

DISEÑO DE UN SISTEMA DE FRENADO REGENERATIVO PARA UNA
BICICLETA

IVÁN RODRIGO RENGIFO SÁNCHEZ
CÉSAR ANDRÉS SANTANA GEREDA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2020

DISEÑO DE UN SISTEMA DE FRENADO REGENERATIVO PARA UNA
BICICLETA

IVÁN RODRIGO RENGIFO SÁNCHEZ
CÉSAR ANDRÉS SANTANA GEREDA

Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero mecánico

Director:

Ricardo Alfonso Jaimes Rolon
Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2020

DEDICATORIA

A todas y a cada una de las personas que tuvieron una influencia en la persona en la que me convertí, ya que construyeron lo que hoy soy, especialmente a aquellas que me ayudaron a ser mejor cada día, motivándome constante en el camino para alcanzar mis metas.

Iván Rodrigo Rengifo Sánchez

DEDICATORIA

Primeramente, dedico este proyecto a Dios quien me da la motivación para trabajar por el bien y para el bien, quien me da fortaleza cada vez que la necesito, por permitir que cosas como estas me estén pasando; también lo dedicó a mi madre María Josefa Gereda, quien desde pequeño me infundió la idea de ser ingeniero; a la doctora Amparo Malagón, quien mediante su apoyo me mostró la oportunidad de estudiar en la Universidad Industrial de Santander, y que en ella pudiese estudiar ingeniería mecánica, y, finalmente, dedico mi proyecto a todas las personas que trabajan cada día por convertir a este mundo en un mundo más ecológico, sustentable y eficiente, entre ellas principalmente a Elon Musk.

César Andrés Santana Gereda

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander, porque allí encontré un verdadero hogar que me permitió formarme como ingeniero y como persona, mostrándome por medio de mis profesores la persona en la que me puedo convertir, siendo constante y dedicado.

A mis padres, quienes siempre me brindaron su apoyo ante cualquier situación, quienes por medio de trabajo duro me enseñaron el significado de lo que es ser responsable.

A mis hermanos con los que comparto cada uno de mis logros, y a los que retribuyo muchos de estos; sé que siempre contaré con ellos en cada una de las etapas de mi vida.

A mis tíos, quienes me brindaron su apoyo, a los que les debo muchos de mis logros por brindarme su apoyo y motivación.

A mis amigos y profesores con quienes viví experiencias magníficas e inolvidables las cuales me complementan hoy como persona y profesional.

Iván Rodrigo Rengifo Sánchez

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al pueblo colombiano, al que orgullosamente pertenezco, y en medio del cual he ido realizando mis sueños, como graduarme de ingeniero mecánico en una importante universidad pública. Retribuiré a mi universidad y a mi pueblo mediante mis aportes como ingeniero.

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander, en donde pude adquirir conocimientos esenciales de la ingeniería mecánica, que con seguridad utilizaré para el desarrollo tecnológico en ayuda de la humanidad.

A mi madre, María Josefa Gereda, quien desde pequeño me motivó a ser ingeniero.

A la doctora Amparo Malagón, quien mediante su apoyo desde décimo grado me ayudó a afirmar la idea de ser ingeniero.

Al profesor Ricardo Jaimes, quien con su experiencia y conocimientos nos asesoró durante la elaboración del proyecto de grado.

César Andrés Santana Gereda

CONTENIDO

pág.

INTRODUCCIÓN.....	5
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
1.1. IDENTIFICACION DEL PROBLEMA	7
1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	9
2. OBJETIVOS.....	11
2.1. OBJETIVO GENERAL	11
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
3. MARCO TEÓRICO	13
3.1. GENERALIDADES DE LOS FRENOS REGENERATIVOS	13
3.1.1. Tipos de almacenamiento energético.	14
3.2. MOTORES DC	16
3.2.1. Tipos de motores DC	17
3.3. GENERADORES DC.....	19
3.4. BATERÍAS DC.....	20
3.5. ELEMENTOS ELÁSTICOS.....	22
3.5.1. Resorte Espiral a Torsión.....	22
3.5.2. Resortes de espiras helicoidales de torsión.	24
4. DISEÑO CONCEPTUAL.....	27
4.1. DESPLIEGUE DE LA FUNCION CALIDAD	27
4.1.1. Requerimientos del Consumidor	27
4.1.2. Requerimientos de ingeniería	28
4.2. MATRIZ DE CALIDAD QFD.....	28
4.3. PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS	29
4.3.1. Alternativa 1: Sistema de freno regenerativo de tambor de inercia	29
4.3.2. Alternativa 2: Sistema de freno regenerativo de resorte de tensión	30

4.3.3. Alternativa 3: Sistema de freno regenerativo de resorte torsional y generador eléctrico	32
4.4. EVALUACION DE ALTERNATIVAS	33
4.5. ESPECIFICACIÓN DE ALTERNATIVA GANADORA	33
4.5.1. Freno de elementos elásticos	35
4.5.1.1. Pruebas de frenado normal.....	35
4.5.1.2. Análisis energético para el sistema de Frenado.....	36
4.5.1.3. Elemento elástico óptimo	42
4.5.1.4. Consideraciones para el diseño de un freno regenerativo con resorte helicoidal a torsión	47
4.5.2. Freno con moto-generador	47
4.5.2.1. Modelo de concepto 1	49
4.5.2.2. Modelo de concepto 2.....	51
5. DISEÑO EN DETALLE	57
5.1. FRENO MECÁNICO	58
5.1.1. Diseño del resorte.....	58
5.1.2. Diseño del mecanismo.....	60
5.1.2.1. Manzana.....	64
5.1.2.2. Carga de accionamiento	65
5.1.2.3. Selección rodamiento de empuje	69
5.1.2.4. Selección rodamiento del plato derecho	70
5.1.2.5. Selección rodamiento de aguja	71
5.1.2.6. Mandril.....	72
5.1.2.7. Tapa	73
5.1.2.8. Plato Fijador.....	74
5.1.2.9. Retenedor de plato	75
5.1.2.10. Acople mandril - manzana	76
5.1.2.11. Palanca de actuación.....	78
5.2. FRENO ELÉCTRICO.....	79

5.2.1. Selección motor-generador	79
5.2.2. Mecanismo de acople motor-generador	82
5.2.3. Selección de la batería	87
5.2.4. Diseño del controlador	88
5.3. SISTEMA DE FRENO REGENERATIVO.....	91
5.4. DISEÑO PARA LA MANUFACTURA Y ENSAMBLE	95
5.4.1. Soporte motor generador	96
5.4.2. Piñon manzana delantera	97
5.4.3. Acople mandril - manzana	98
5.4.4. Mandril.....	99
5.4.5. Manzana.....	100
5.4.6. Tapa	103
5.4.7. Plato fijador.....	104
5.4.8. Retenedor.....	105
5.4.9. Plato derecho.....	105
5.4.10. Palanca actuadora	106
5.4.11. Soporte palanca.....	107
5.4.12. Otros componentes del freno mecánico.....	107
6. MODELO FUNCIONAL.....	108
6.1. MODELO FUNCIONAL DEL FRENO MECÁNICO	108
6.1.1. Pruebas del modelo funcional.....	110
6.2. MODELO FUNCIONAL ELÉCTRICO	111
7. ESTUDIO DEL SISTEMA DE FRENO REGENERATIVO	119
7.1. FRENO ELÉCTRICO.....	120
7.2. FRENO DE ELEMENTO ELASTICO	122
7.3. SISTEMA DE FRENADO EN CONJUNTO	124
8. ANALISIS DE COSTOS.....	126
8.1. COSTOS DIRECTOS	126

8.1.1. Materia prima.....	126
8.1.2. Componentes	127
8.1.3. Costos procesos de manufactura.....	129
8.2. COSTO DIRECTO TOTAL.....	130
8.3. RELACIÓN COSTO BENEFICIO.....	130
CONCLUSIONES.....	133
BIBLIOGRAFÍA.....	135
ANEXOS	138

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Matriz de calidad QFD	28
Tabla 2. Calificación de alternativas	33
Tabla 3. Parámetros tomados como constantes	39
Tabla 4. Resultados según nivel energético	40
Tabla 5. Cuadro comparativo elementos elásticos	45
Tabla 6. Características resortes a torsión.....	46
Tabla 7. Valores promedio encontrados en la prueba de frenado.	54
Tabla 8. Características del resorte	58
Tabla 9. Energía almacena por el resorte.....	59
Tabla 10. Dimensiones del resorte	59
Tabla 11. Características resorte del retenedor:	67
Tabla 12. Resultados frenado modelo funcional	110
Tabla 13. Resultados regeneración modelo funcional.....	110
Tabla 14. Potencias freno eléctrico	121
Tabla 15. Costos materia prima	126
Tabla 16. Costo elementos seleccionados.....	127
Tabla 17. Costo procesos	129
Tabla 18. Costos directos totales.....	130

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ciclorruta Bucaramanga.	8
Figura 2. Freno regenerativo	13
Figura 3. Principio de funcionamiento motor DC	16
Figura 4. Circuito equivalente motor DC de excitación separada.	18
Figura 5. Esquema generador excitación independiente.	19
Figura 6. Resorte torsional.....	22
Figura 7. Resorte helicoidal de torsión.....	24
Figura 8. Esquema primera alternativa	30
Figura 9. Esquema segunda alternativa.....	31
Figura 10. Esquema tercera alternativa	32
Figura 11. Subsistemas de la alternativa tres.	34
Figura 12. Diagrama de fuerzas según diseño propuesto.	41
Figura 13. Elementos elásticos	43
Figura 14. Análisis funcional freno de elementos elásticos.	43
Figura 15. Análisis funcional freno con motor-generador.	48
Figura 16. Componentes modelo.	49
Figura 17. Modelo de concepto 1.....	50
Figura 18. Arreglo de motores.	51
Figura 19. Carga eléctrica.....	51
Figura 20. Fuente alimentación motor 2.....	52
Figura 21. Multímetro digital.	53
Figura 22. Velocímetro bicicleta.	53
Figura 23. Prueba modelo de concepto 1.	54
Figura 24. Esquema del subsistema freno eléctrico.	56
Figura 25. Diagrama de flujo diseño en detalle.	57
Figura 26. Dirección torque del resorte.	61
Figura 27. Mecanismo del freno mecánico	62

Figura 28. Distribución esfuerzos de la manzana	65
Figura 29. Palanca del freno	65
Figura 30. Fuerzas para frenado en la palanca.....	68
Figura 31. Factor de seguridad palanca de freno.....	69
Figura 32. Rodamiento de empuje SKF	69
Figura 33. Rodamiento del plato derecho	70
Figura 34. Corona de agujas	71
Figura 35. Distribución esfuerzos del mandril	72
Figura 36. Análisis de carga de la tapa	73
Figura 37. Análisis carga del plato fijador	74
Figura 39. Acople mandril - manzana	76
Figura 40. Análisis elementos finitos acople mandril manzana	77
Figura 41. Palanca de bloqueo remoto	78
Figura 42. Motor DC 24 V - 350 W - MY1016Z3	81
Figura 43. Montaje del piñón en una mazana de bicicleta.....	82
Figura 44. Soporte del motor-generator	84
Figura 45. Ubicación de las cargas estudio del soporte motor	85
Figura 46. Esfuerzos soporte motor-generator.....	85
Figura 47. Mecanismo de acople del motor-generator	86
Figura 48. Bateria KAMPING 24V 10000mAH 7S3P.....	87
Figura 49. Ubicación de la batería en la bicicleta	88
Figura 50. Esquema del circuito.....	89
Figura 51. Manetas de freno con pulsador.....	90
Figura 52. Interruptor con acople al manubrio de la bicicleta.	91
Figura 53. Bicicleta con el sistema de freno regenerativo	91
Figura 54. Distribución espacial de los elementos en la bicicleta	93
Figura 55. Elementos de manipulación del freno	94
Figura 56. Soporte motor-generator.....	96
Figura 57. Operaciones para la manufactura del piñón.....	97
Figura 58. Operaciones manufactura acople de mandril - manzana	98

Figura 59. Partes del ensamble mandril.....	99
Figura 60. Operaciones manufactura eje manzana	100
Figura 61. Operaciones manufactura plato izquierdo manzana	101
Figura 62. Operaciones manufactura cilindro de la manzana	102
Figura 63. Operaciones manufactura plato derecho y trinquete de la manzana ..	102
Figura 64. Operaciones manufactura de la tapa	103
Figura 65. Operaciones manufactura del plato fijador	104
Figura 66. Operaciones manufactura del retenedor	105
Figura 67. Operaciones manufactura del plato derecho.....	106
Figura 68. Operaciones manufactura de la palanca de freno.....	106
Figura 69. Operaciones manufactura del soporte palanca	107
Figura 71. Componentes del modelo funcional	109
Figura 72. Componentes del circuito.	111
Figura 73. Montaje modelo	112
Figura 74. Circuito con diodo rectificador	113
Figura 75. Circuito con limitador de corriente.....	115

LISTA DE GRAFICAS

	pág.
Grafica 1. Prueba de frenado.....	35
Grafica 2. Comportamiento de la velocidad variando la potencia de frenado.	80
Grafica 3. Resistencia interna de la batería.	113
Grafica 4. Voltaje motor vs corriente de la batería.	114
Grafica 5. Corriente batería vs voltaje del motor.	116
Grafica 6. Corriente eléctrica modelo experimental y teórico.	117
Grafica 7. Voltaje modelo experimental y teórico.	117
Gráfica 8. Comportamiento del freno eléctrico al descender por una pendiente de 10 grados.	120
Grafica 9. Comportamiento del freno eléctrico al descender por una pendiente de 5 grados.	121
Grafica 10. Comportamiento freno regenerativo mecánico con una velocidad inicial de 30 Km/h	123
Grafica 11. Comportamiento freno regenerativo con una velocidad inicial de 20 Km/h	123
Grafica 12. Comportamiento sistema freno en conjunto	124

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Datos prueba de frenado.	138
Anexo. B Diagrama de bloque SIMULINK de potencia de frenado	140
Anexo C. Medidas del motor MY1016Z3	141
Anexo D. Velocidad, torque, corriente y potencia del motor MY1016Z3	142
Anexo E. Datos modelo funcional eléctrico	143
Anexo F. Diagrama de bloques SIMULINK de modelo funcional.	146
Anexo G. Modelo del sistema en conjunto Simulink.	147
Anexo H. Planos sistema de frenado regenerativo	148

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO DE UN SISTEMA DE FRENADO REGENERATIVO PARA UNA BICICLETA*

AUTOR: CÉSAR ANDRÉS SANTANA GEREDA e IVÁN RODRIGO RENGIFO SÁNCHEZ**

PALABRAS CLAVE: Frenado regenerativo, freno, bicicleta, resorte helicoidal, almacenamiento energético, regeneración, torsión.

