>100.43 Max 93.679 86.932 80.184 73.437 66.69 59.942 53.195 46.447 39.7 Min</p> 
	150	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 30 s 11/07/2022 10:53 a. m.</p> <p>152.53 Max 138.02 123.52 109.02 94.515 80.013 65.51 51.007 36.504 22.001 Min</p> 	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 60 s 11/07/2022 11:00 a. m.</p> <p>151.85 Max 137.44 123.03 108.63 94.218 79.811 65.404 50.997 36.59 22.183 Min</p> 	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 180 s 11/07/2022 11:11 a. m.</p> <p>150.87 Max 137.87 124.87 111.87 98.867 85.866 72.866 59.865 46.864 33.863 Min</p> 	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 300 s 11/07/2022 05:43 p. m.</p> <p>150.69 Max 139.75 128.81 117.87 106.93 95.989 85.049 74.109 63.169 52.229 Min</p> 
	200	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 30 s 11/07/2022 11:39 a. m.</p> <p>203.47 Max 183.3 163.14 142.98 122.81 102.65 82.489 62.326 42.164 22.001 Min</p> 	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 60 s 11/07/2022 11:44 a. m.</p> <p>202.52 Max 182.49 162.46 142.44 122.41 102.38 82.35 62.321 42.292 22.263 Min</p> 	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 180 s 11/07/2022 11:55 a. m.</p> <p>201.19 Max 183.18 165.18 147.17 129.16 111.15 93.146 75.139 57.132 39.124 Min</p> 	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 300 s 11/07/2022 06:42 p. m.</p> <p>200.94 Max 185.88 170.82 155.76 140.7 125.64 110.58 95.517 80.456 65.395 Min</p> 

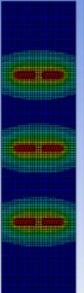
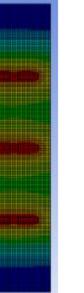
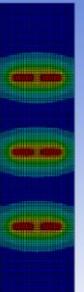
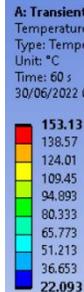
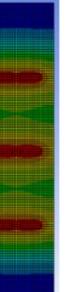
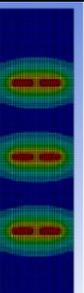
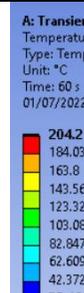
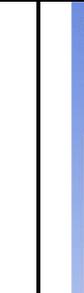
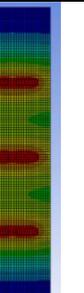
En la tabla 8 se puede apreciar como las resistencias ahora están orientadas de manera horizontal, esto con la finalidad de poder apreciar una comparativa entre las 2 posibles configuraciones que existen entre las resistencias verticales y horizontales.

Tabla 8. 3 resistencias con orientación horizontal.

Numero de Resistencias	Temperatura (°C)	Tiempo (s)			
		30	60	180	300
<3	100	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 30 s 11/07/2022 08:06 p. m.</p> <p>101.16 Max 92.369 83.573 74.777 65.98 57.184 48.388 39.592 30.796 22 Min</p> 	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 60 s 11/07/2022 08:10 p. m.</p> <p>100.98 Max 92.204 83.431 74.658 65.885 57.112 48.339 39.566 30.793 22.02 Min</p> 	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 180 s 11/07/2022 08:19 p. m.</p> <p>100.66 Max 92.281 83.901 75.52 67.139 58.758 50.377 41.996 33.615 25.234 Min</p> 	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 300 s 11/07/2022 08:34 p. m.</p> <p>100.48 Max 92.87 85.257 77.644 70.031 62.418 54.804 47.191 39.578 31.965 Min</p> 
	150	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 30 s 12/07/2022 09:44 a. m.</p> <p>151.9 Max 137.46 123.03 108.6 94.165 79.732 65.299 50.866 36.433 22 Min</p> 	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 60 s 12/07/2022 09:50 a. m.</p> <p>151.59 Max 137.2 122.8 108.41 94.011 79.615 65.22 50.825 36.429 22.034 Min</p> 	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 180 s 12/07/2022 10:00 a. m.</p> <p>151.07 Max 137.34 123.62 109.89 96.164 82.437 68.709 54.982 41.255 27.528 Min</p> 	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 300 s 12/07/2022 10:15 a. m.</p> <p>150.77 Max 138.36 125.94 113.52 101.1 88.686 76.269 63.851 51.433 39.016 Min</p> 
	200	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 30 s 12/07/2022 10:47 a. m.</p> <p>202.6 Max 182.53 162.47 142.4 122.33 102.27 82.2 62.133 42.067 22 Min</p> 	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 60 s 12/07/2022 10:51 a. m.</p> <p>202.18 Max 182.17 162.15 142.14 122.12 102.11 82.093 62.079 42.064 22.049 Min</p> 	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 180 s 12/07/2022 11:00 a. m.</p> <p>201.46 Max 182.4 163.35 144.29 125.24 106.18 87.125 68.069 49.013 29.957 Min</p> 	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 300 s 12/07/2022 11:11 a. m.</p> <p>201.05 Max 183.87 166.69 149.52 132.34 115.16 97.986 80.809 63.632 46.454 Min</p> 

Por último, en la tabla 9 podemos apreciar 6 resistencias orientadas de manera horizontal.

Tabla 9. 6 resistencias con orientación horizontal.

Numero de Resistencias	Temperatura (°C)	Tiempo (s)			
		30	60	180	300
6	100	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 30 s 30/06/2022 11:23 a. m.</p> <p>102.64 Max 93.684 84.724 75.763 66.803 57.842 48.882 39.921 30.961 22 Min</p> 	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 60 s 30/06/2022 11:31 a. m.</p> <p>101.94 Max 93.066 84.19 75.313 66.437 57.56 48.684 39.807 30.931 22.054 Min</p> 	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 180 s 30/06/2022 07:55 p. m.</p> <p>100.96 Max 92.823 84.69 76.557 68.425 60.292 52.159 44.027 35.894 27.761 Min</p> 	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 300 s 30/06/2022 08:31 p. m.</p> <p>100.57 Max 93.576 86.58 79.584 72.588 65.593 58.597 51.601 44.605 37.61 Min</p> 
	150	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 30 s 30/06/2022 08:35 p. m.</p> <p>154.28 Max 139.58 124.88 110.19 95.488 80.791 66.093 51.395 36.698 22 Min</p> 	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 60 s 30/06/2022 08:40 p. m.</p> <p>153.13 Max 138.57 124.01 109.45 94.893 80.333 65.773 51.213 36.653 22.093 Min</p> 	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 180 s 30/06/2022 08:50 p. m.</p> <p>151.52 Max 138.23 124.93 111.64 98.35 85.058 71.766 58.474 45.182 31.89 Min</p> 	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 300 s 30/06/2022 08:50 p. m.</p> <p>150.9 Max 139.54 128.18 116.82 105.46 94.105 82.746 71.388 60.03 48.671 Min</p> 
	200	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 30 s 01/07/2022 10:04 a. m.</p> <p>205.85 Max 185.42 164.99 144.57 124.14 103.71 83.283 62.855 42.428 22 Min</p> 	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 60 s 01/07/2022 10:09 a. m.</p> <p>204.27 Max 184.03 163.8 143.56 123.32 103.08 82.847 62.609 42.372 22.134 Min</p> 	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 180 s 01/07/2022 10:21 a. m.</p> <p>202.05 Max 183.63 165.21 146.79 128.37 109.95 91.537 73.118 54.7 36.282 Min</p> 	<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 300 s 01/07/2022 10:37 a. m.</p> <p>201.2 Max 185.54 169.89 154.24 138.58 122.93 107.28 91.622 75.969 60.315 Min</p> 

Hay que mencionar que en las Tablas 6,7,8 y 9, de forma general, la temperatura empieza a verse uniforme a partir de 180 segundos de análisis, los nodos que se alcanzan a observar en las columnas correspondientes a 30 y 60 segundos empiezan a unirse y se puede apreciar en la columna de 180 segundos propiamente, conforme va pasando el tiempo, a lo largo de la placa, la temperatura comienza a verse uniforme, lo cual resulta conveniente dado que buscamos homogeneizar la temperatura dentro de la cavidad cerrada donde se encuentra la probeta.

Otro punto importante a notar, es que las resistencias posicionadas de manera horizontal presentan una mejor distribución de temperatura en un menor tiempo de simulación a lo largo de la placa que las resistencias posicionadas de manera vertical, de manera horizontal se empiezan a formar secciones uniformes dando la impresión de ser líneas horizontales, a diferencia que en las verticales, en las cuales se muestran como nodos o puntos correspondientes a las resistencias.

Con base al análisis numérico obtenido por medio de las tablas mostradas anteriormente, se propuso la siguiente propuesta para el acomodo de las placas de aluminio en la cámara de temperatura, imagen que se puede apreciar en la Figura 78.