DESCRIPCIÓN:

El presente proyecto expone el diseño de un sistema de frenado regenerativo para una bicicleta para que aproveche la energía cinética al frenar. Este diseño se compone de tres subsistemas: el primero almacena energía en forma de energía potencial elástica mediante un resorte helicoidal a torsión, el segundo utiliza un motor eléctrico y el tercero usa los frenos convencionales de banda a fricción. Dichos subsistemas funcionan de forma simultánea. Para la entrega de la energía almacenada se desactivan los frenos; en caso de requerirse usar los frenos a fricción, se activa una palanca que desactivará el sistema regenerativo. La metodología que se llevó a cabo consistió en evaluar la carga energética que deben almacenar los frenos. Luego, se evaluaron los factores que incurren en el frenado y las características que deberían otorgar los tres tipos de frenos trabajando de forma simultánea. También, se hicieron pruebas de frenado para una bicicleta de 15 kg de rin 26" y un usuario de 80 kg, con el fin de obtener las características de frenado, escogiendo entre las diferentes alternativas de frenado regenerativo un resorte helicoidal de torsión y un motor eléctrico, como las opciones óptimas que satisfacen

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Ricardo Alfonso Jaimes Rolon, Ingeniero Mecánico

los requerimientos de frenado. Se dimensionó y realizó el modelo en SolidWorks y se construyó el modelo funcional de este, con el fin de obtener una visión del comportamiento y funcionalidad en la bicicleta. Asimismo, se realizó el cálculo de la eficiencia y relación de costo/beneficio del sistema, basados en las características que describían los fabricantes de los componentes que intervienen en el almacenamiento energético. Por último, se obtuvo el análisis de la relación costo-beneficio para el sistema, se demostró que el sistema es viable financieramente.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN OF A REGENERATIVE BRAKING SYSTEM FOR A BICYCLE*

AUTHOR: CESAR ANDRES SANTANA GEREDA AND IVAN RODRIGO RENGIFO SANCHEZ**

KEY WORDS: Regenerative braking, brake, bicycle, helical spring, energy storage, regeneration, torsion.

DESCRIPTION:

This project exposes the design of a regenerative braking system for a bicycle to take advantage of kinetic energy when braking. The design consists of three subsystems: the first stores energy in the form of elastic potential energy using a torsional helical spring, the second uses an electric motor, and the third uses conventional friction band brakes. These subsystems work simultaneously. The brakes are deactivated to deliver the stored energy. If the friction brakes are required, a lever is activated which will deactivate the regenerative system. The methodology carried out was to evaluate the energy load that the brakes must store. Then, the factors that incur in braking and the characteristics that the three types of brakes should provide working simultaneously were evaluated. Braking tests were carried out for a bicycle with a 15 kg, 26" rim and a user weighing 80 kg in order to obtain the braking characteristics, choosing among the different regenerative braking alternatives a torsion helical and an electric motor as the options more optimal that satisfy the braking requirements. The model was dimensioned and made in SolidWorks and its functional model was built in order to obtain a vision of

* Degree work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Ricardo Alfonso Jaimes Rolon, Mechanical Engineer

the behavior and functionality on the bicycle. Likewise, the efficiency and cost-benefit ratio of the system was calculated based on the characteristics described by the manufacturers of the components involved in energy storage. It was obtained in terms of the analysis of the cost-benefit relationship for the system, it was obtained that the system is financially viable.

INTRODUCCIÓN

Los diferentes sistemas que se han desarrollado a través de la historia de la humanidad buscan siempre optimizar el proceso y sus partes que los conforman, con el fin de maximizar la eficiencia y la utilidad de estos. La ingeniería busca mejorar estos sistemas para que se entregue la mejor utilidad que sea posible, a pesar de que en ese proceso de reingeniería se necesite cambiar el proceso o cambiar algunas componentes que hacen parte del sistema.

En los sistemas de frenado convencionales que normalmente funcionan a fricción, mediante el contacto de dos materiales con propiedades entre ellos, permite que se genere la fricción necesaria para disipar la energía requerida para frenar el sistema. En este proceso de transformación de energía, ocurre ya sea en energía potencial, cinética, entre otras a calor, por lo que la energía que se evidencia en el frenado no se utiliza, es decir, no se regenera, sino que sólo se pierde en forma de calor. No obstante, en los sistemas de frenado la energía se derrocha, por lo que es necesario diseñar sistemas de frenado regenerativo que aprovechen gran parte de la energía y de esta manera, llegar a la obtención de más eficiencia y así, sean generados mejores sistemas.

Por otra parte, en la actualidad se tiene la certeza que la mayoría de las bicicletas tienen frenos convencionales que funcionan a fricción, por lo que fue de interés enfocar el problema de diseñar frenos regenerativos para una bicicleta, esto fue con el fin de mirar las diferentes variables, y la regeneración obtenida.

Ahora bien, la regeneración se puede hacer de varias formas, se escogió la regeneración mediante la transformación de energía cinética a energía potencial y eléctrica, se diseñó el sistema de frenado regenerativo para la bicicleta mediante dos frenos uno mecánico compuesto por un resorte que hace el proceso de transformación de energía cinética a energía potencial elástica, mientras que el otro

freno la convierte en energía eléctrica que realiza el proceso de transformación de energía mediante un motor y se almacena en una batería.

En el desarrollo del proceso de diseño, se explica de forma resumida la teoría respecto de los frenos, los diferentes sistemas regenerativos, se da a conocer las variables que intervienen en el funcionamiento y las ecuaciones utilizadas con las que se analizó la transformación de energía, el aumento en la eficiencia debido a la regeneración.

Del sistema de regeneración se explica su funcionamiento y analiza la simultaneidad que debe tener los frenos regenerativos: eléctrico, mecánico, y los frenos convencionales. Luego se presenta las alternativas que se tuvieron en cuenta con el dimensionamiento de las propuestas elegidas, y finalmente se muestran los resultados de los sistemas de regeneración.

En conclusión, se obtuvo el diseño de dos frenos regenerativos que almacenan energía en forma de energía potencial elástica y eléctrica, logrando adecuar estos en una bicicleta.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. IDENTIFICACION DEL PROBLEMA

La movilidad en las principales ciudades del mundo se ha venido afectando tras el aumento de vehículos automotores que funcionan con combustibles fósiles, estos, además de contaminar el aire, también ocasionan grandes atascamientos.

Como medio alternativo de transporte se ha implementado el uso de la bicicleta debido al poco espacio que ocupa en la carretera y genera cero emisiones. Este vehículo de tracción humana es una de las alternativas más viables, por ende, se hace indispensable desarrollar mejoras continuas a esta máquina, como se ha dado a lo largo de la historia desde la bicicleta, que se impulsaba con la fuerza humana, hasta las actuales movidas con motores eléctricos, estas con diferentes elementos de máquinas han logrado un aumento significativo en su eficiencia.

La eficiencia se define según la RAE: “Capacidad de disponer de alguien o de algo para conseguir un efecto determinado”¹, en ingeniería generalmente se le suele dar rangos cualitativos con los que medimos que tanto se produce con los recursos que se disponen.

Los recursos energéticos cada día se ven más reducidos como consecuencia de la creciente demanda energética de las sociedades, por tanto, se hace necesario la mejora y optimización en los procesos que involucren transformaciones de energía. El sistema de frenado de casi la mayoría de las máquinas se concibe como un dispositivo que disipa energía generalmente en forma de calor generada de la

¹ Diccionario de la lengua española, Real Academia Española, “eficiencia”, [en línea]. [Consultado: 8 de octubre de 2019]. Disponible en: <https://dle.rae.es/?id=EPVwpUD>

fricción entre dos elementos rotativos con velocidades diferentes, disipar energía en un sistema equivale a desechar o sacar esta de un sistema mirando desde otra perspectiva esta es desaprovechada, además de esto los frenos convencionales utilizan un material de desgaste al cual generalmente se le llama pastilla o mordaza con el que se produce la fricción, después de uso este material de desgaste es desechado, a gran escala este puede llegar a producir grandes afecciones al medio ambiente.

En las principales ciudades de Colombia, como Bogotá, la movilidad es un defecto²; en esta ciudad, debido a la cantidad de vehículos por metro cuadrado disponible para el tránsito, como respuesta a esta solución se han desarrollado diferentes proyectos como fomentar el uso de bicicletas y de patinetas eléctricas como medio de transporte. En Bucaramanga se han construido ciclo rutas³ y generado un proyecto de alquiler de bicicletas donde busca que la comunidad de la ciudad use más la bicicleta como medio de transporte.

Figura 1. Ciclorruta Bucaramanga.



² COMPAREMEJOR. *Movilidad en Bogotá, un problema de todos*. [En línea]. Medellín. [2014] [Consultado 9 de octubre 2019]. Disponible en: <https://comparamejor.com/seguros-articulos/seguros-para-vehiculos-todo-riesgo/movilidad-en-bogota-un-problema-de-todos>

³ CARACOL RADIO. *Así va la construcción de ciclorrutas*. [En línea]. Bucaramanga. [2019]. [Consultado 9 de octubre 2019]. Disponible en: <https://www.bucaramanga.gov.co/noticias/tag/ciclorrutas-en-bucaramanga/>

Fuente: Alcaldía de Bucaramanga. Obras Publicas. Bucaramanga. [2017]. [Consultado 9 de octubre de 2019]. Disponible en <https://www.bucaramanga.gov.co/obras-publicas/2017/11/24/cicloruta/>

Con el objetivo de aumentar la autonomía de los vehículos eléctricos, varios fabricantes han desarrollado frenos regenerativos para que una parte de la energía de frenado se convierta en energía eléctrica y con esta cargar una batería que brindara posteriormente energía al motor eléctrico del vehículo, estos frenos son usados también por la Fórmula Uno para el uso de la energía que se obtiene al frenar, lo que permite adquirir más potencia al vehículo en algunas secciones de la pista. Estos tipos de frenos regenerativos se les denomina KERS, que hace referencia a un sistema de recuperación de energía cinética, de estos frenos existen algunos que convierten esa energía cinética en energía eléctrica o potencial. El beneficio de los sistemas regenerativos ha logrado un buen desempeño debido a que, además de aumentar la vida útil de los sistemas de frenos convencionales que son necesarios, ya que el frenado regenerativo actualmente no tiene total asistencia para detener el vehículo como se requiere, también han aumentado la autonomía de los vehículos híbridos y en algunos servir como asistencia de potencia para arranque de estos sistemas.

1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Una de las principales capacidades del ingeniero mecánico es optimizar procesos de conversión de energía tal como lo realiza un freno regenerativo, ya que con este se recupera energía para su posterior almacenamiento y su uso. La optimización de procesos energéticos se hace más importante a medida que crece la demanda energética, ya que esto ha llevado a abusar de los recursos energéticos que se poseen.

La bicicleta es un medio de transporte económico, versátil y asequible para la mayoría de las personas, por lo que la hace ser solicitada por una gran cantidad de usuarios. En este respecto, la fuente energética de este vehículo es la fuerza humana que es entregada de las piernas hacia el pedal. La energía que se gasta en pedalear genera una fatiga en la persona que la usa, por lo tanto, el hacer más eficiente este proceso hace que la persona realice menor esfuerzo, gaste menos calorías y se transporte más rápido a su destino utilizando la energía del frenado para luego almacenarla con el propósito de utilizarla posteriormente en el arranque o para cargar una batería, lo que le ahorraría al usuario de la bicicleta el tener que romper la inercia y en el gasto de electricidad.

Colombia posee una de las ciudades del mundo con más bici usuarios, siendo esta ciudad su capital Bogotá, eso según Copenhagenize Index⁴, quien anualmente clasifica todas las ciudades del mundo con respecto a qué tan favorables son para un ciclista urbano. La mayoría de los ciclistas en Bogotá utilizan este medio para llegar a su trabajo o desplazarse dentro de la ciudad, por lo que la disminución en el tiempo de los trayectos y el estar menos agotados mejoraría la calidad de vida de los bici usuarios. Cabe resaltar que en Bucaramanga se adelanta la construcción de redes de ciclo rutas que permitirán a los usuarios de bicicletas tener una mejor movilidad y seguridad a la hora de transitar por la ciudad.

⁴ Copenhagenize Design Co. *THE MOST BICYCLE-FRIENDLY CITIES OF 2019*. Copenhagen, Bruselas y Montreal. [2019]. [Consultado 18 de octubre de 2019]. Disponible en: <https://copenhagenizeindex.eu/>

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Continuar con la misión de la Universidad Industrial de Santander contribuyendo con la innovación científica y tecnológica para la construcción de soluciones a necesidades propias y del entorno mediante el diseño de un sistema de frenado que aproveche la energía cinética que se pierde al frenar una bicicleta.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseño en detalle de un sistema de frenado regenerativo para una bicicleta con las siguientes características:

- El nivel energético de referencia será para una persona de 80 Kg, una bicicleta de 15 Kg con rin de 26 pulgadas y velocidades entre 10 a 30 km/h.
- Uso de elementos elásticos que actúen cuando se requiera detener la bicicleta en cortas distancias y funcionar luego como asistencia para arrancar la bicicleta, este se implementa en la llanta trasera.
- Uso de un motor-generator eléctrico con una batería para que actúe como generador cuando se transita por una cuesta abajo y motor en caso de necesitar asistencia al pedaleo, este se implementa en la llanta delantera.
- Uso de los frenos convencionales de bicicletas para modo de conducción normal, trabajo de forma sinérgica con el sistema de regeneración y por seguridad en caso de que falle el sistema de frenado regenerativo.

- Calcular la cantidad de conversión energética teórica de energía cinética en potencial y eléctrica al frenar la bicicleta en pendientes entre 0° a 20° .
- Estudiar la viabilidad del sistema de frenado regenerativo desarrollado en cuanto a su relación costo-beneficio.
- Desarrollar un modelo funcional que muestre el funcionamiento del sistema mecánico y eléctrico.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. GENERALIDADES DE LOS FRENOS REGENERATIVOS

Los frenos utilizan diferentes métodos de transformación de energía para poder cambiar la energía de entrada en otros tipos de energía. Los frenos convencionales mediante el desgaste o fricción entre dos materiales generan calor, mientras que los frenos regenerativos almacenan la energía de frenado para su posterior utilización.

Freno Regenerativo: Es un tipo de freno que consiste en detener una maquina en movimiento transformado, parte de la energía de movimiento en otro tipo de energía que se almacena para ser entregada de nuevo al sistema al ponerse este en movimiento. Son también llamados KERS por sus siglas en inglés *kinetic energy recovery system*.

Figura 2. Freno regenerativo



Fuente: EXCELENCIAS DEL MOTOR. El Freno Regenerativo. [en línea]. [2019]. [Consultado: 10 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://www.excelenciasdelmotor.com/autos/el-freno-regenerativo>

3.1.1. Tipos de almacenamiento energético. La función del freno se basa detener un cuerpo o una máquina que esté en movimiento; para ello, es necesario que transforme la energía inicial en otro tipo de energía. En los frenos convencionales esta energía se convierte en calor, pero en sistemas de frenado regenerativo esta energía no se pierde, sino que se almacena. A continuación, se describen las principales formas de almacenamiento energético:

Bombeo hidroeléctrico: Es un sistema de almacenamiento de energía a gran escala que consiste en bombear agua desde un punto bajo a un punto alto, el agua es depositada en un pozo o tanque donde se almacena para que al momento de ser usada y se conecta a una bomba que función como generador eléctrico. Este es el sistema de almacenamiento a gran escala más eficiente en funcionamiento. Es una tecnología rentable y probada que proporciona estabilidad al sistema eléctrico y puede generar cantidades significativas de energía limpia con tiempos de respuesta rápidos⁵.

Aire comprimido: En momentos de exceso de energía un motor reversible es actuado, el aire se almacena a altas presiones en cubículos bajo tierra, luego cuando se necesite la energía almacenada en estos, el aire sale del depósito para ser conectado a otro sistema que convierte esta energía en forma de presión a otro tipo de energía.

Baterías: Es un dispositivo que convierte energía eléctrica en energía química. Este proceso se desarrolla en celdas electroquímicas que permiten el movimiento de iones entre los electrodos almacenando energía química.

⁵Almacenamiento de energía: la clave de un futuro descarbonizado [en Línea]. Iberdrola. [2020]. [Consultado 10 de marzo 2020]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/almacenamiento-de-energía-eficiente>

Materiales elásticos: Almacena energía en forma de potencial elástica. Funciona mediante la deformación de un material elástico, los resortes y amortiguadores son un ejemplo de este.

Por gravedad: Consiste en un sistema por el cual, mediante un motor sube un objeto de gran masa una altura de forma que la energía se almacena en forma de energía potencial, para la entrega de energía hará el proceso contrario.

Volantes de inercia: está compuesto de un volante de gran inercia que almacena energía cinética a través del contacto con un eje que suministra un torque haciendo que se mueva el volante de inercia.

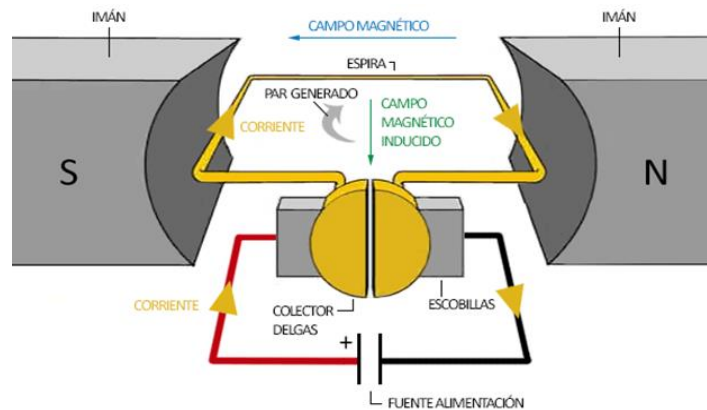
Pilas de combustible de hidrógeno: Debido a las propiedades del hidrogeno este es el compuesto más usado para almacenar energía en pilas de combustibles. Almacena energía química debido al abastecimiento de combustible en la pila.

Supercondensador: Los condensadores de alta capacidad son dispositivos capaces de almacenar grandes cantidades de energía eléctrica en forma de cargas electrostáticas, por lo que no se presentan reacciones químicas. La característica de un supercondensador de cargarse y descargarse en pocos segundos lo hace ideal para suministrar energía y almacenarla en cuestión de segundos.

3.2. MOTORES DC

Un motor de corriente continua o DC (*Direct current*), es aquella máquina eléctrica que transforma energía eléctrica continua en energía mecánica rotativa. Tiene la capacidad de convertirse en un generador; esto es, que si se le proporciona energía mecánica rotativa se puede obtener energía eléctrica. Se menciona también, que este tipo de máquina funciona bajo principios físicos como la ley de Faraday, la cual establece la producción de una diferencia de potencial eléctrico y corriente cuando existe una velocidad relativa entre el conductor eléctrico y un campo magnético, como es el caso de un generador y al contrario para un motor. Tiene dos principales piezas el rotor que es el que se mueve y el estator que es la parte fija; la interacción de estas piezas produce el fenómeno físico ya anteriormente mencionado. A continuación, se muestra un esquema de lo anteriormente descrito:

Figura 3. Principio de funcionamiento motor DC



Fuente: LUISLLAMAS. Tipos de Motores Rotativos para Proyectos de Arduino: Motores de corriente continua. Copenhague, Bruselas y Montreal. [En línea]. [2016]. [Consultado: 12 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://www.luisllamas.es/tipos-motores-rotativos-proyectos-arduino/>

Como se puede apreciar en la figura 3 en flujo de corriente que produce la fuente de alimentación y campo magnético que se genera por los imanes originan una fuerza perpendicular a ambos que ocasiona la velocidad relativa entre el conductor eléctrico y el campo magnético. También se tienen otros elementos como lo son el

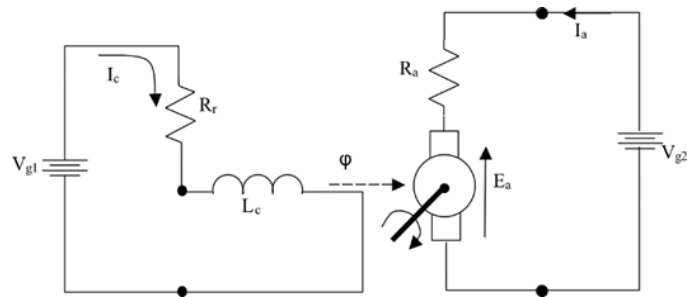
colector de delgas o conmutador encargado de cambiar el sentido del flujo de la corriente para que el rotor gire siempre en el mismo sentido, las escobillas que unen el rotor y la parte fija del motor. Asimismo, se tienen otros componentes como la carcasa del motor, el eje, ventilador (motores de grandes potencias), etc. Es conveniente anotar que un motor DC convencional tiene embobinados por todo el estator, no como en el esquema donde sólo se representa uno de estos.

3.2.1. Tipos de motores DC .Hay cinco principales tipos de motores DC, que entre ellos difieren la configuración de algunos de sus componentes, lo que genera variaciones significativas en el comportamiento de sus variables. Estos cinco son los siguientes:

- Motor de excitación separada: Es aquel motor en el cual el circuito del campo magnético se alimenta de una fuente de voltaje independiente.
- Motor de excitación en derivación: En este tipo de motor el campo obtiene su potencia a través de las terminales del inducido del motor.
- Motor de imán permanente: Son muy comunes en aplicaciones de baja potencia, generalmente son económicos y más pequeños que el correspondiente a excitación separada. Sin embargo, su principal desventaja es que no pueden producir una densidad de flujo alta, esto es, que tendrán una menor relación torque inducido por ampere de corriente eléctrica, además de correr el riesgo de desimantarse.
- Motor en serie: Sus devanados de campo se componen de pocas vueltas conectadas en serie con el circuito del inducido.
- Motor compuesto: Este tiene un campo generado por un circuito en derivación y en serie.

Cada uno de los tipos motores anteriormente nombrados, tiene un circuito equivalente que aproxima se aproxima al comportamiento de estos. A continuación, se mostrará el equivalente a un motor de excitación separada:

Figura 4. Circuito equivalente motor DC de excitación separada.



Fuente: SMART DREAMS. Motor de Corriente Continua. [En línea]. [2010]. [Consultado: 15 de marzo de 2020]. Disponible en: <http://smartdreams.cl/motor-de-corriente-continua/>

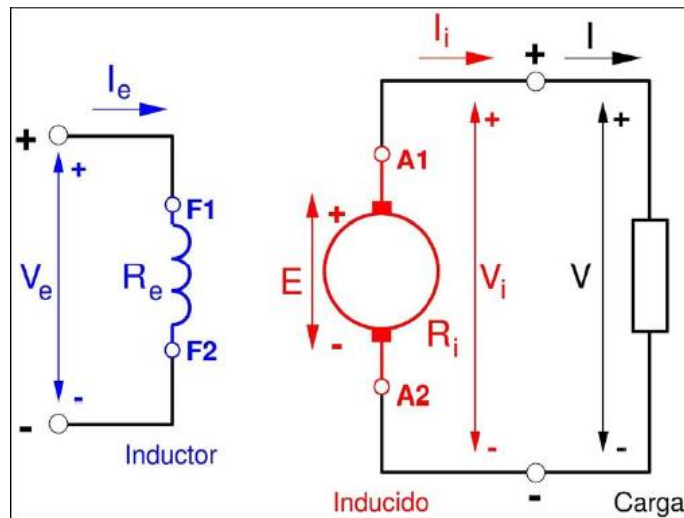
En la figura 4 se pueden apreciar dos circuitos: el de la izquierda es el circuito que produce el campo magnético, y el de la derecha es el circuito que produce el flujo de corriente. En este sentido, para el caso de un motor de excitación separada se tiene que los dos circuitos están alimentados por fuentes diferentes y para un motor en derivación, la fuente empleada en ambos circuitos es la misma, por consiguiente, la configuración de los circuitos está en paralelo. El circuito de un motor de imán permanente se asemeja el de excitación separada con la excepción de que el campo magnético generado no es producido por un electroimán, sino por un imán permanente, por lo tanto, su campo magnético siempre estará dado por el imán. Para un motor DC en serie y en paralelo, el circuito del campo está alimentado por la misma fuente que el circuito del inducido, estos se diferencian por la forma en la que se conecta la bobina del electroimán. También se puede encontrar el motor DC compuesto que combina la configuración en serie y en paralelo.⁶

⁶CHAPMAN, Stephen J. Maquina eléctricas. 5 ed. México: McGraw-Hill/Interamericana de editores, 2012. Capítulo 8. 502 p. ISBN: 978-0-07-352954-7

3.3. GENERADORES DC

Un generador de corriente continua es la máquina DC que recibe energía mecánica y la transforma en energía eléctrica. Un generador de corriente continua no tiene diferencia alguna con el motor DC a excepción del flujo de energía, de ahí, se subdividen en 5 tipos los cuales ya fueron presentados en la anterior sección, debido a que se trabajará con un motor de imanes permanentes se profundizará en este. En la siguiente figura se mostrará el circuito y las ecuaciones que rigen este tipo de motores.

Figura 5. Esquema generador excitación independiente.



Fuente: RODRÍGUEZ P., Miguel. [Imagen]. generador de excitación independiente. MAQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA. España: Universidad de Cantabria. 2017. P. 72.

Como se puede apreciar en la figura 5, este generador consta de los mismos elementos que un motor de excitación independiente, a expresión de que en no está conectado a una fuente de energía si no a una carga eléctrica. A continuación, se mostrará la ecuación que modela este circuito:

$$V = E - R_i i - V_{esc}, \quad (1)$$

$$M = \frac{P_{em}}{\omega} = \frac{E * I}{\omega} = K_{fem} * I, \quad (2)$$

Donde: V es el voltaje de la carga, E la fuerza electromotriz (f.e.m.), V_{esc} caída de voltaje en las escobillas, R_i resistencia del circuito del inducido, I la corriente eléctrica, M par de la maquina DC, P_{em} Potencia electromagnética, K_{fem} constante de la fuerza electromagnética [$V * s/rad$], ω velocidad angular [rad/s].

Las ecuaciones mostradas permiten modelar el comportamiento mecánico y eléctrico de un generador DC de excitación independiente. La ecuación (1) modela el comportamiento del circuito eléctrico utilizando la ley de Kirchhoff, la ecuación (2) define el par generado por un maquina DC.⁷

3.4. BATERÍAS DC

Las baterías son un elemento de relevancia en la actualidad debido a los grandes avances de sistemas eléctricos y electrónicos; son elementos que almacenan energía eléctrica por medio de un proceso químico. Las baterías pueden clasificarse en dos grandes grupos, las pilas cuya carga no se puede renovar a menos que se sustituyan los compuestos químicos de esta, y aquellas que tienen la capacidad de reactivarse, brindándole una corriente eléctrica prolongada en el sentido inverso en el que normalmente fluye la corriente. Algunos de los parámetros más importantes para la clasificación de una batería son:

Profundidad de descarga: También DOD (*Depth Of Discharge*) hace referencia a la relación existente entre la capacidad entregada por la batería y su capacidad nominal, ambos valoren en Ah (amperios-hora).

⁷ RODRIGUEZ, Miguel. Maquinas de corriente continua. España: Universidad de Cantabria. 2017. P. 72.

Tensión en vacío: es diferencia de potencial eléctrico en las salidas de la pila cuando esta se encuentra sin ningún tipo de carga eléctrica, esta depende los compuestos utilizados en su construcción.

Tensión en circuito cerrado: Como su nombre lo indica es la tensión que se presenta en la salida de la batería cuando esta se conecta a una carga eléctrica, esta tensión tiende a disminuir a medida que aumenta la corriente eléctrica de descarga.