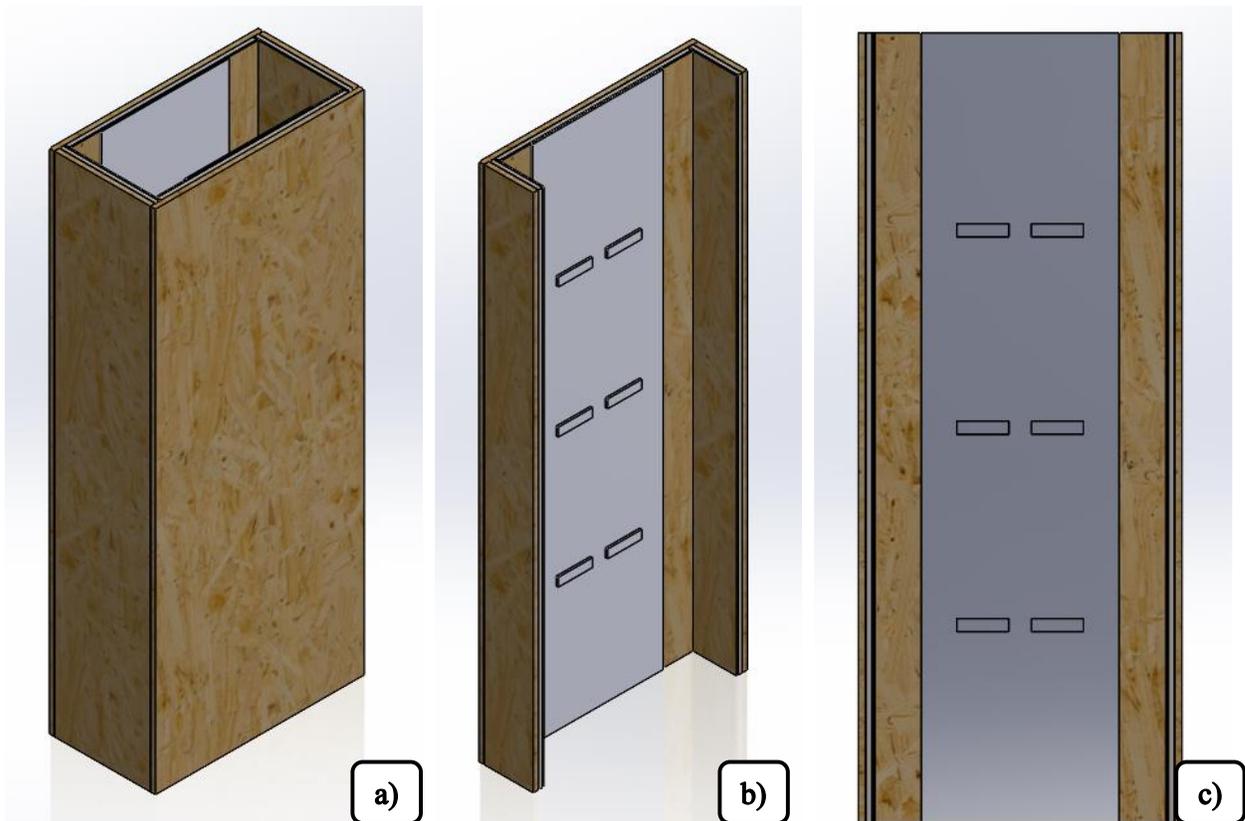


Figura 78. Cámara de temperatura a) Vista isométrica, b) Vista de sección, c) Vista lateral derecha.

Se propone que la probeta esté siendo perturbada, y que este análisis ocurra de forma centrada dentro de la cámara de temperatura, ya habíamos mencionado que se requiere que la probeta no tenga contacto con las paredes de la cámara, por ello resulta conveniente que este centrada, entonces, posteriormente se realizó la construcción de la cámara, la cual luce con sus componentes reales en la Figura 79 que se muestra a continuación.



*Figura 79. Cámara de temperatura real.*

### **5.5. Ensamble de la plataforma**

En la Figura 80 se muestra el avance del proyecto, previamente se mostraron algunos componentes que surgieron con la metodología de Nigel Cross, estos componentes han ido cambiando al menos en cuanto a su estética debido al proceso de mejora de detalle ya que el diseño es un proceso iterativo, los elementos resultantes en la evaluación de alternativas son los mismos, del lado izquierdo se muestra el ensamble preliminar hecho en Solid Works y del lado derecho el ensamble con sus partes reales, por la parte de atrás se puede apreciar el motor que moverá el mecanismo de yugo escocés, acoplado al eje principal del yugo por medio de un acople de elastómero, este se encuentra soportado con la ayuda del balero de pared que se sitúa en la parte trasera de la caja de aluminio, el eje principal mencionado esta acoplado al disco del yugo por medio de la cuña, la cual ensambla perfectamente bien a estos elementos, el excéntrico se sujeta al disco por medio de la cuerda que posee y la tuerca que está por la parte de atrás del disco del yugo, el excéntrico mueve al último eslabón que funciona como acoplador y deslizador en el eje de salida, lo cual nos brinda un movimiento armónico simple, para acoplar el carro que sostiene a la probeta con el mecanismo

de yugo escocés se utilizó un tornillo que se encuentra entre el barreno en el eje de salida y el sujetador que es la pieza de color azul en la imagen de los componentes reales, el carro que sostiene a la probeta está atornillado a la placa correspondiente a la mesa para impedir que éste cambie de posición cuando el mecanismo de yugo escocés está en operación.

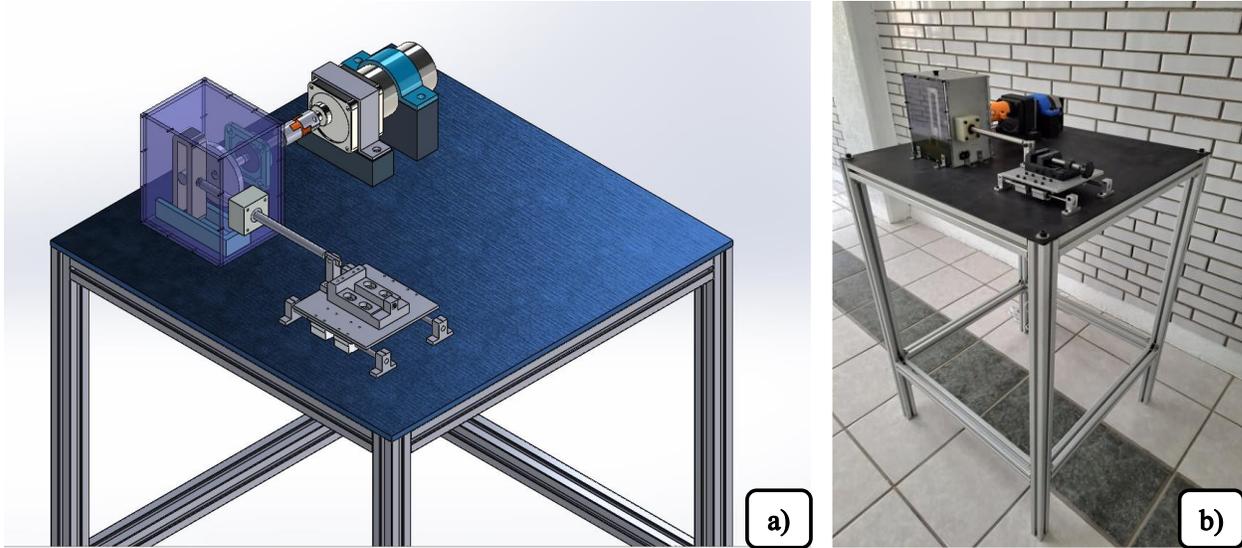


Figura 80. Ensamble preliminar a) Componentes en SolidWorks, b) Componentes reales.

En la figura anterior se muestra el ensamble actual de como lucen los componentes de nuestro proyecto, sin la cámara de temperatura montada sobre la mesa, se observan elementos nuevos como la guía lineal a la salida del eje que conecta con el carro deslizador, los soportes que sujetan al motorreductor, el balero de pared que soporta el eje conductor.

En la Figura 81 se muestra en ensamble elaborado en SolidWorks, el cual se muestra en la imagen de la izquierda, la imagen de la derecha muestra el ensamble real.

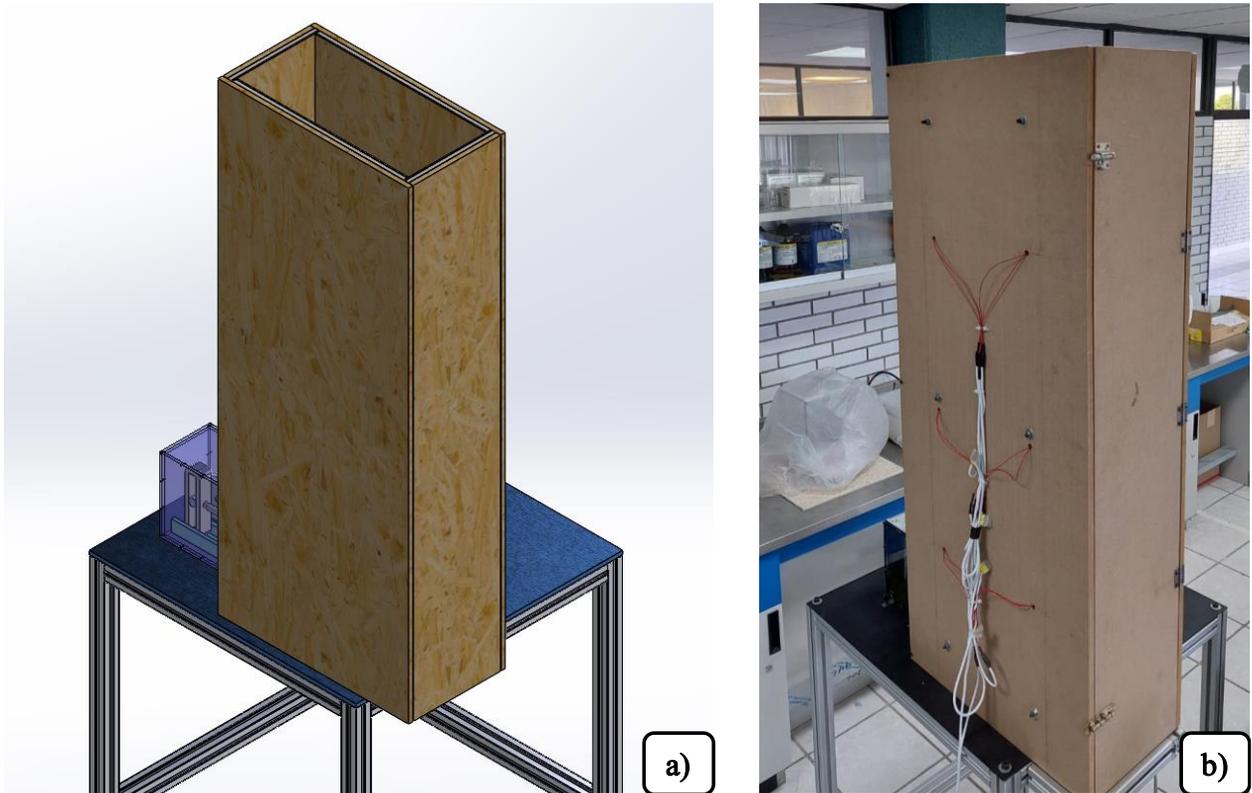


Figura 81. Ensamble final a) Ensamble SolidWorks, b) Ensamble real.

## 5.6. Validación numérica y experimental del acrílico (PMMA).

Con ayuda de una hoja de Excel se elaboraron los cálculos correspondientes para obtener el valor de la frecuencia natural de las probetas elaboradas con acrílico, anteriormente se describió como es que se calculan dichas frecuencias naturales, la Figura 82 contiene los resultados obtenidos de manera numérica, para la estimulación de estas probetas hay que conocer el valor máximo de frecuencia al cual puede trabajar la plataforma, como sabemos, la plataforma alcanza valores de hasta 3 Hz aproximadamente, de manera rápida se puede observar que las probetas con una altura desde 0.5 metros hasta 0.85 metros coinciden en su primer modo de vibración (modo transversal) con la excitación que otorga la plataforma. En la siguiente figura, se muestra un recuadro de color rojo que marca la probeta que se seleccionó para ser perturbada, podemos observar que su altura es de 0.5 metros propiamente y su valor de frecuencia natural es de 2.612 Hz.