Resistencia interna: es la resistencia que se asocia a la batería eléctrica, se utiliza para modelar el comportamiento de la corriente y la tensión en esta, la resistencia interna se puede calcular teniendo en cuenta la variación de voltaje que se produce en la misma al colocar una carga a continuación se muestra en la ecuación que describe esto.

$$R_{ib} = \frac{V_v - V_c}{I} = \frac{V_v}{I} - R_{ec}, (3)$$

Donde: R_{ib} es la resistencia interna de la batería, V_v voltaje de la batería al vacío, V_c voltaje batería con carga eléctrica, R_{ec} resistencia equivalente a la carga, I corriente eléctrica⁸

⁸ PEÑA ORDOÑEZ, Carlos. *Estudio de baterías para vehículos eléctricos* [En línea]. Proyecto fin de carrera electrónica industrial. Madrid. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de tecnología electrónica. [2011]. 105 p. [Consultado 17 de julio de 2020] Disponible en https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/11805/PFC_Carlos_Pena_Ordonez.pdf%3Bjsessionid=2DC894EBB5D5CE70EA438751452EBE85?sequence=1

3.5. ELEMENTOS ELÁSTICOS

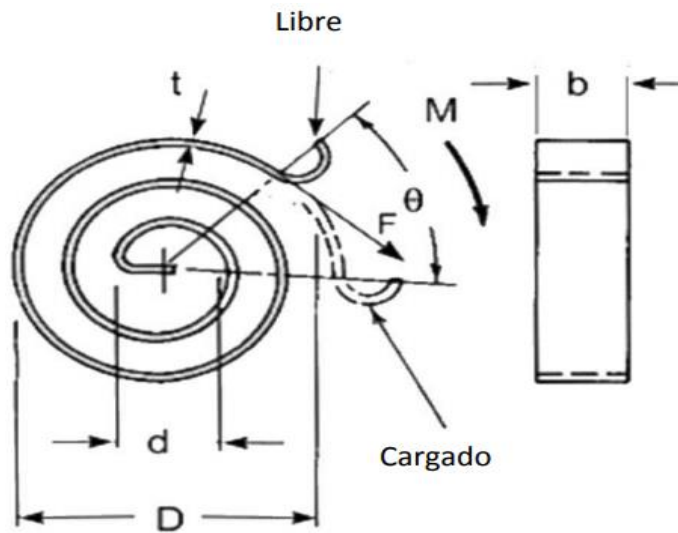
3.5.1. Resorte Espiral a Torsión. Los resortes espirales a torsión son deformados mediante un momento torsor que almacenan, de esta forma, energía potencial elástica. En este sentido, entre mayor número de espiras, mayor será el torque que genera, y a su vez la absorción de energía. Al desenrollarse, el resorte devuelve la energía almacenada al sistema. El diámetro del eje de soporte es menor que cualquier otro resorte que almacena la misma energía, por ello su principal ventaja es la de poderse conectar de forma más adecuada a piezas que giran entre sí y de forma invertida.

Entre los resortes de torsión están los convencionales y los pretensados, su diferencia es la variación del par torsor que en el último será mayor. A causa de esto, su vida útil se ve reducida en una relación de 100 con respecto al primero, sin embargo, la energía almacenada es mayor para un pretensado entre un 25 a 50%⁹ y relación de ángulo de rotación-torque más constante.

El proceso de fabricación del resorte en espiral es doblar un fleje que d la forma de espira según las características de este, las cuales, entre ellas está el número de espiras, diámetro interno, diámetro externo y la sección transversal del fleje. Al darle la forma de espiral al fleje, en caso de ser de acero se le realiza tratamiento de temple para aumentar la resistencia del resorte debido al gran esfuerzo de flexión que experimenta al ser deformado.

Figura 6. Resorte torsional.

⁹ PUERTOLLANA V., David. Diseño de un Mecanismo Recuperador Dd Energía Cinética para la Bicicleta y Cálculo Aproximado de sus Parámetros. Zaragoza. 2013. Pág. 57 Trabajo de grado. Universidad Zaragoza.



Fuente: ROYMECH. Diseño de resorte en espiral. [En línea]. [2009]. [Consultado: 17 de julio de 2020]. Disponible en: http://steeljis.com/roymech/springs/springs_spiral.php

Al funcionar la flexión, los parámetros del resorte dependen de la geometría y el material con el que es fabricado, por eso la constante de elasticidad depende del par torsor y el ángulo de rotación al cual es rotado. La relación entre estos para los resortes en forma de espiral se considera constante, esta se define mediante:

$$K = \frac{M}{\theta} = \frac{Ebt^3}{12L}, \quad (4)$$

Al despejar el ángulo de rotación del resorte de la ecuación (4) se obtiene que este depende del momento torsor que sea aplicado.

$$\theta = \frac{12ML}{Ebt^3}, \quad (5)$$

Donde t es el espesor, b el ancho, L la longitud y E el módulo de elasticidad del fleje con el que este fabricado el resorte. La longitud L , está dada por:

$$L = \frac{\pi}{2} n(D + d), \quad (6)$$

Donde d es el diámetro del eje, D el diámetro de la carcasa y n es número de espiras del resorte. La inercia del resorte será la de un rectángulo y el esfuerzo de flexión máximo del resorte está dado por:

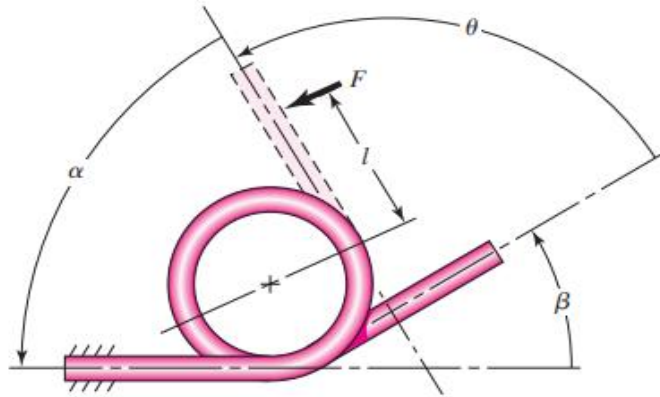
$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}c}{I} = \frac{Eh\theta_{max}}{\pi n(D_{int} + D_{ext})}, \quad (7)$$

Despejando L de la ecuación (5) se obtiene la constante elástica del resorte en función de las principales características geométricas que definen al resorte.

$$k = \frac{Eb^3}{6\pi n(D_{int} + D_{ext})}, \quad (8)$$

3.5.2. Resortes de espiras helicoidales de torsión. Es un resorte en el cual, sus extremos están configurados para aplicar torsión. Estos conectan una fuerza a una distancia respecto del eje de las espiras, con el fin de aplicar un momento torsor. La fricción entre espiras debe evitarse, por lo que se fabrica de forma que se separen las espiras del cuerpo. Estas necesitan un mandril para tener soporte reactivo cuando sus extremos no se puedan incorporar, con el objetivo de mantener la alineación y servir de soporte para evitar el pandeo. El alambre de un resorte de torsión trabaja a flexión, donde estos se deben apretar más cuando se vayan enrollando; al aumentar el momento torsor el diámetro interior de la espira disminuye, por lo que el mandril debe ser de menor diámetro interior que la espira para el servicio de trabajo máximo.

Figura 7. Resorte helicoidal de torsión



Fuente: BUDYNAS, Richard y NISBETT, Keith. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. 8 ed. México: McGraw-Hill Interamericana. 2008. p. 534. ISBN: 9789701064047.

El número de vueltas del cuerpo será la suma de las espiras completas más la relación con el ángulo de posición inicial β de la siguiente forma.

$$N_b = \text{entero} + \frac{\beta}{360^\circ}, \quad (9)$$

En los resortes helicoidales de torsión el esfuerzo que experimenta es de flexión por tanto este puede obtenerse a partir de la teoría de la viga curva expresada en la forma.

$$\sigma = \frac{K_i M c}{I} = K_i * \frac{32M}{\pi d^3}, \quad (10)$$

Donde d , es el diámetro del alambre, M es el par torsor aplicado y K_i , es un factor de corrección del esfuerzo que depende de la sección transversal del alambre. Wahl determinó analíticamente que los valores de K_i para alambre redondo, está dado por:

$$K_i = \frac{4C^2 - C - 1}{4C(C - 1)}, \quad (11)$$

Donde C , es el índice del resorte, que es igual D/d , donde D , es el diámetro de la espira.

El número de espiras activas está dado por:

$$N_a = N_b + \frac{l_1 + l_2}{3\pi D}, \quad (12)$$

Donde l_1 y l_2 , son las longitudes de cada extremo del resorte.

El efecto de la fricción entre las espiras y el mandril es tal que la constante elástica del resorte en unidades de torsión por vuelta es:

$$k' = \frac{d^4 E}{10.8 D N_a}, \quad (13)$$

4. DISEÑO CONCEPTUAL

Este proyecto tiene como principal propósito el enfoque hacia la población de los ciclistas que transitan diariamente por la ciudad, por lo que su diseño debe adecuarse a los requerimientos que demande el consumidor, para que, de esta forma, se pueda plantear un sistema de frenado regenerativo que cumpla con las demandas mencionadas.

4.1. DESPLIEGUE DE LA FUNCION CALIDAD

La información obtenida a partir de los individuos que usan la bicicleta como medio de transporte, recalca para el ingeniero la importancia de la investigación y el desarrollo de una solución que permita el mejoramiento de la eficiencia de una bicicleta, y con ello, efectuar una alternativa más en cuanto a vehículos de tracción humana amigables con el medio ambiente y para transporte personal. Entre esta información la más importante es el conjunto de requerimientos que estos presenten respecto al sistema de freno regenerativo, por lo que, con ello, se hace una evaluación de los mismos con respecto a los requerimientos ingenieriles. Este procedimiento ayuda a encontrar la mejor alternativa a través del uso de la *House of Quality*.

4.1.1. Requerimientos del Consumidor

- Seguridad
- Tamaño
- Peso
- Rendimiento
- Bajo mantenimiento
- Autónomo
- Estabilidad
- Costo
- Fácil uso
- Estética

4.1.2. Requerimientos de ingeniería

- Seguridad
- Economía
- Eficiencia
- Adaptable
- Peso
- Bajo impacto ambiental
- Tamaño
- Fácil Manufactura
- Ergonomía
- Estabilidad
- Disponibilidad de repuestos

4.2. MATRIZ DE CALIDAD QFD

Se realiza la matriz de calidad QFD organizando los requerimientos del consumidor e ingenieriles, para así, poder sacar los cuatro requerimientos con más relevancia y en los que se centrará para elegir la alternativa que mejor se ajuste a estos. Se calificará de 1 a 10 cada relación entre los requerimientos, y el valor de cada requerimiento del consumidor de 1 a 10 como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Matriz de calidad QFD

Columna #		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Requerimiento de ingeniería	Seguridad	Económico	Eficiencia	Adaptable	Peso	Tamaño	Fácil manufactura	Ergonomía	Estabilidad	Disponibilidad de Repuestos	Bajo impacto ambiental
Requerimiento del consumidor	Valor											
Seguridad	10	100	60	50	60	50	40	40	90	80	50	20
Rendimiento	9	27	45	90	45	72	63	36	27	63	18	45
Estabilidad	8	72	24	40	24	16	16	8	32	80	16	16
Costo	7	14	70	35	42	56	56	49	63	14	63	21
Peso	6	24	48	54	30	60	42	36	24	12	12	36
Bajo mantenimiento	5	35	45	20	25	5	15	30	5	20	50	40
Fácil uso	4	24	4	16	16	0	8	12	36	32	4	0
Tamaño	3	9	24	24	24	27	30	21	6	9	6	24
Autonomía	2	0	3	5	10	4	10	14	2	4	2	16
Estética	1	0	8	1	1	0	8	5	8	1	1	1
Total ponderado	3134	305	334	340	271	296	292	243	295	315	224	219
Porcentaje		9.732	10.66	10.85	8.647	9.445	9.317	7.754	9.413	10.05	7.1474	6.988

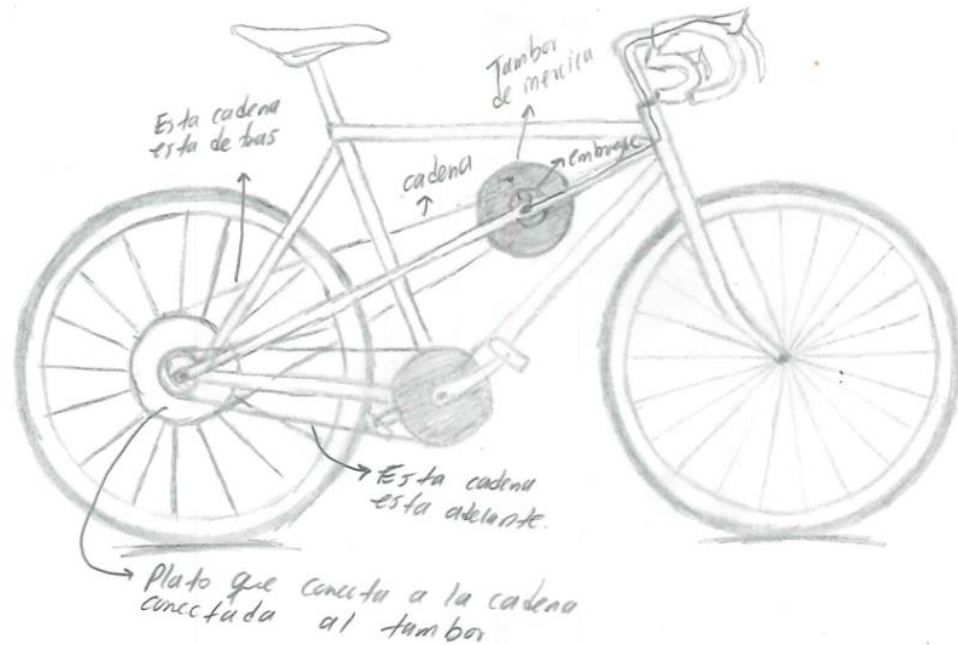
Fuente: Autores.

4.3. PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS

Se plantearon tres alternativas de solución respecto al problema, de forma que diera cumplimiento a los objetivos planteados para poder ser evaluados según los resultados de la matriz de calidad realizada.

4.3.1. Alternativa 1: Sistema de freno regenerativo de tambor de inercia. Esta alternativa se planteó proponiendo un tambor ubicado en la parte central de la bicicleta como se observa en la figura 8. El funcionamiento de este sistema consiste en aprovechar la inercia que tiene el tambor por su peso, forma y tamaño. Al lado del tambor irá un sistema de embrague que será accionado de forma manual cuando se dé la acción de frenar y cuando se entregue la energía almacenada en forma de energía rotacional. El sistema de transmisión de potencia consiste en dos engranajes conectados mediante una cadena al lado contrario de la cadena principal. Cuando la bicicleta esté en marcha y se desee frenar, se activa el embrague para que, por medio de la resistencia al movimiento del tambor, se transforme la energía cinética de la bicicleta al tambor, luego se desembraga y el tambor permanecerá girando hasta que se vuelva accionar el embrague dando un impulso que facilitará el arranque de la bicicleta.