Rectángulo (sección transversal)		mts	Área (m <sup>2</sup> )			
	Base	0.0127	0.0000381			
	Espesor	0.003				
PMMA	Altura (m)	I (m <sup>4</sup> )	K (N/m)	m (kg)	ω (rad/s)	Hz
	0.1	2.8575E-11	180.0225	0.001068705	410.4256301	65.32111506
	0.15		53.34	0.001603058	182.4113912	29.03160669
	0.2		22.5028125	0.00213741	102.6064075	16.33027876
	0.25		11.52144	0.002671763	65.66810082	10.45137841
	0.3		6.6675	0.003206115	45.60284779	7.257901673
	0.35		4.19877551	0.003740468	33.50413307	5.332335923
	0.4		2.812851563	0.00427482	25.65160188	4.082569691
	0.45		1.975555556	0.004809173	20.26793235	3.225734077
	0.5		1.44018	0.005343525	16.4170252	2.612844602
	0.55		1.08202855	0.005877878	13.56778943	2.159375704
	0.6		0.8334375	0.00641223	11.40071195	1.814475418
	0.65		0.655521165	0.006946583	9.714216098	1.546061895
	0.7		0.524846939	0.007480935	8.376033268	1.333083981
	0.75		0.42672	0.008015288	7.296455647	1.161264268
	0.8		0.351606445	0.00854964	6.412900471	1.020642423
	0.85		0.293136576	0.009083993	5.680631559	0.904098478

Figura 82. Probeta con altura de 0.5 metros.

En la Figura 83 podemos observar más valores obtenidos con una sección transversal diferente en la solera, correspondientes a 2.54 cm en su base con 3 mm de espesor.

Rectángulo (sección transversal)		mts	Área (m <sup>2</sup> )			
	Base	0.0254	0.0000762			
	Espesor	0.003				
PMMA	Altura (m)	I (m <sup>4</sup> )	K (N/m)	m (kg)	ω (rad/s)	Hz
	0.1	5.715E-11	360.045	0.00213741	410.4256301	65.32111506
	0.15		106.68	0.003206115	182.4113912	29.03160669
	0.2		45.005625	0.00427482	102.6064075	16.33027876
	0.25		23.04288	0.005343525	65.66810082	10.45137841
	0.3		13.335	0.00641223	45.60284779	7.257901673
	0.35		8.39755102	0.007480935	33.50413307	5.332335923
	0.4		5.625703125	0.00854964	25.65160188	4.082569691
	0.45		3.951111111	0.009618345	20.26793235	3.225734077
	0.5		2.88036	0.01068705	16.4170252	2.612844602
	0.55		2.1640571	0.011755755	13.56778943	2.159375704
	0.6		1.666875	0.01282446	11.40071195	1.814475418
	0.65		1.31104233	0.013893165	9.714216098	1.546061895
	0.7		1.049693878	0.01496187	8.376033268	1.333083981
	0.75		0.85344	0.016030575	7.296455647	1.161264268
	0.8		0.703212891	0.01709928	6.412900471	1.020642423
	0.85		0.586273153	0.018167985	5.680631559	0.904098478

Figura 83. Probeta con altura de 0.85 metros.

Como ya sabemos el valor numérico al cual entran en resonancia las probetas de acrílico, es necesario validar, con una prueba experimental, que efectivamente los sistemas mecánicos responden a ese valor en Hz, se maquinaron dos tamaños de probetas de acrílico, con sus dimensiones en particular, la primera, ancho de 0.0127 metros con espesor de 3 mm y una altura de 0.5 metros, y la segunda, ancho de 0.0254 metros con espesor de 3 mm y una altura de 0.85

metros, las cuales se muestran en la Figura 84.



Figura 84. Probetas de acrílico a) Longitud de 0.5 m, b) Longitud de 0.85 m.

Con ayuda de un acelerómetro programado con Arduino, y utilizando como interfaz el software de Python como receptor en la lectura de datos arrojados por el acelerómetro, se generó el siguiente arreglo mostrado en la Figura 85.

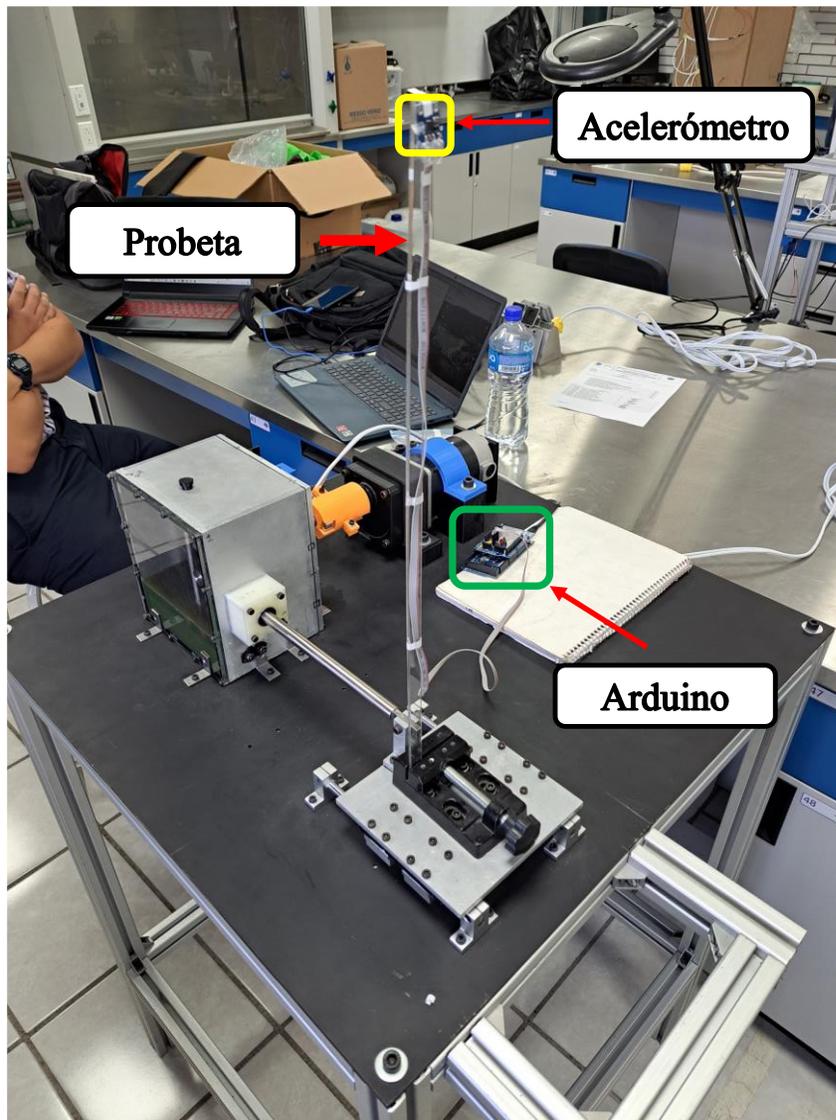


Figura 85. Validación experimental de frecuencia natural.

El acelerómetro toma muestras de los valores instantáneos de la aceleración a una tasa de 5000 datos por segundo, esto lo ejecuta durante un intervalo que se establece en la computadora, el tiempo total de muestreo es configurable en un intervalo de 10 a 50 segundos, y todos estos valores se guardan en un archivo de texto compuesto por 2 columnas, estos valores se grafican, obteniendo como resultado final una gráfica en donde se pueden apreciar picos, en donde el más pronunciado corresponde al primer modo vibratorio del sistema mecánico, el cual es de mucho interés dado que este valor en Hertz debe corresponder o ser similar a los obtenidos en las Figuras 82 y 83, que se mostraron anteriormente que mostró los Hertz a los cuales responden las probetas de acrílico.

La gráfica obtenida de dicha medición es la Figura 85.

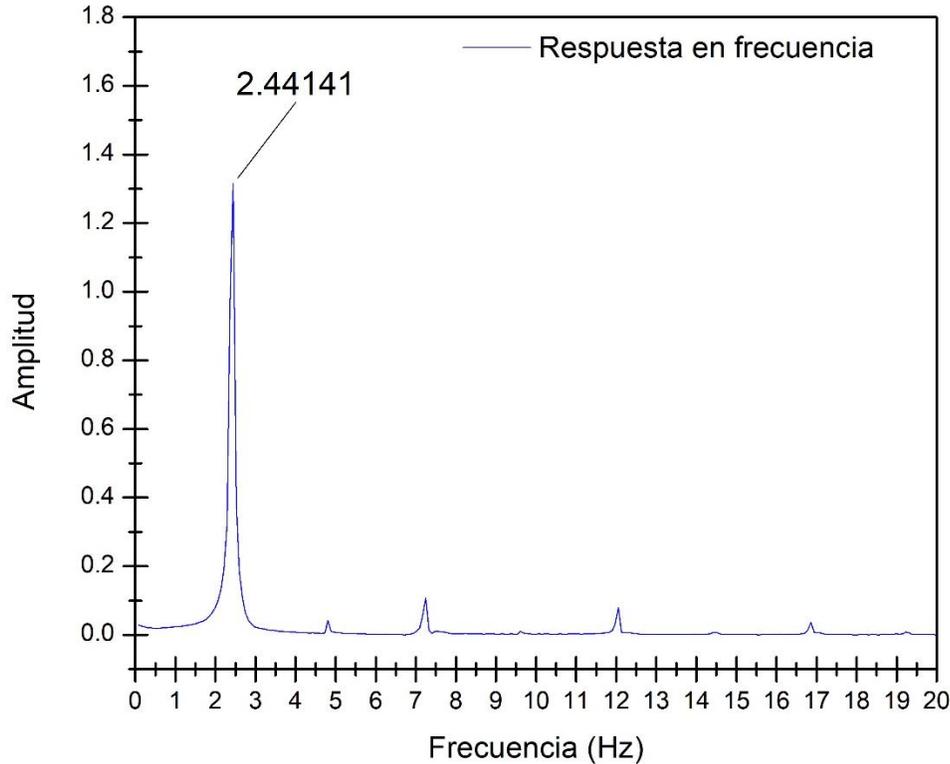


Figura 86. Respuesta en frecuencia de probeta de acrílico de 0.5 m.

Podemos ver, que en la figura anterior, que el valor del primer modo de vibración corresponde a un valor de 2.441 Hertz aproximadamente, a diferencia del valor de 2.612 Hertz obtenido en la hoja de Excel, esta diferencia es debido a, que en el cálculo de Excel debemos de sumar un valor de masa adicional que corresponde al adhesivo que se utilizó para sujetar al acelerómetro, así como también el valor de la masa del acelerómetro propiamente, considerando estas masas adicionales el valor en Hertz debe ser el mismo.