Figura 8. Esquema primera alternativa



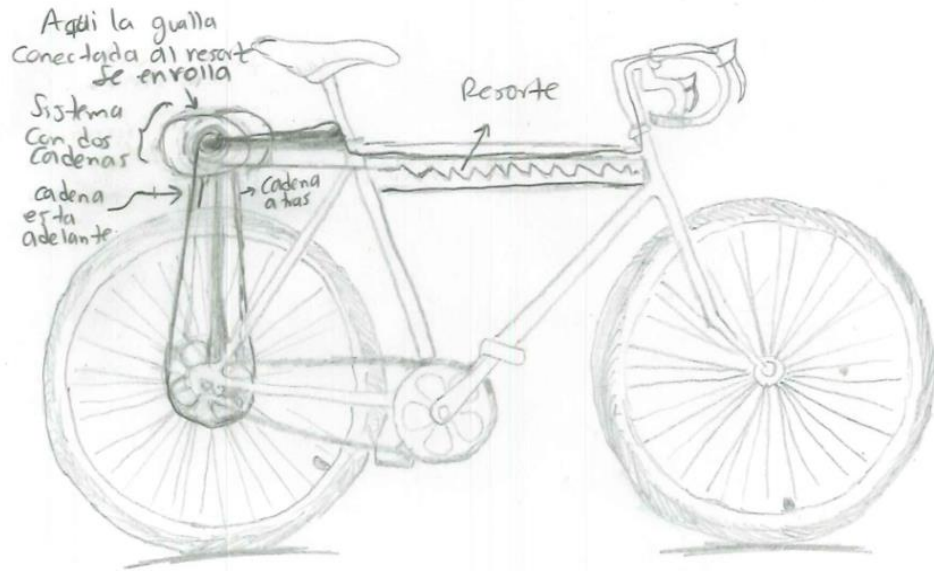
Fuente: Autores.

4.3.2. Alternativa 2: Sistema de freno regenerativo de resorte de tensión. En la figura 9, se observa la ubicación del resorte al interior de un tubo de la bicicleta, este se estirará cuando se requiera frenar y se contraerá cuando se desee aprovechar la energía potencial elástica almacenada en el resorte.

Mediante unos engranajes conectados a una cadena al lado derecho e izquierdo se transmitirá la energía para frenar la bicicleta y para la regeneración. En este sentido, en el sistema de transmisión de potencia al lado izquierdo será de utilidad deformar el resorte para que este almacene energía potencial, el eje que se muestra junto al resorte se irá enrollando una guaya para que, al rotar, esta se enrolle y al estar conectada al resorte lo estirará. El lado derecho servirá para transmitir la energía potencial elástica del resorte hacia el engranaje conectado a la rueda trasera, y dará un empuje hacia adelante a la bicicleta al invertirse el giro tras contraerse el resorte. Los frenos convencionales mantendrán quieta la llanta trasera al terminar de frenar

con el frenado regenerativo, y un embrague conectado al eje cercano al resorte activará y desactivará el freno regenerativo. La bicicleta tendrá sus respectivos frenos convencionales por seguridad y como apoyo de frenado, al freno regenerativo.

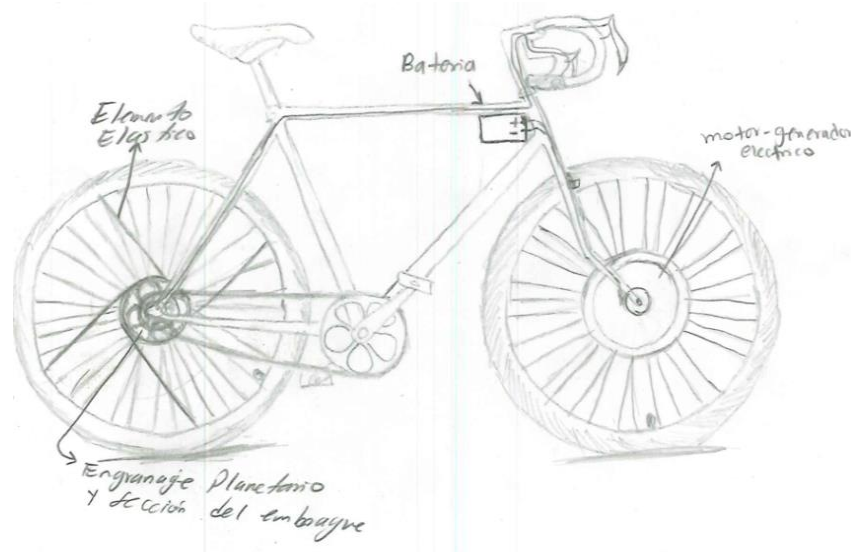
Figura 9. Esquema segunda alternativa



Fuente: Autores.

4.3.3. Alternativa 3: Sistema de freno regenerativo de resorte torsional y generador eléctrico. En esta alternativa se propuso disponer de un generador eléctrico que a la vez actuará como freno regenerativo en las cuestas donde se necesita disminuir la velocidad de la bicicleta, y cuando se requiera detenerla, este se dispondrá en la llanta delantera y la energía eléctrica será almacenada en una batería que se usará para entregar energía al generador, por lo que al presionar un interruptor funcionará como motor sirviendo para asistencia de pedaleo. Ahora bien, un resorte torsional que se activa mediante un embrague es un sistema que está compuesto de un engranaje planetario para cambiar la dirección de giro con respecto a la que va el eje de la llanta trasera, así como muestra en la figura 10. El resorte torsional cuando se activa el freno se deforma contrayéndose, que convierte la energía cinética en energía potencial elástica. Luego de que la bicicleta se detiene el resorte tiende a retomar su posición inicial, pero una cuña con resorte en el eje del engranaje planetario no permitirá esto hasta que se suelte la palanca del embrague. Dicho sistema de freno torsional se usará sólo cuando se necesita detener la bicicleta. Este medio de transporte contará con su sistema de frenos convencionales por seguridad.

Figura 10. Esquema tercera alternativa



Fuente: Autores.

4.4. EVALUACION DE ALTERNATIVAS

De las tres diferentes alternativas que se plantearon, se escoge la que mejor se ajuste a los requerimientos tanto del consumidor como del ente especializado en frenado regenerativo para bicicletas, por ello se escogen los cinco criterios que más relevancia obtuvieron según la matriz de calidad QFD.

Tabla 2. Calificación de alternativas

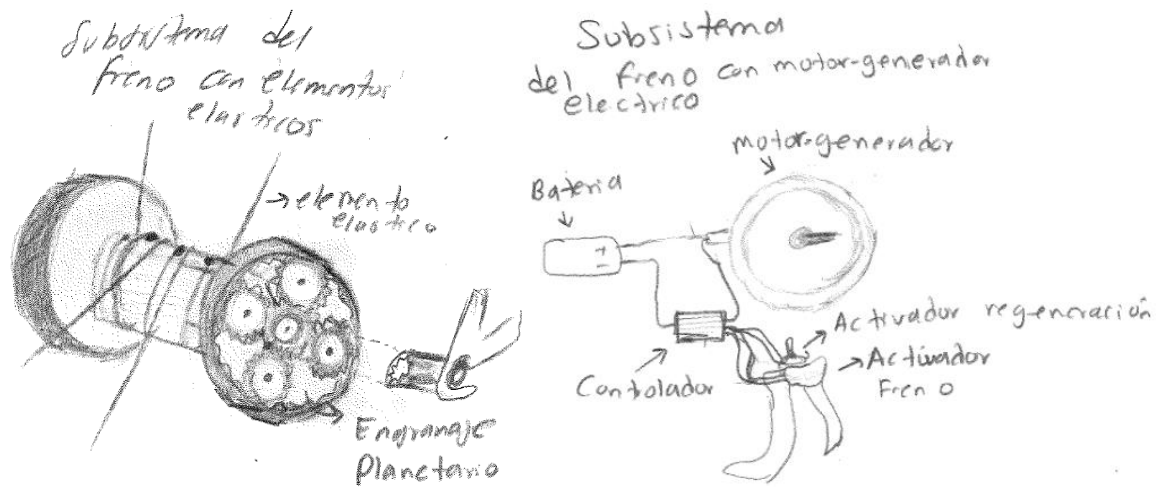
Criterios	Porcentajes	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Eficiencia	30%	3.5	4.2	4.5
Economía	30%	4.5	3.8	3.5
Seguridad	20%	3.5	4.2	4.5
Peso	10%	3.0	3.5	4
Estabilidad	10%	4.5	4	3.5
Total		3.8	3.94	4

Fuente: Autores.

4.5. ESPECIFICACIÓN DE ALTERNATIVA GANADORA

Como se observa, la estrategia que más se ajusta a los requerimientos, según la matriz de calidad es la alternativa 3, por lo tanto, esta se selecciona para abarcar la solución al problema del trabajo de investigación, debido a que proporciona las características necesarias con referencia al tamaño ya que al hacer que sus subsistemas estén ubicados en una cavidad en la que en una bicicleta normalmente se encuentra vacía, hace que no se necesite de más espacio en la bicicleta con el que se pueda ver afectado el entorno de la misma. Al ser de menor tamaño, hace que el peso se reduzca considerablemente, lo que representa una mayor comodidad para el usuario, además, puede ser más económico y estable si los elementos que conformarían el diseño propuesto más sencillos y de menor tamaño. En la figura 11 se observa con más detalle los subsistemas de la alternativa tres.

Figura 11. Subsistemas de la alternativa tres.



Fuente: Autores.

En cuanto a la estabilidad del sistema se observa que por ser un generador eléctrico puede regenerar energía en las bajadas de forma más eficiente, debido a la alta eficiencia que tienen las máquinas eléctricas. Asimismo, el freno conformado por el resorte torsional servirá para cuando se necesite detener por completo la bicicleta a causa de la eficiencia que tienen estos componentes como resultado a su conversión de energía que los hacen ser más estables al frenar y regenerar la bicicleta. También, los componentes de almacenamiento de la energía de frenado son más eficientes que los que tienen las demás alternativas.

Por otra parte, se tiene en cuenta el costo de los componentes que conforman la propuesta de la alternativa tres, la cual hace que sea la de más precio, pero a pesar de ello también hace que tengas más rendimiento en diferentes modos de conducción que tenga la bicicleta, debido a tener freno en la llanta trasera y en la delantera hará que aproveche más la energía del frenado, y esto haga que regenere más energía y tenga cierta autonomía en comparación con las demás alternativas. El freno regenerativo se caracteriza por la forma en la que almacena energía y el diseño de sus componentes, por tanto, estos deben permitir que el sistema sea

óptimo en almacenamiento y eficiencia energética además de permitir al usuario un fácil accionamiento.

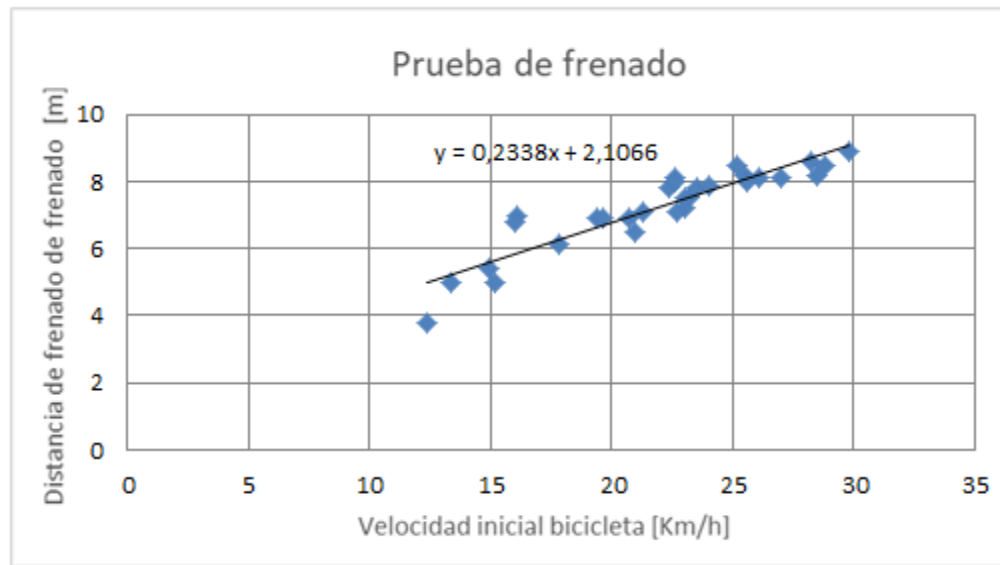
4.5.1. Freno de elementos elásticos. El sistema de frenado regenerativo se debe diseñar para frenar la bicicleta con velocidades de entre 10 a 30 km/h tomando como referencia una persona de 80 kg y una bicicleta de 15 Kg por lo que el elemento elástico debe tener las propiedades para almacenar al menos un 50% de la energía disponible de frenado.

4.5.1.1. Pruebas de frenado normal. El proceso de frenado depende de varias características, como lo son principalmente las variables de la distancia de frenado y la velocidad a la que empieza a frenar, procesos que son determinados por el usuario y las condiciones del ambiente, por ello se realizaron pruebas de frenado para conducción normal de frenado de un usuario, esto con el fin de determinar parámetros como la distancia de frenado para el freno regenerativo trasero. Las pruebas se hicieron cuando el bici usuario iba en movimiento y actuaba el freno hasta detener la bicicleta. Estas pruebas fueron en un circuito con carretera de asfalto y con una bicicleta tradicional de rin 26". Los resultados se encuentran en el Anexo A. Posteriormente, se buscó la relación entre estos datos realizando regresión lineal obteniendo la siguiente relación:

$$df[m] = 0,2338 * V \left[\frac{Km}{h} \right] + 2,1066, \quad (14)$$

Donde df , es la distancia de frenado y V , la velocidad con la que comienza a frenar. Se encontró que para una velocidad de 30 km/h se tiene una distancia de frenado de 9,121 m. En la gráfica 1 se muestra la distribución entre los datos y su tendencia lineal.

Grafica 1. Prueba de frenado



Fuente: Autores.

4.5.1.2. Análisis energético para el sistema de Frenado. Un sistema de frenado es diseñado con el fin de disipar o almacenar la energía cinética al estar en movimiento. Adicionalmente, al frenar el sistema por completo, por lo que, al detener el objeto, su energía inicial se ha transformado en otros tipos de energía dependiendo del tipo de freno usado. Para el caso de los frenos convencionales esta energía se convierte en calor debido a la fricción entre una pieza en movimiento y otra fija. Para los frenos magnéticos es debido a corrientes inducidas que fluyen a través de una carga resistiva que la convierte en calor. También, existen otros tipos de frenos que no son tan comunes: los frenos regenerativos. Estos, en vez de convertir la energía del frenado en calor, la almacena para su posterior uso.

En una bicicleta tradicional los frenos son de banda, en donde el material de fricción esta sobre una banda flexible, que casi rodea a un tambor cilíndrico fijo a la máquina que se va a controlar¹⁰. Cuando se aplica el freno en la bicicleta, la banda se aprieta sobre el rin y ejerce una fuerza tangencial que la detiene. Las características de los componentes en un freno actúan para convertir la energía del movimiento en otro tipo de energía, las cuales deben tener las propiedades para que realice el proceso de conversión de toda la energía que recibe; por ello saber las características de frenado son necesarias para diseñar las propiedades que deben tener estos componentes.