También se generó la respuesta en frecuencia de una solera de acrílico de 0.85 metros de longitud, 2.54 cm de ancho y 3 mm de espesor, al evaluar su frecuencia en la hoja de Excel, obtenemos un valor de 0.904 Hz, la Figura 87 muestra su valor.

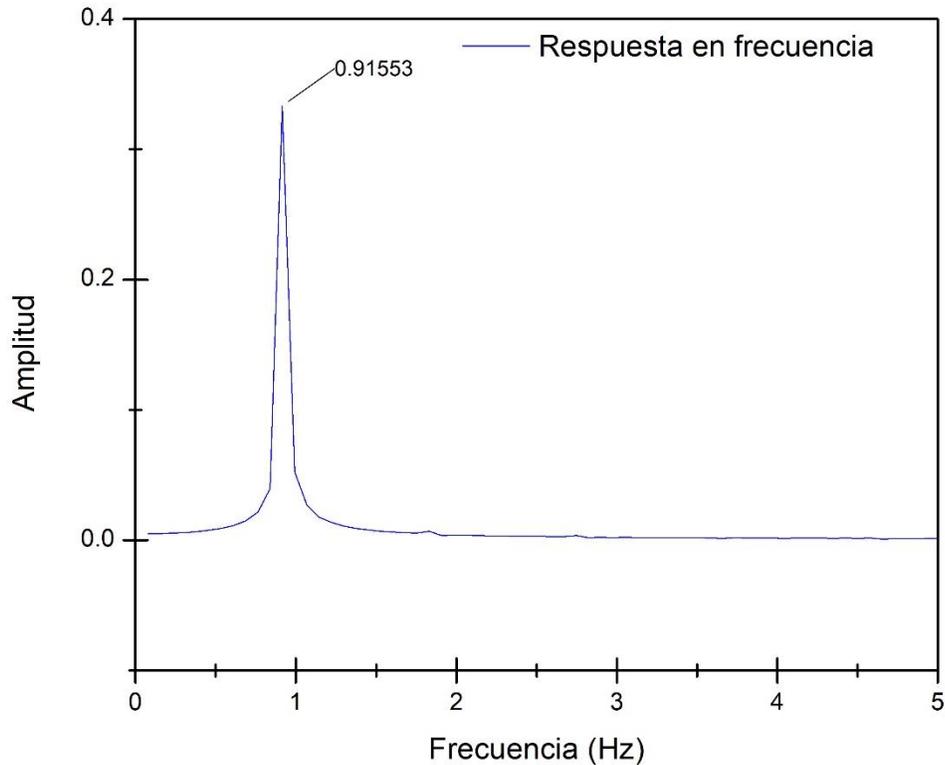


Figura 87. Respuesta en frecuencia de probeta de acrílico de 0.85 m.

De igual manera, estos valores presentan una diferencia debido a las masas que se deben de agregar, tales como el acelerómetro y el adhesivo que se utilizan para llevar a cabo el arreglo correspondiente.

### 5.7. Pruebas con cámara de temperatura.

Se realizaron pruebas preliminares usando la cámara de temperatura, la cual se configuro a través de un controlador a 80 °C y 100 °C, al alcanzar la temperatura programada se introdujo la probeta y se dejó estabilizar la cámara por 20 minutos, de manera que la temperatura dentro de la cavidad fuera lo más uniforme posible, y que dicho aire contenido en esta cavidad calentara las probetas de acrílico, en la Figura 88 se muestra el controlador a la temperatura programada, de la misma manera, se realizó la prueba a una probeta de acrílico de 0.85 m, por lo que se utilizó la misma configuración para la evaluación de estas probetas que actúan como vigas en voladizo con el cambio de que ahora están sujetas a temperatura.



*Figura 88. Controlador a temperatura de 100°C.*

A partir de las pruebas realizadas a 80 y 100 °C, se generaron gráficas para conocer el comportamiento de la probeta ante diferentes condiciones de temperatura, las gráficas obtenidas se presentan en la Figura 89, donde se muestran tres curvas, una como se indica, es una prueba a temperatura ambiente, se puede observar un cambio en la frecuencia y en la amplitud a diferentes temperaturas, esto puede indicar un cambio en la rigidez del material.

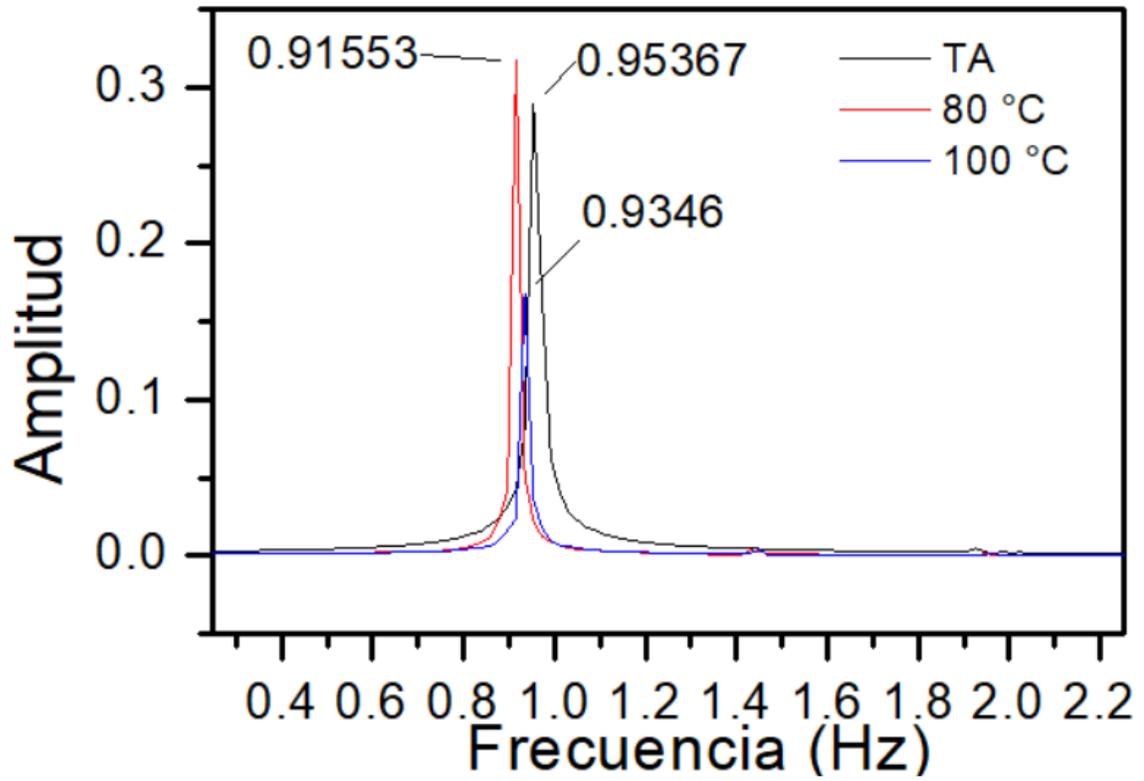


Figura 89. Respuesta a temperatura ambiente, a 80 °C y 100 °C.

## 6. CONCLUSIONES

Como resultado del trabajo realizado en esta tesis se tienen las siguientes conclusiones parciales:

La aplicación de la metodología Nigel – Cross nos permitió tener un diseño funcional y que cumple con los requerimientos de la plataforma deseada.

La selección de los materiales para la fabricación del mecanismo de yugo escocés fueron validados numéricamente, debido a que no se rebasa el límite de resistencia a la tensión o el límite de resistencia a la fluencia.

El uso de herramientas de software como Excel nos ayudó a conocer los desplazamientos, velocidades y aceleraciones en un determinado tiempo en particular del mecanismo de yugo escocés.

Los cálculos con base a las dimensiones de la sección transversal de las probetas así como las diferentes longitudes, su módulo de elasticidad particular y su densidad nos permitió conocer su frecuencia natural, resulta adecuado destacar que si tenemos una sección transversal rectangular y la base aumenta al doble el momento de inercia también lo hará, ocurriendo igual con la masa y la rigidez dado que la masa está directamente relacionada con el área de su sección transversal y la rigidez con el momento de inercia, dando las mismas frecuencias naturales, los resultados se validaron experimentalmente obteniendo una diferencia de 0.2 Hertz entre los resultados numéricos y experimentales.

El diseño conceptual propuesto en la metodología Nigel Cross fue modificado por la disponibilidad de algunos componentes, así como cambios en algunas secciones del sistema mecánico debido principalmente a las exigencias que el mismo diseño y fabricación del mecanismo de yugo escocés demandó.

Con base al análisis numérico transitorio se determinó la mejor configuración con respecto a la posición de las resistencias correspondientes a la cámara de temperatura.

Con base a las pruebas de validación con acrílico, la maquina ya puede ser utilizada para evaluar cualquier tipo de material , en este caso en específico, materiales compuestos.