El estado inicial de energía de una bicicleta antes de que el bici usuario active los frenos, se encuentra dado por la energía potencial gravitatoria, la energía cinética de la bicicleta, el bici usuario y las llantas a causa de la velocidad angular de estas, que están dadas por:

$$E_{inicial} = \frac{1}{2}mv_i^2 + 2\left(\frac{1}{2}Iw^2\right) + mgh, \quad (15)$$

Donde $E_{inicial}$ es la energía inicial, m es la masa del biciusuario más la de la bicicleta, v_i es la velocidad inicial, I la inercia de las llantas, w la velocidad angular de las llantas, g la aceleración de la gravedad, y h la altura tomando como referencia el punto en el que se detendrá la bicicleta.

En el estado final se encuentra, ya sea un sistema de frenado regenerativo o tradicional, o ambos que actúan de forma simultánea; el estado energético estará dado por el trabajo de fricción del freno tradicional más la energía almacenada en el freno regenerativo. No obstante, en la alternativa elegida se encuentra un sistema

¹⁰ MOTT, Robert L. Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. México: Pearson Educación. 2006. p.425. ISBN: 9702608120.

de frenado regenerativo en donde un resorte elástico a torsión almacena la energía que trabaja de forma simultánea con los frenos convencionales. Seguidamente se muestra la energía almacenada por el resorte y el trabajo de la fuerza de fricción del freno.

$$E_r = \frac{1}{2}k\theta^2, \quad (16)$$

$$W_{friccion} = -r * F_1 - r * F_2, \quad (17)$$

Donde E_r es la energía almacenada por el resorte, r es el radio de la llanta, las fuerzas del freno a fricción en la llanta trasera son F_1 y en la delantera es F_2 .

El trabajo de las fuerzas no conservativas está dado por la fricción de los frenos y del piso, debido a que la bicicleta durante el frenado no patinará la fuerza de fricción con el piso será estática y no realizará trabajo al cancelarse este, la llanta rueda por ello la velocidad angular es:

$$w = \frac{v}{r}, \quad (18)$$

La altura h depende de la distancia de frenado d y el valor del ángulo de inclinación de la carretera β mediante:

$$h = d\text{sen}(\beta), \quad (19)$$

La relación entre el ángulo de rotación y la distancia recorrida de la bicicleta es:

$$d = r\theta, \quad (20)$$

Con los estados energéticos descritos se hace uso del principio de conservación de la energía que afirma que “la energía no se crea ni destruye, sólo se transforma”¹¹, para calcular la energía que el sistema de frenado debe disipar y almacenar.

$$E_{final} - E_{inicial} = \sum W_{Fuerzas\ no\ conservativas}, \quad (21)$$

Al reemplazar las expresiones (16) a (20) en la ecuación (21) se obtiene la expresión que permite relacionar las variables con el fin de saber las características del sistema de frenado.

$$\frac{1}{2}k\theta^2 - mgr\theta\text{sen}(\beta) - \left(\frac{1}{2}m + \frac{I}{r^2}\right)v_i^2 = -r(F_1 + F_2), \quad (22)$$

Los dos frenos deben ser capaces de disipar la energía de frenado, de forma que el freno regenerativo se diseña para que almacene más energía que los frenos a fricción, para ello, es necesario calcular la energía de frenado según los niveles energéticos expuestos para el diseño. Para el cálculo de la inercia de las llantas se aproximará al de un anillo, tomando como radio el de la llanta. El ángulo de rotación de las ruedas se dará a partir de su giro según la distancia de frenado correspondiente para cada velocidad, donde el radio externo de la llanta¹² es 0.335 m y su peso es 1.3 kg. En la tabla 3 se muestran parámetros que serán constantes para el cálculo de la energía de frenado.

Tabla 3. Parámetros tomados como constantes

m	95 kg
-----	-------

¹¹ SERWAY, Raymond A. y JEWETT, John W. Física para ciencias e ingeniería. Séptima edición. México D.F.: Cengage Learning Editores, S.A. de C.V., 2008, Volumen 1, p. 195. ISBN-13: 978-607-481-357-9. ISBN-10: 607-481-357-4.

¹² Marchas Y Rutas. *Todos los tamaños de rueda en mtb: 26, 27,5, 27,5+, 29, 29+ y fat bike*. [en Línea]. [Consultado 4 de agosto 2020]. Disponible en <https://www.marchasyrutas.es/blog/tamanos-de-rueda-mtb>

<i>I</i>	0.1459 <i>kgm</i> ²
<i>r</i>	0.335 <i>m</i>
<i>g</i>	9.81 <i>m/s</i> ²

Fuente: Autores.

Se calcula la energía para frenado desde una velocidad inicial de 10 km/h hasta 30 km/h variando cada 5 km/h y pendiente de 0° hasta 20° variando cada 2°. En la tabla 4 se muestran los resultados para cada nivel energético en unidades de Joule. Se obtiene un mínimo de 376,54J y máximo de 6.296,05J. La constante elástica del resorte debe ser de tal valor de forma que almacene parte de esta energía trabajando de forma simultánea con los frenos de apoyo.

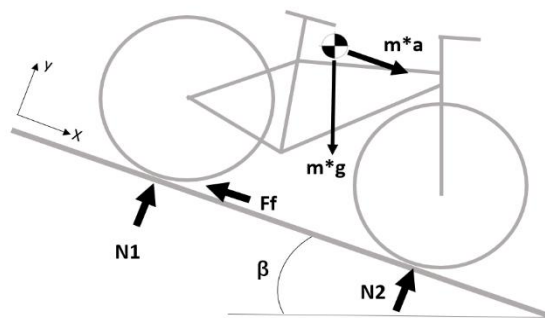
Tabla 4. Resultados según nivel energético.

Velocidad/ Pendiente	10	15	20	25	30
0	376,54	847,22	1506,17	2353,40	3388,89
2	521,10	1029,80	1726,78	2612,02	3685,54
4	665,49	1212,16	1947,11	2870,33	3981,82
6	809,52	1394,07	2166,90	3128,01	4277,38
8	953,02	1575,32	2385,89	3384,74	4571,86
10	1095,82	1755,68	2603,81	3640,22	4864,89
12	1237,74	1934,93	2820,39	3894,13	5156,13
14	1378,62	2112,86	3035,37	4146,16	5445,22
16	1518,27	2289,25	3248,49	4396,01	5731,80
18	1656,54	2463,87	3459,48	4643,37	6015,52
20	1793,24	2636,53	3668,10	4887,94	6296,05

Fuente: Autores.

En la figura 12 se muestra el diagrama de cuerpo libre en estado de movimiento, se hará uso de las leyes de Newton para obtener la máxima fuerza que es capaz de soportar la rueda sin que derrape al frenar, esta fuerza deberá ser menor a la fuerza de fricción estática máxima debido a la llanta y el asfalto, el coeficiente de fricción entre las superficies en seco es $\mu=0.7$, para el siguiente diagrama se despreció la fuerza resistiva del aire.

Figura 12. Diagrama de fuerzas según diseño propuesto.



Fuente: Autores.

Donde m equivale a la masa del ciclista más la de la bicicleta, a es la aceleración lineal que se experimenta al frenar, g la gravedad, $N1$ y $N2$ son las fuerzas normales equivalentes a las llantas trasera y delantera respectivamente, F_f es la fuerza de fricción que se produce al frenar. La resistencia del aire y la inercia rotativa de las llantas se despreciaron.

Utilizando segunda ley de Newton se obtiene:

$$\sum F_x = m * a = m * g * \sin(\beta) - F_r \quad , (23)$$

$$\sum F_y = 0 = -m * g * \cos(\beta) + N_1 + N_2 \quad , (24)$$

$$F_r = \mu * N_1 \quad , (25)$$

Con el fin de facilitar el cálculo se suponen iguales las normales, por lo tanto, la fuerza de fricción y la aceleración en la cual la bicicleta se desliza son:

$$F_r = 0,7 * \frac{95 * 9,81 * \cos(10)}{2} = 321,22 \text{ [N]}$$
$$a = \frac{95 * 9,81 * \sin(10) - 321,22}{95} = 1,68 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

4.5.1.3. Elemento elástico óptimo. Los elementos elásticos tienen la propiedad que al experimentar la acción de una fuerza se tienden a deformar, y una vez que esta se ha dejado de aplicar, recupera su forma inicial; en el proceso de deformación esta almacena energía potencial elástica. En estos elementos a medida que se deforma la energía de almacenamiento aumenta de igual forma la fuerza de restitución, este principio se usará para frenar un sistema en movimiento con una cantidad de energía inicial específica.

Para el proceso de frenado regenerativo en una bicicleta, se requerirá estudiar las condiciones de frenado para el diseño del elemento elástico, por ello es necesario revisar las características de pendiente, energía inicial, distancia de frenado y fricción con el suelo para evitar el derrape. Las características del freno influirán considerablemente en la eficiencia de este, por lo que debe ser compacto y sencillo, se tendrán en cuenta los criterios de peso, volumen y energía que es capaz de almacenar para elegir el elemento elástico a utilizar para el diseño del freno.

Siguiendo este orden de ideas, de la alternativa elegida se describe utilizar elementos elásticos que trabajen a torsión, dentro de estos se escogen los siguientes tres elementos: gomas elásticas, resorte espiral y resorte helicoidal a torsión. Los tres se situarán en la llanta trasera, además, se buscará en esta sección elegir aquel medio de almacenamiento de energía potencial elástica con el que se obtenga el sistema más compacto, de menor peso y volumen, por ello lo ideal es

que se ubique en la manzana de la rueda trasera, aprovechando el espacio entre sus radios.

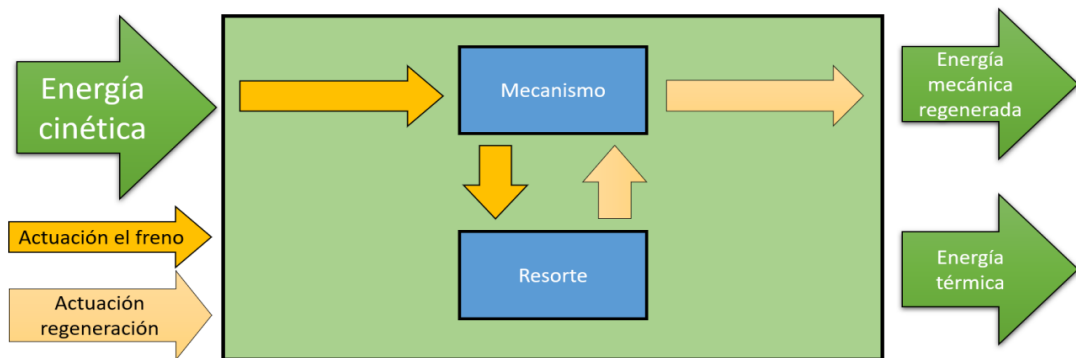
Figura 13. Elementos elásticos



Fuente: ECALIDAD. Manguera goma de látex. Murcia. Tienda Online. [Consultado: 20 de agosto de 2020]. Disponible en: <https://copenhagenseindex.eu>

El sistema se plantea de forma que funcione en dos tiempos, como se muestra en el esquema representado en la figura 14. El primer tiempo consiste en la actuación del freno, este activa el actuador del freno de forma que el elemento elástico se acopla mediante un mecanismo a la rueda para transformar la energía del movimiento en energía potencial elástica. En el segundo tiempo se desactiva el freno, que como resultado se desacopla el elemento elástico, y mediante otro mecanismo le regenera a la rueda la energía mecánica almacenada. En el proceso se perderá parte de la energía disponible a almacenar debido a la fricción entre los componentes y la que permita almacenar el sistema regenerativo según las condiciones de frenado.

Figura 14. Análisis funcional freno de elementos elásticos.



Fuente: Autores.

El elemento elástico por utilizar debe ser tal que su composición con el mecanismo actuador de frenado y regeneración sea sencilla, que utilice el menor volumen posible y peso. Por ello para elegir entre los tres elementos se describirán sus características mecánicas y generales:

Resorte helicoidal a torsión: normalmente son fabricados de alambre de acero templado, que ofrecen gran módulo de elasticidad y resistencia, necesita de un mandril para evitar el pandeo de este, el cual lo atraviesa, el torque se ejerce en sus extremos por lo que se necesitaría dos platos por los que acopla y se desacopla de la rueda para poder ser deformado, y a su vez entregar la energía almacenada. Su forma permite que encaje en la manzana y esa sirva de soporte del mandril.

Goma elástica: dentro de los materiales con el que se fabrican estos elementos, se encuentra el látex, el cual ofrece entre las gomas gran resistencia y elasticidad. Para que funcione de freno debería enrollarse sobre un eje, en este caso podría ser sobre un tambor de forma que ejercerá un torque contrario para que frene la rueda, el otro extremo iría pegado en el aro, aunque uno de los problemas de este tipo de elemento será el que sólo podrá trabajar a tensión mas no a compresión, por lo que necesitaría de un sistema de engranajes planetarios que invierta el giro. El látex tiene gran resistencia de entre los demás materiales con los que se fabrican las gomas elásticas, pero en comparación con el acero es baja, respecto al peso el

látex es menos pesado que el acero, por lo que tiene una ventaja respecto a este criterio.

Resorte espiral: al igual que los resortes helicoidales también suelen fabricarse de acero templado por lo que tendrán las mismas propiedades mecánicas. Necesitan de un árbol en el que se apoyan y una coraza, que dependiendo de su función útil podría diseñarse para que rotaran. En cuanto a su funcionamiento como freno, la manzana podría ser el árbol, la carcasa podría servir para que mediante un mecanismo se acople y desacople a la rueda durante la frenada y regeneración.

A continuación, se muestra un cuadro comparativo de los tres elementos:

Tabla 5. Cuadro comparativo elementos elásticos

	Resorte helicoidal a torsión	Goma elástica	Resorte espiral
Módulo de elasticidad [<i>Gpa</i>]	212	0,0025	212
Esfuerzo a flexión [<i>Mpa</i>]	1475(*)	32	1475(*)
Densidad [<i>g/cm³</i>]	7,85	0,93	7,85
Precio [<i>COP/Kg</i>]	11237,25	8045,87	11237,25
Complejidad mecanismo para funcionamiento	Mediana	Alta	Mediana

*Valores para el acero AISI 4340 templado.

Fuente: Autores.

Del cuadro comparativo se obtiene que los dos resortes: helicoidal y espiral tienen las mejores propiedades para el freno en cuando a su resistencia y elasticidad, como menor complejidad del mecanismo para su respectivo funcionamiento, por tanto se pasa a evaluar el volumen y factor de seguridad que presentan al diseñar el resorte para que almacene la mitad de la energía cinética disponible al frenar a la velocidad de 20 km/h, pendiente de 0° y condiciones de la bicicleta y usuario descritas en la sección de análisis energético. Para esta condición la energía a

almacenar es 1506,17 J, la energía que debe almacenar el elemento elástico es 753,09 J, se dan medidas aproximadas para los resortes teniendo como limitación el ancho de la manzana y la cavidad interior de los radios. El largo de la manzana es de máximo 7 cm y diámetro de 4 cm. La fricción máxima para que no derrape es aproximadamente 321,22 N y con distancia de frenado de 8 m. Se dimensiona de forma que el resorte cumpla con las condiciones anteriores y resista la deformación, los resultados obtenidos son:

Tabla 6. Características resortes a torsión

	Resorte helicoidal a torsión		Resorte espiral
Diámetro alambre	5 mm	Espesor del fleje	2,2 mm
Largo	4 cm	Ancho del fleje	6 cm
Número de espiras	8	Diámetro árbol	5 cm
Energía almacenada	926,7 J	Diámetro carcasa	20 cm
Fuerza de restitución	213,7 N	Número de revoluciones	10
Factor de seguridad	1000	Energía almacenada	823,4 J
Volumen	39,47 cm^3	Fuerza de restitución	205,9 N
		Factor de seguridad	1,04
		Volumen	517,91 cm^3

Fuente: Autores.

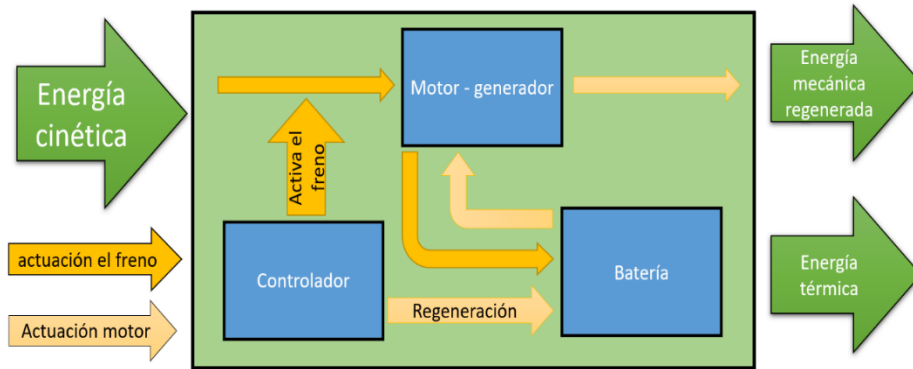
El resultado muestra que al usar el resorte helicoidal a torsión se obtiene menor volumen y peso, y mayor factor de seguridad para cumplir su función de almacenamiento de energía en comparación con el espiral, por lo que se realizará el diseño del freno regenerativo mecánico mediante este tipo de elemento elástico.

4.5.1.4. Consideraciones para el diseño de un freno regenerativo con resorte helicoidal a torsión. Debido a que el resorte helicoidal necesita de un mandril y dos soportes que sirven para realizar torque al resorte, se debe considerar usar un eje movable que rote encima de la manzana de la bicicleta, de esta forma el eje podrá acoplar y desacoplar un plato a la rueda haciendo que deforme el resorte. Para deformar un resorte helicoidal un extremo debe estar fijo mientras que el otro en movimiento rotacional, al deformarse el resorte tiende a recuperar su estado inicial de forma que el extremo fijo quiera rotar con el mismo sentido con el que fue rotado el otro extremo, de esta forma se podrá hacer un sistema para detener la rueda, y luego impulsarla hacia adelante. La utilización de dos trinquetes es necesario para detener el movimiento de cada extremo por lo que deberá usarse con el fin de hacer que estos extremos permitan la rotación hacia un solo sentido, con estas consideraciones se garantiza un sistema más compacto debido a estar situado en una región muerta de la rueda.

4.5.2. Freno con moto-generador. Este subsistema debe transformar energía cinética en energía eléctrica para que esta posteriormente pueda ser utilizada como energía mecánica que asistirá el pedaleo, debido a esto este subsistema consta de 3 elementos principales: un motor-generador, un controlador y una batería, además de las conexiones y el acople con la bicicleta, este subsistema tendrá dos momentos importantes cuando se actúe el freno y cuando se actúe el motor. Entre tanto, la activación del freno se hará de forma manual y la realizará el usuario, esta acción utilizará el motor como generador, frenando la bicicleta y suministrando un voltaje que permita cargar la batería.

Al igual que la activación del freno la activación del motor se realizará de forma manual, y permitirá el flujo de energía de la batería al motor, moviendo a este proporcionando así asistencia al pedaleo. También se debe tomar en cuenta que en cada proceso de transformación energética se pierde energía en forma de calor. Lo descrito anteriormente se resume en la siguiente ilustración.

Figura 15. Análisis funcional freno con motor-generator.



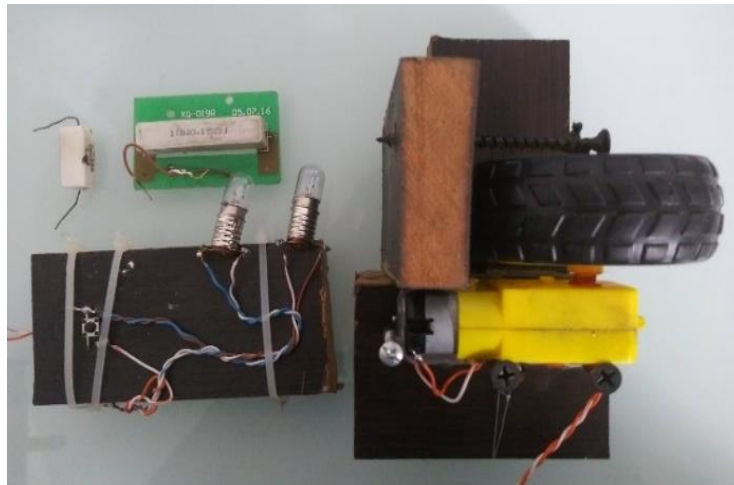
Fuente: Autores.

Un generador de corriente continua produce un torque en el sentido contrario al movimiento que se le está proporcionando, el comportamiento de este va ligado de parámetros como la velocidad, generalmente un motor de corriente continua estas dos variables tiene una tendencia de aumentar su valor a medida que la velocidad lo haga, sabiendo que el torque proporcionado por el generador es el que permitirá el frenado de la bicicleta se encuentra que este no tendrá la capacidad de detener completamente ya que a valores muy bajos de velocidad su torque será casi nulo por ende este sistema será diseñado para que al descender por una pendiente permita una disminución o sostenimiento en la velocidad para esto se buscará un motor que regenere la capacidad optima de energía y pueda dar asistencia al pedaleo. Cabe resaltar que el sistema debe adaptarse a la bicicleta afectando en lo menor su integridad además de tener un precio relativamente bajo.

A continuación, se muestran algunos modelos desarrollados con el fin de entender el funcionamiento de este tipo de freno.

4.5.2.1. Modelo de concepto 1. Este primer prototipo consta de un motorreductor de 6-12 V con una reducción de 1:48 el cual se acoplo a la rueda trasera de una bicicleta de rin de 20" pulgadas de diámetro, además de un circuito compuesto de un pulsador y la carga eléctrica que se compone de bombillos y resistencias, a continuación, se muestran los componentes utilizados en el montaje.

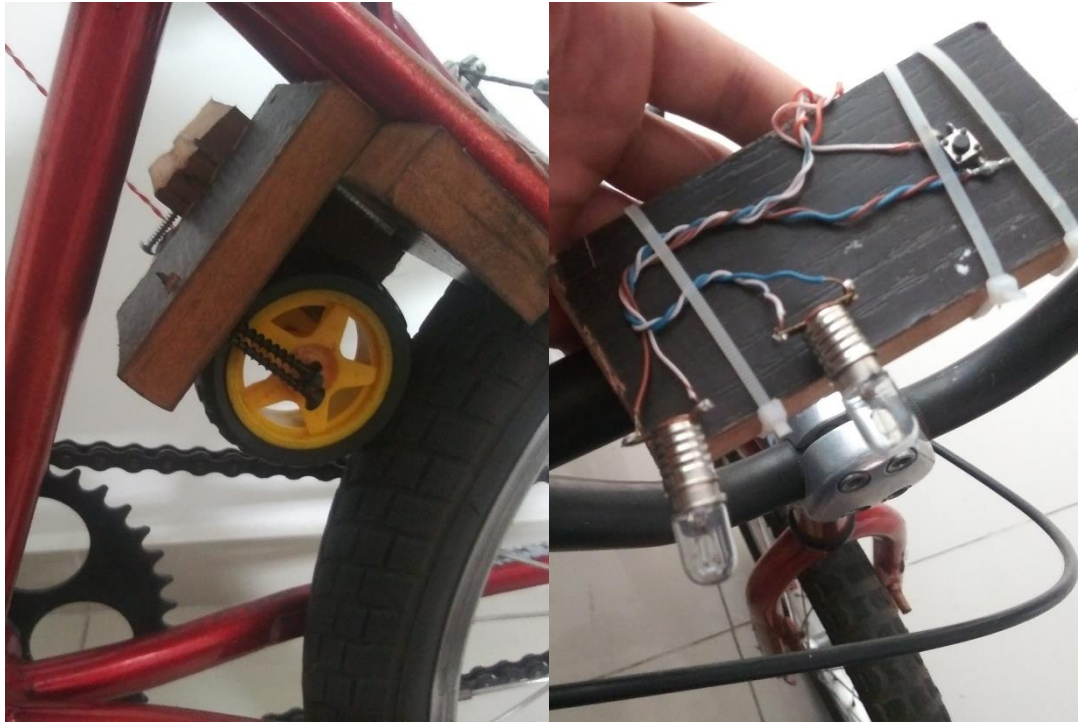
Figura 16. Componentes modelo.



Fuente: Autores.

Este modelo frena por medio de una carga eléctrica la cual selecciono teniendo en cuenta el máximo torque que soporta el motor eléctrico, esto se determinó de manera experimental, es decir se configuraron las resistencias y bombillas de forma que estas proporcionarán el mayor frenado sin permitir que los dientes del reductor se saltarán, finalmente se encontró que la carga eléctrica que mejor se adaptaba constaba de bombillas incandescente de 12 V a 0.22 A, las cuales se configuraron en paralelo, esta carga se activaba por medio de un pulsador que cerraba el circuito, el pulsador y las bombillas se ubicaron en el manubrio de la bicicleta, para activar el sistema de una manera más sencilla. La configuración de los componentes se muestra a continuación.

Figura 17. Modelo de concepto 1.



Fuente: Autores.

Con este modelo se pudo evidenciar que las llantas de una bicicleta tienen discontinuidades que dificultan la unión de la rueda del motor con la rueda de la bicicleta, esto debió a los radios de la bicicleta no son correctamente tensionados y que las discontinuidades del suelo generan deformación en estos. También se encontró que el torque que proporciona el motor al frenar aumenta a medida que la resistencia equivalente del circuito disminuye. Con este modelo también se evidencio que un reductor produce una resistencia al movimiento aun sin conectar la carga eléctrica.

4.5.2.2. Modelo de concepto 2. Este modelo pretende mostrar el comportamiento de algunas variables, como voltajes, corrientes y velocidades. Esto se pretende realizar colocando 2 motores en la llanta delantera de la bicicleta, un primer motor al cual llamaremos motor 1, funcionará de motor-generador, el cual actuará de freno o de motor cuando se requiera, el segundo motor (motor 2) entregará energía mecánica con el fin de que este represente la energía potencial que se transforma en mecánica al descender por una pendiente, este motor contará con una fuente de alimentación externa, a continuación, se muestra el arreglo de estos dos motores.

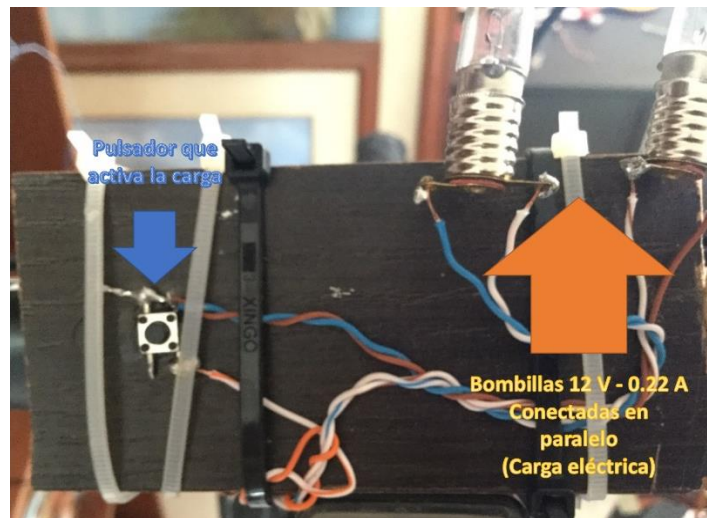
Figura 18. Arreglo de motores.



Fuente: Autores.

Para la sección del motor-generador se tomó como principal parámetro la diferencia de potencial generada a la salida del generador, posteriormente se acopló una carga eléctrica que se activaba con un pulsador y se evidenció que el motor que producía mayor voltaje proporcionó un mayor frenado.

Figura 19. Carga eléctrica



Fuente: Autores.

La carga eléctrica consta de 2 bombillas incandescentes de 12v a 0.22 A instaladas en paralelo, se utilizó esta configuración debido a que ya se disponía de esta además de observar que al colocar más de 2 bombillas en paralelo la energía que el motor 2 demandaba de la fuente externa superaba por mucho la permitida, esta fuente entrega 12 V con un máximo de corriente de 8 A, además de superar la máxima corriente que puede medir el multímetro (10 A).

Figura 20. Fuente alimentación motor 2.



Fuente: Autores.

Los elementos que se utilizaron que se utilizaron para medir las variables fueron:

Multímetro digital: Esta herramienta de medición se utilizará para encontrar los valores de voltaje y corriente.

Figura 21. Multímetro digital.



Fuente: Autores.

Velocímetro bicicleta: Este elemento permite medir la velocidad de la llanta de la bicicleta, contando el número de veces que pasa el imán en un determinado tiempo.

Figura 22. Velocímetro bicicleta.



Fuente: Autores.