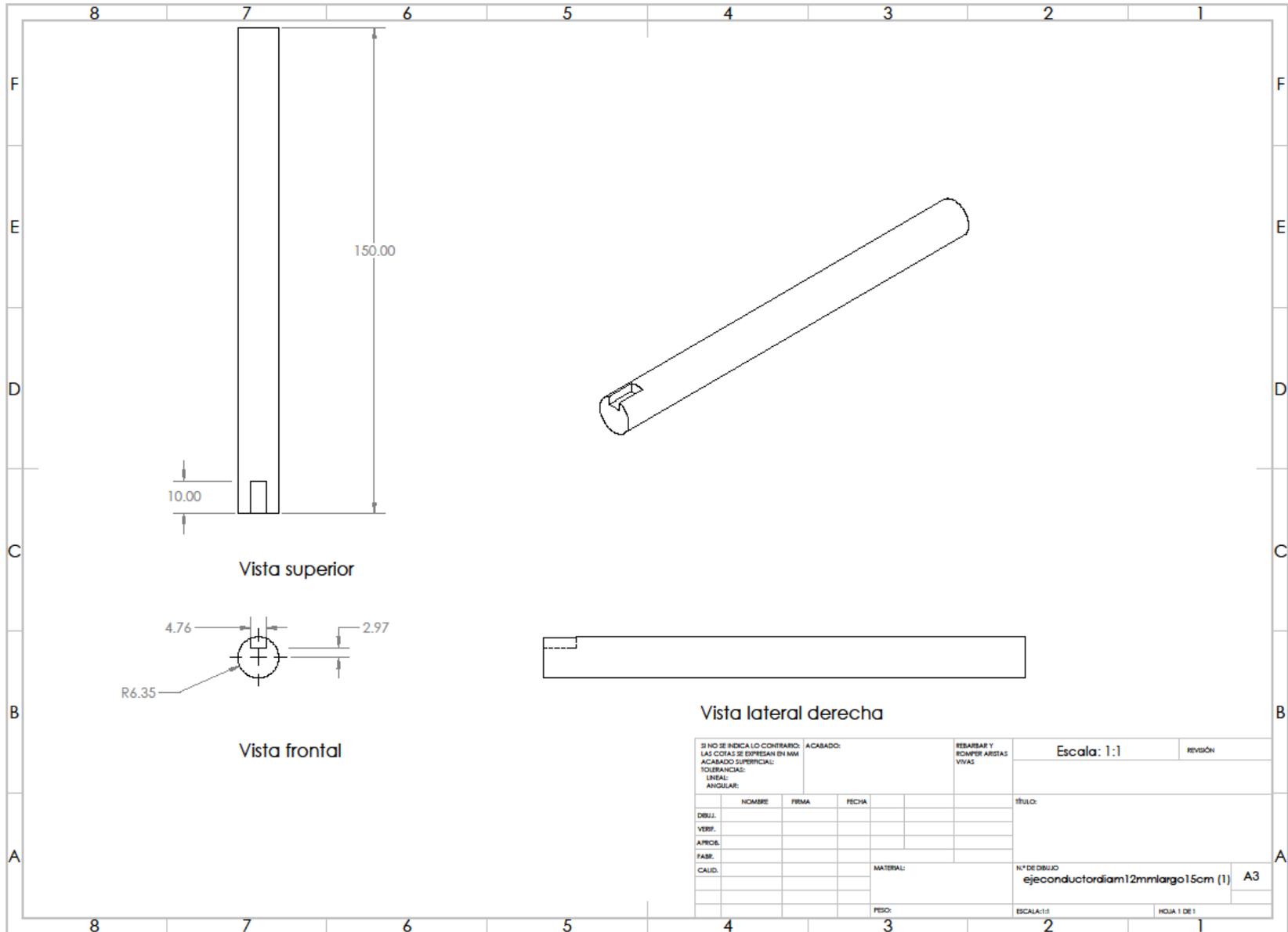
Los valores de Hertz obtenidos de manera numérica y experimental presentan diferencias de decimales dado que, hay que considerar las masas que se deben de sumar a la probeta, como lo es en el caso del acelerómetro y elementos que sirvan para sujetar dicho objeto, al considerarlos los valores deben de ser los mismos.

## REFERENCIAS

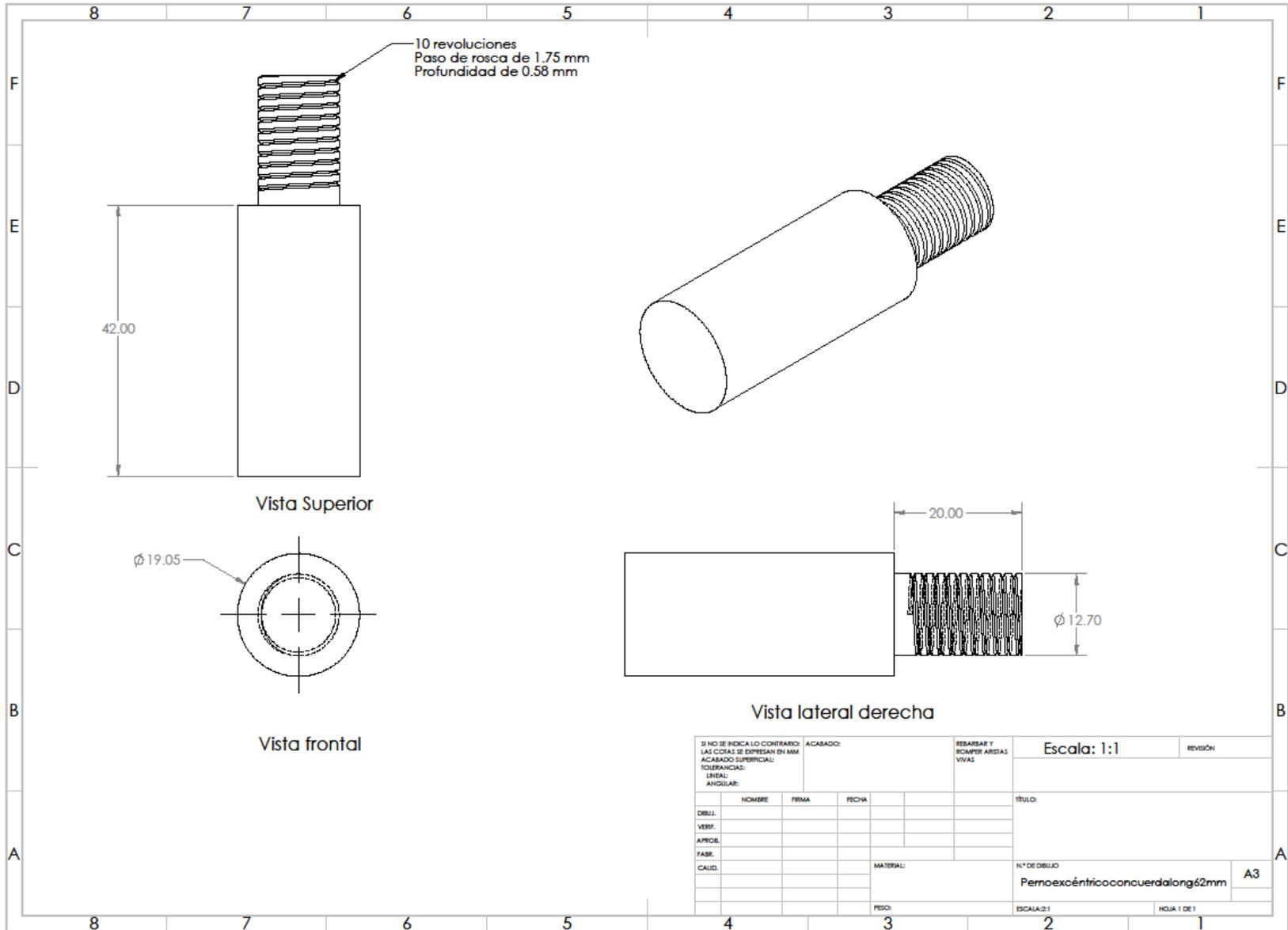
- [1] M. Jureczko, “Optimization of wind turbine blades”, *Journal of materials processing technology*, vol. 167, pp. 463-471, 2005.
- [2] M. Correa, “Structural design of carbon/epoxy bio-inspired wind turbine blade using fluid/structure simulation”, *International Journal of Energy Research*, vol. 40, pp. 1832-1845, Junio 2016.
- [3] J. Sabatier, “Crone control based anti-icing/deicing system for wind turbine blades”, *Control Engineering Practice*, vol. 56, pp. 200-209, Agosto 2016.
- [4] L. Mishnaevsky, “Materials for wind turbine blades: an overview”, *Materials*, vol.10, pp. 1260-1285. Noviembre 2017.
- [5] I. Tuncer, “Predictions of ice formations on wind turbine blades and power production losses due to icing”, *Wind energy*, vol. 22, pp. 945-958. Junio 2019.
- [6] B. Yang, “Testing, inspecting and monitoring technologies for wind turbine blades, a survey”, *Renewable and Sustainable energy reviews*, vol. 22, pp. 515-526, Diciembre 2012.
- [7] J. Ye, “A multi-scale model for studying failure mechanisms of composite wind turbine blades”, *Composite Structures*, vol. 212, pp. 220-229. Junio 2019
- [8] L. Mishnaevsky, “Repair of wind turbine blades: review of methods and related computational mechanic problems”, *Renewable energy*, vol. 140, pp. 828-839. Marzo 2019.
- [9] M. Rajesh, “Dynamic mechanical analysis and free vibration behavior of intra-ply woven natural fiber hybrid polymer composite”, *Journal of reinforced plastics & composites*, Noviembre 2015.
- [10] R. K. Bhangale, “Thermoelastic buckling and vibration behavior of a functionally graded sandwich beam with constrained viscoelastic core”, *Journal of sound and vibration*, vol. 295, pp. 294-316. Abril 2006.
- [11] P. Liu, “Wind turbine blade waste in 2050”, *Waste Management* (2017), tomado de: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.007>
- [12] O. Ozgener, “A small wind turbine system (SWTS) application and its performance analysis”. *Energy conversion & management*, vol. 47. Pp. 1326-1337. Octubre 2005.

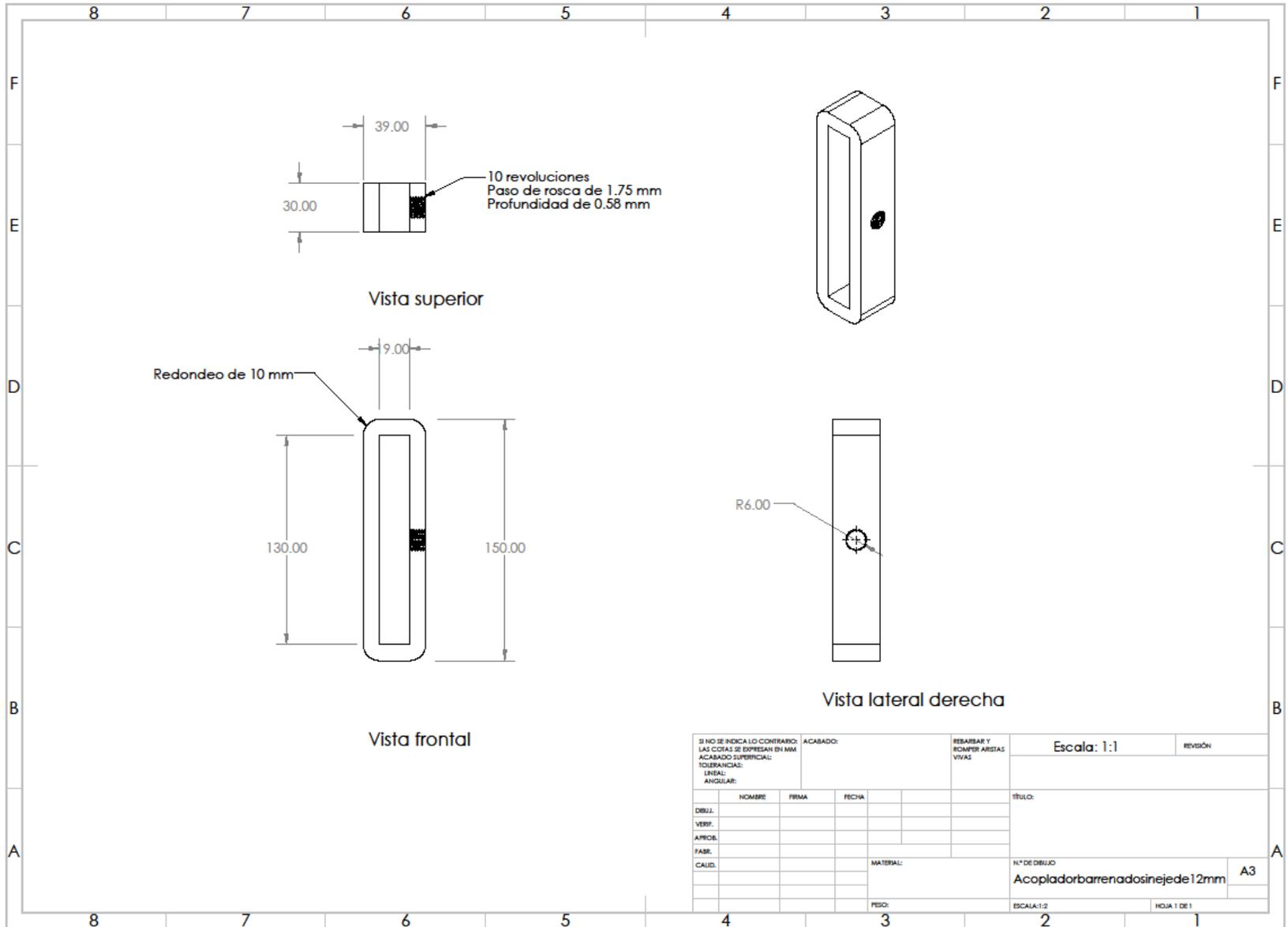
- [13] K. K. Chawla, *Composite Materials*. Tercera edición. Birmingham: Springer, 2012.
- [14] D. R. Askeland, *Ciencia de los materiales*. Sexta edición. México: Cengage Learning, 2013.
- [15] R. F. Gibson, “A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures”. *Composite Structures*, vol. 92. Pp. 2793-2810. Mayo 2010.
- [16] J. Schijve, *Fatigue of structures and materials*. Segunda edición. Delft: Springer, 2009.
- [17] D. J. Inman, *Engineering Vibration*. Tercera edición. Estados Unidos: Pearson, 2007.
- [18] J. H. Park, “Linear vibration analysis of rotating wind-turbine blade”, *Current Applied Physics*, vol.10. pp. S332-S334. Noviembre 2010.
- [19] A. Al-Hamood, “Dynamics and lubrication analyses of scotch yoke mechanism”, *International journal on interactive design and manufacturing*, vol. 13. Pp. 901-907. Enero 2019.
- [20] V. Arakelian, “Design of scotch yoke mechanisms with improved driving dynamics”, *Journal of MULTI-BODY DINAMICS*, vol. 230. Pp. 379-386. Noviembre 2015.
- [21] R. Praveen, “Dual side water pumping system using scotch yoke mechanism”, *Indian journal of science and technology*, vol. 8., Diciembre 2015, doi. : 10.17485/ijst/2015/v8i36/87556.
- [22] G. Jun Lee, “Miniature Air Compressor Design Based on Cross-Slider Mechanism”, *Key engineering materials*, vol. 486. Pp. 17 – 20. Julio 2011.
- [23] M. Diggs, “A potential solution for High – Efficiency Aircraft powerplants – the scotch yoke X – Engine Aero – Diesel”, *SAE Technical Paper*, 2017-01-2042, 2017, doi. 10.4271/2017-01-2042.
- [24] G. J. Lee, “Miniature air compressor design based on cross – slider mechanism”, *Key Engineering Materials*, vol. 486. Pp. 17-20. Julio 2011.
- [25] S. S. Rao, *Vibraciones Mecánicas*. Quinta edición. Pearson, 2012.

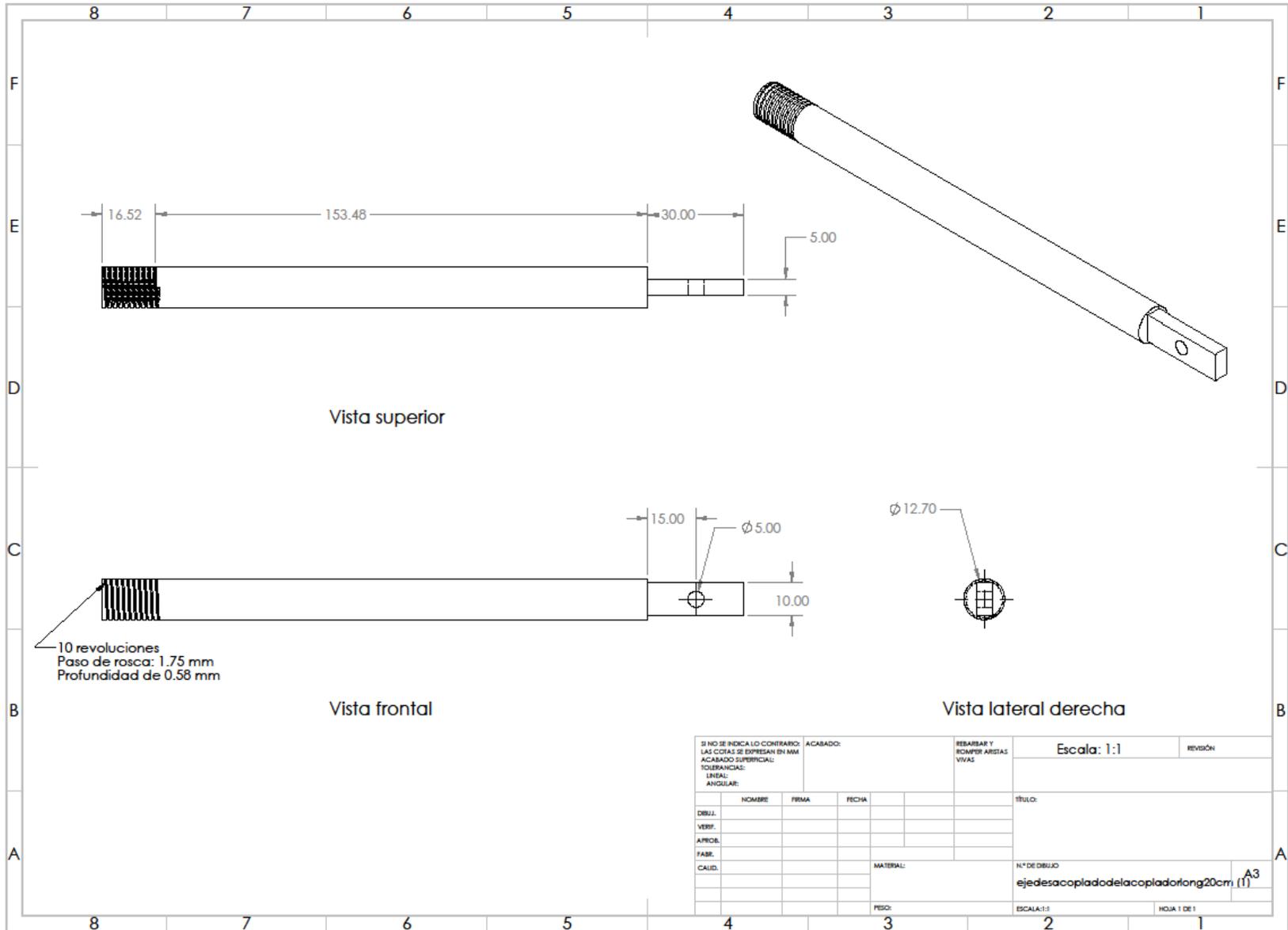


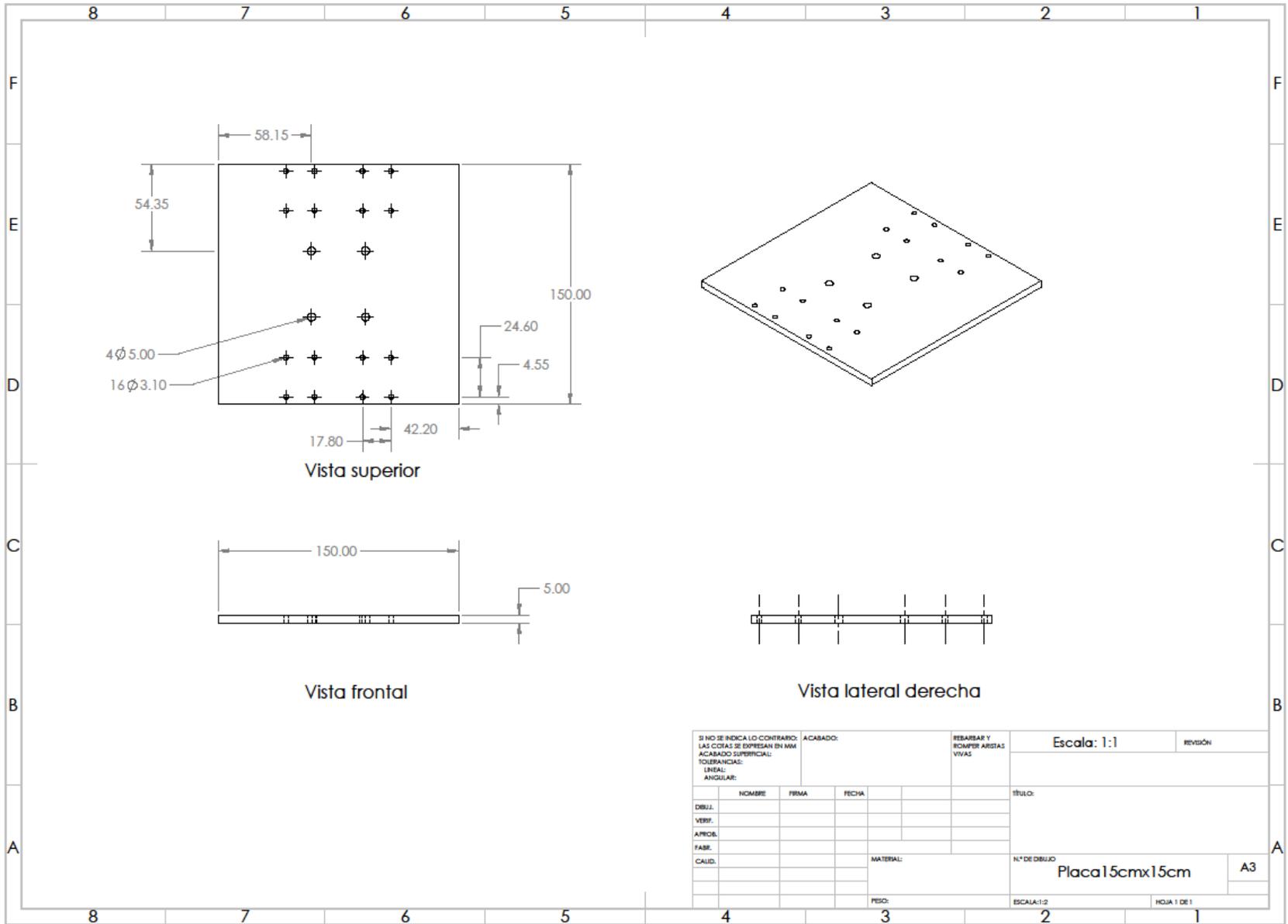




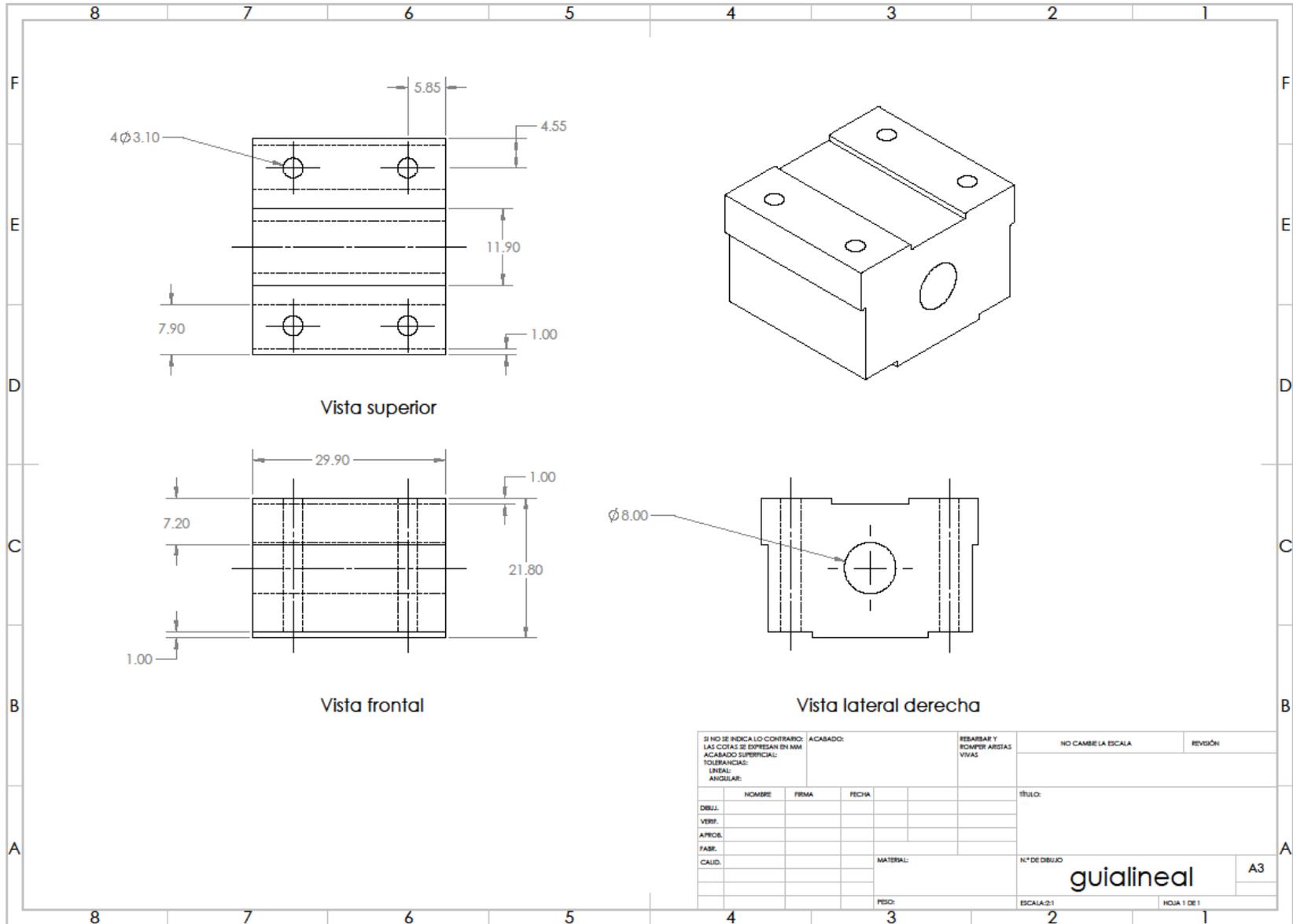


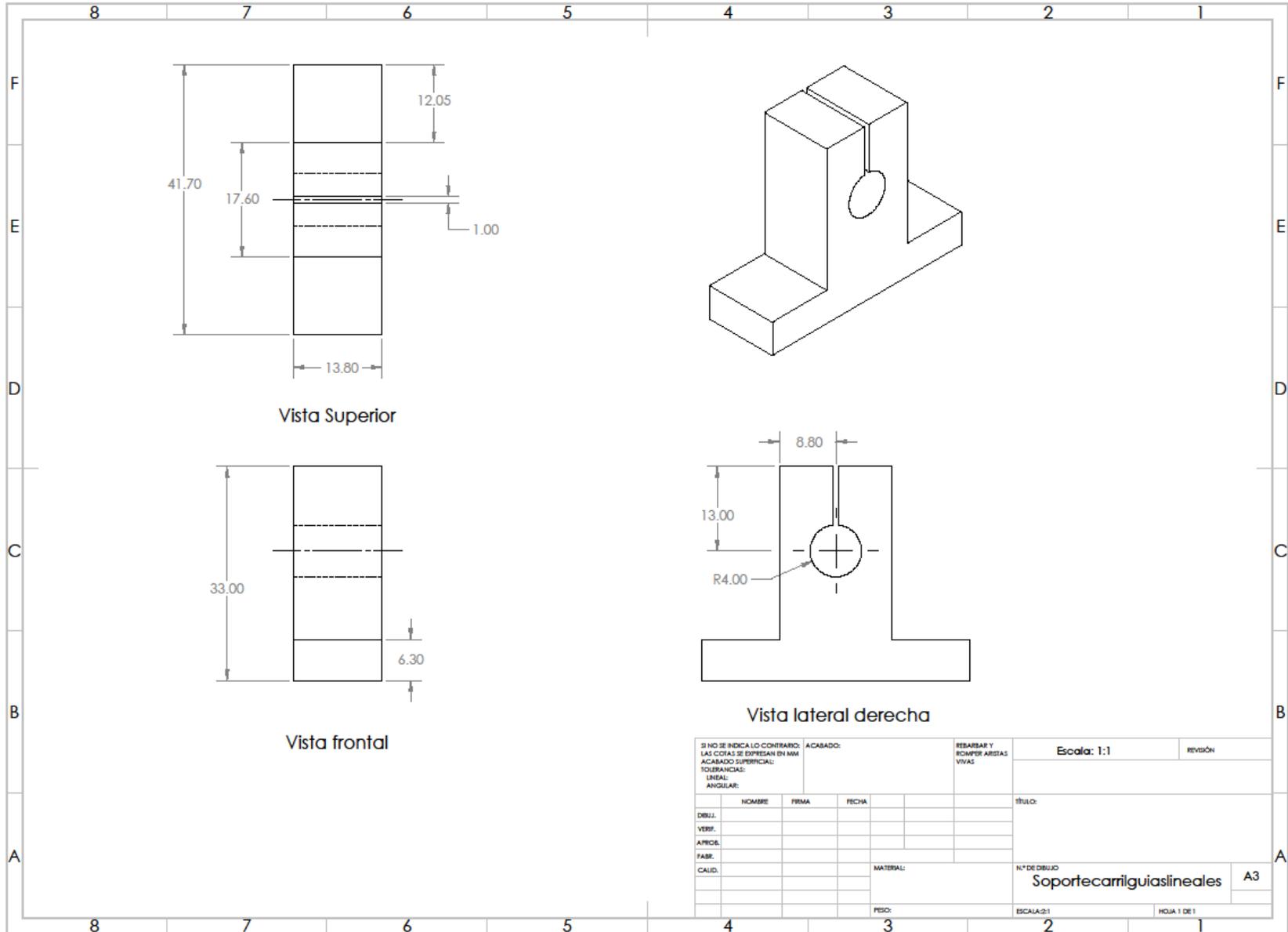


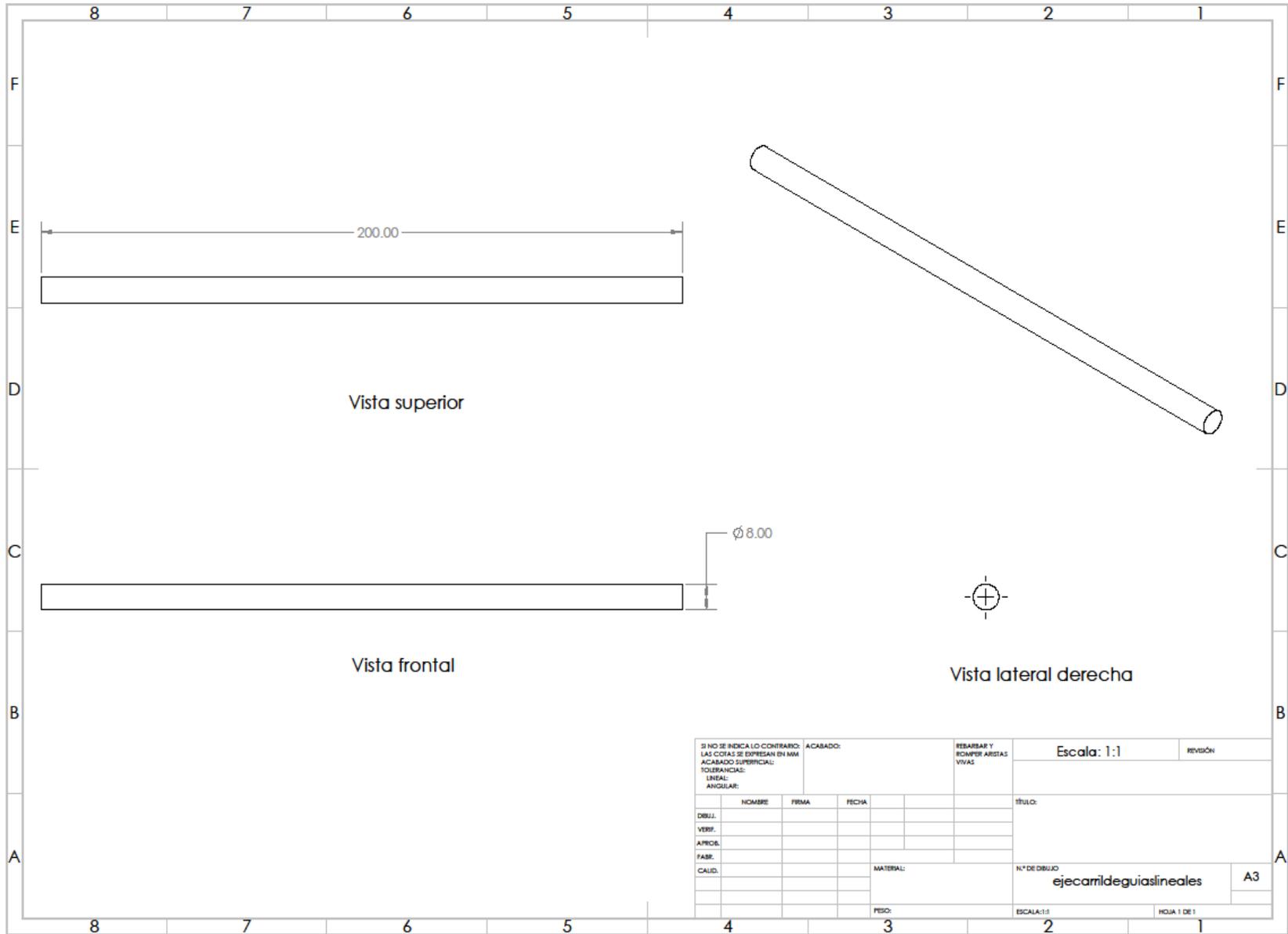




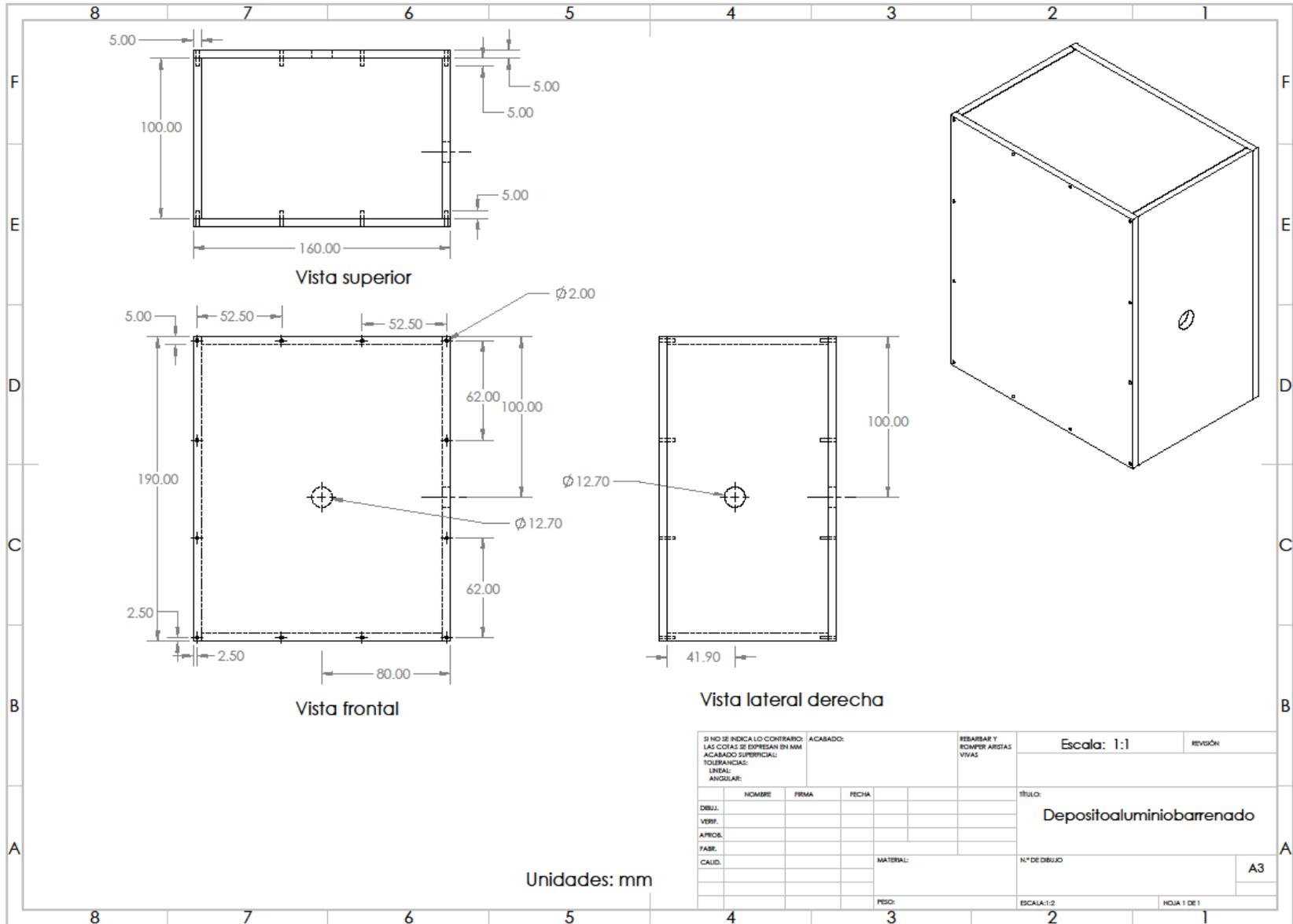
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM				ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	ESCALA: 1:1	REVISIÓN
TOLENCIAS: LINEAL: ANGULAR:						TÍTULO:	
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA			N.º DE DIBUJO	
VERIF.						Placa 15cmx15cm	
APROB.						A3	
FABR.						MATERIAL:	
CAUD.						ESCALA: 1:2	
					PESO:	HOJA 1 DE 1	

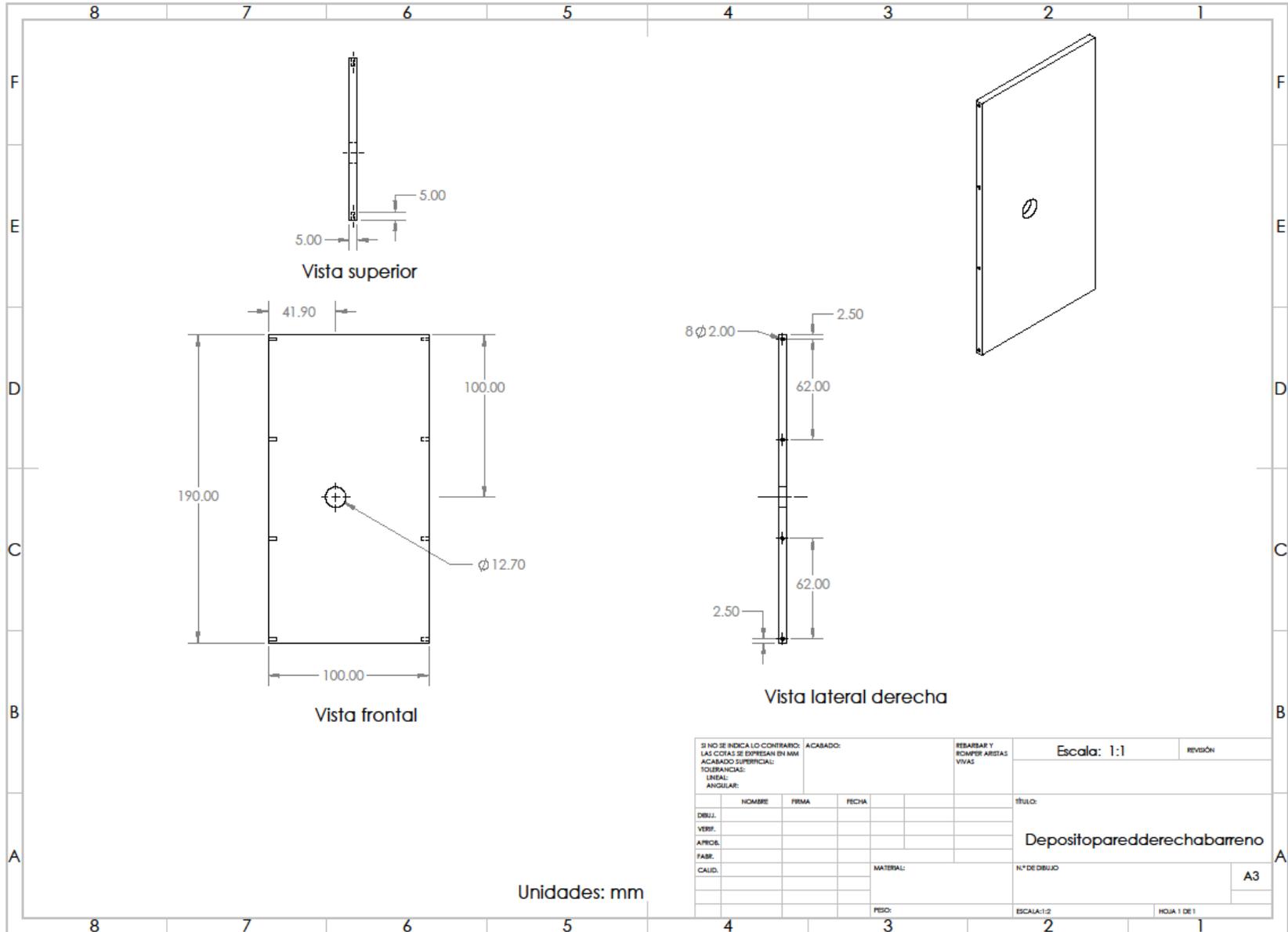






SI NO SE INDICA LO CONTRARIO, LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM				ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		Escala: 1:1		REVISIÓN	
ACABADO SUPERFICIAL:											
TOLERANCIAS:											
LINEAL:											
ANGULAR:											
		NOMBRE		FIRMA		FECHA				TÍTULO:	
DIBUJ.											
VERIF.											
APROB.											
FABR.											
CALIF.											
						MATERIAL:		N.º DE DIBUJO		A3	
								ejecarrildeguiaslineales			
						PESO:		ESCALA: 1:1		HOJA 1 DE 1	





SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VVVVS	Escala: 1:1	REVISIÓN
						TÍTULO:	
						Depositorparedrechabarreno	
						N.º DE DIBUJO	A3
						ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1