Al disponerse de pocos instrumentos de medición se procedió a calcular la energía eléctrica entregada por el motor 2 y la regenerada por el motor-generator 1, ya que

se sólo se contaba con un multímetro para medir la corriente y el voltaje se realizaron dos pruebas una en la que este funcionaba como amperímetro y otra en la que funcionaba como voltímetro, en ambas se llevó la llanta a una velocidad cercana a los 30 Km/h, esperando a que es a velocidad tuviera un valor estable. Adicionalmente se tomaron los valores de corriente y voltaje en la fuente que alimenta el motor 2 cuando se estaba frenando y cuando sólo tenía por carga la inercia de la llanta de la bicicleta, es decir, cuando no se presionaba el pulsador que conectaba a las bombillas incandescentes.

Figura 23. Prueba modelo de concepto 1.



Fuente: Autores.

Los valores promedio obtenidos en esta prueba fueron:

Tabla 7. Valores promedio encontrados en la prueba de frenado.

	Voltaje (V)	Corriente eléctrica (A)	Velocidad llanta (Km/h)	Potencia eléctrica (W)
Motor-generador 1 Freno activado	14	0.68	29.1	9.52
Motor 2 freno activado	12	9.6	29.5	115.2
motor 2 freno desactivado	12	3.8	40.3	45.6

Fuente: Autores.

Como se puede apreciar el modelo tiene una baja eficiencia ya que este sólo logra recuperar el 8.26% de la energía, esto se debe a que hay pérdidas en la llanta y en cada uno de los motores, además, se evidencia que la potencia eléctrica que requiere el motor sólo para mover la llanta es de 45.6 watts, también se observó que la fuerza que debe aplicarse sobre el cabezal del motor para que este no se deslice sobre la llanta es relativamente alta y puede dañar los bujes del motor.

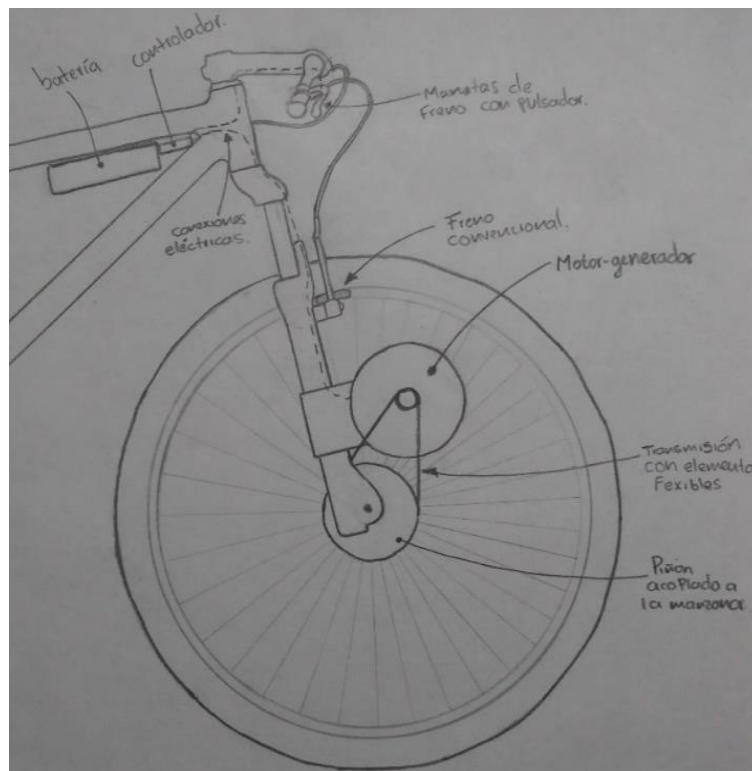
4.5.2.3. Concepto freno eléctrico. La ubicación de los elementos de este subsistema del motor-generador y la conexión de potencia entre el motor-generador y la rueda de la bicicleta deben tener una baja afectación a la integridad de la misma, con el fin de cumplir con esta demanda se estudió en un primer momento la posibilidad de ubicar el motor-generador de forma similar a un dinamo de botella el cual tiene su punto de contacto en el lado lateral de la llanta, pero debido a que el punto de contacto con la llanta limita mucho la capacidad de transición de potencia, algo que se pudo evidenciar en el modelo 2 que se construyó se optó por buscar otras alternativas tales como ubicar el motor dentro de la manzana, o conectar por medio de elementos flexibles a la manzana y el motor.

Los motores que se ubican dentro de la manzana tienen un costo elevado, además que no se venden piezas por separado, es decir se venden con el controlador y la

batería, por lo tanto, se decidió que la mejor opción era conectar la manzana de la llanta delantera con el motor por medio de un elemento flexible. El elemento flexible más utilizado en las bicicletas es la cadena, por lo que se utilizará este. El piñón de la manzana se acoplará a esta por medio de seis tornillos tal como lo hace un disco de freno, de esta forma no se afectará la integridad de la manzana ya que sólo deberá insertar un piñón en lugar de un disco.

Esta configuración permitirá el fácil acople de este sistema a la bicicleta, además de permitir una relación de piñones, el motor-generator se acoplará a la horquilla de la bicicleta, la batería y los elementos de control se ubicarán en el marco de la bicicleta, la para la activación del freno se utilizará una maneta que tenga un pulsador que cierre el circuito de frenado, a continuación, se muestra un esquema de lo anteriormente descrito.

Figura 24. Esquema del subsistema freno eléctrico.

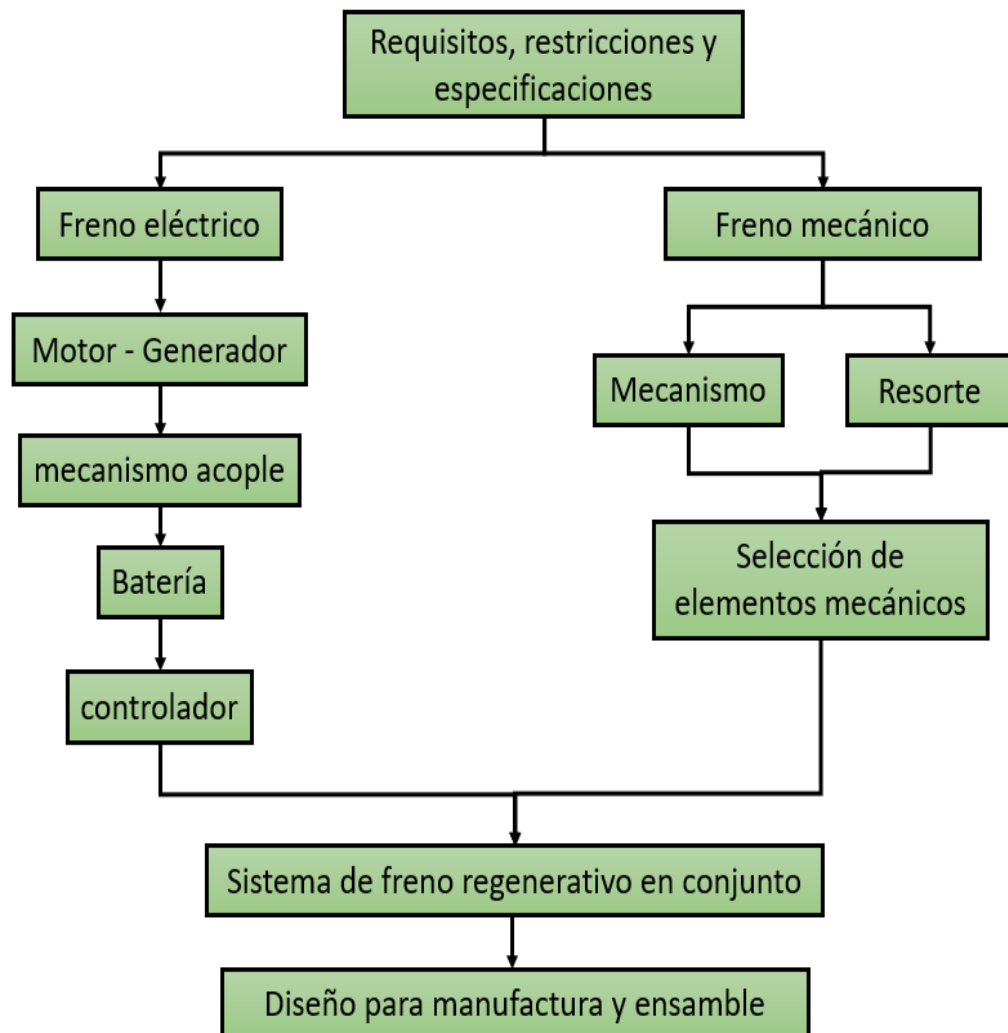


Fuente: Autores.

5. DISEÑO EN DETALLE

A partir de los requerimientos y especificaciones encontradas en la anterior sección se procederá a diseñar los subsistemas y sus componentes por etapas, de esta forma se determinará el sistema en su totalidad, el diagrama de flujo de a de los procesos a seguir se muestra a continuación.

Figura 25. Diagrama de flujo diseño en detalle.



Fuente: Autores.

5.1. FRENO MECÁNICO

En esta sección se realizará el diseño del mecanismo para el freno regenerativo con el resorte helicoidal a torsión, el diseño del resorte y diseño para manufactura y ensamble de los componentes que forman el conjunto del freno mecánico. Se efectuará el análisis de las máximas cargas que experimentará según las condiciones de frenado propuestas en los objetivos, se seleccionarán y especificarán los componentes a detalle que debe tener el mecanismo para que junto con el resorte soporte las condiciones críticas durante el frenado y la regeneración.

5.1.1. Diseño del resorte. El resorte a utilizar como freno es un resorte helicoidal a torsión se tiene en cuenta las dimensiones mínimas que este debe tener, entre ellas el diámetro del mandril debe ser no menor a 40 mm, el largo no debe pasar los 70-75 mm, por tanto y en el análisis energético se tendrá en cuenta para la energía que debe almacenar este. De las pruebas de frenado se relacionó la distancia de frenado con la velocidad lo que se tendrá en cuenta para diseñar el resorte, ya que el número de vueltas que dará el resorte depende de este dato porque el resorte dará las mismas revoluciones que da la rueda debido a que están acoplados los dos al frenar. En el dimensionamiento del resorte sólo se tendrá en cuenta las características del nivel energético con pendiente de 0°. Para que no derrape la máxima fuerza de fricción es 321,22 N. La fuerza contraria que ejerce en el piso el resorte debe ser menor o igual a esta.

Las longitudes de los extremos del resorte l_1 y l_2 , son cero, el diámetro del mandril será 42 mm, se revisa para el estado crítico del resorte que será a la velocidad de 30 km/h. Para el estado crítico se obtienen los siguientes resultados para la configuración del resorte con las siguientes características.

Tabla 8. Características del resorte

	Dimensiones del resorte	
	Sin deformar	Deformado
Diámetro interno[mm]	76,5	42,25
Nb [rev]	7	11,33
Largo [mm]	40	61,67
Diámetro del alambre [mm]	5	5
Energía almacenada [KJ]	0	1433
Fricción [N]	0	314,2
Factor de seguridad	-	216,9

Fuente: Autores.

Ahora se realiza un cuadro comparativo para mostrar la energía almacenada para este tipo mide resorte a las velocidades, siendo comparada con el 50% de la energía disponible.

Tabla 9. Energía almacena por el resorte.

Velocidad [km/h]	Distancia de frenado [m]	Energía disponible [J]	Energía almacenada [J]	Diferencia energías [J]
10	4,44	188,27	339,6	151,33
15	5,61	423,61	542,1	118,49
20	6,78	753,09	791,8	38,71
25	7,95	1176,70	1088,7	-88,00
30	9,12	1694,45	1432,7	-261,75

Fuente: Autores.

Como se observa, las dimensiones del resorte dadas, además de tener un factor de seguridad alto de 216,9, además la fuerza que ejerce el resorte es menor que la fuerza de fricción del suelo con la llanta. La energía que almacena para cada nivel energético teniendo en cuenta la distancia de frenado, es mayor que el 50% de la energía disponible de frenado. Cumple los requisitos de espacio para cuando se deforma como para cuando está libre por lo que las dimensiones del resorte a utilizar y su constante elástica son:

Tabla 10. Dimensiones del resorte

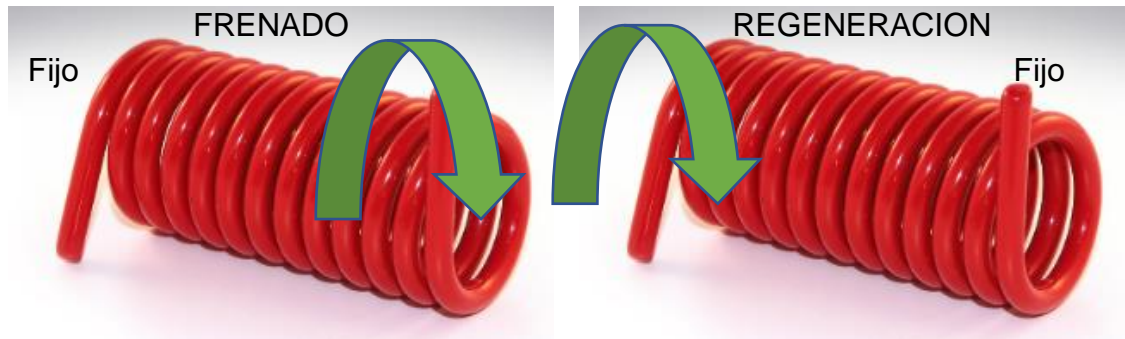
Característica	Valor
Diámetro medio [mm]	76,5
Número de espiras [rev]	7
Diámetro del alambre [mm]	5
Material	AISI 4340 Templado
Constante elástica [Nm/rad]	3,866

Fuente: Autores.

5.1.2. Diseño del mecanismo. Entre las especificaciones para el freno, este debe funcionar durante dos tiempos, el mecanismo debe contener un resorte helicoidal a torsión que servirá para almacenar parte de la energía de frenado.

El elemento de frenado al ser un resorte helicoidal se propone aprovechar el movimiento de los extremos del resorte para ejercer torque. Para poder deformar el resorte es necesario que un extremo vaya fijo mientras el otro este girando. Si el extremo movable inicialmente, gira en una dirección y este luego se fija mientras el otro extremo se suelta, este último girará en el mismo sentido con el que se giró el que ahora permanece fijo, este principio se puede usar para frenar debido al torque contrario que ejerce el resorte inicialmente y de esta forma se podrá almacenar energía debido a la deformación. Para entregar la energía el resorte se moverá hacia la dirección con la que se deforme este, de esta forma se logra que la rueda se frene y luego el resorte la gire hacia la misma dirección con la que empezó a frenarse la rueda.

Figura 26. Dirección torque del resorte.



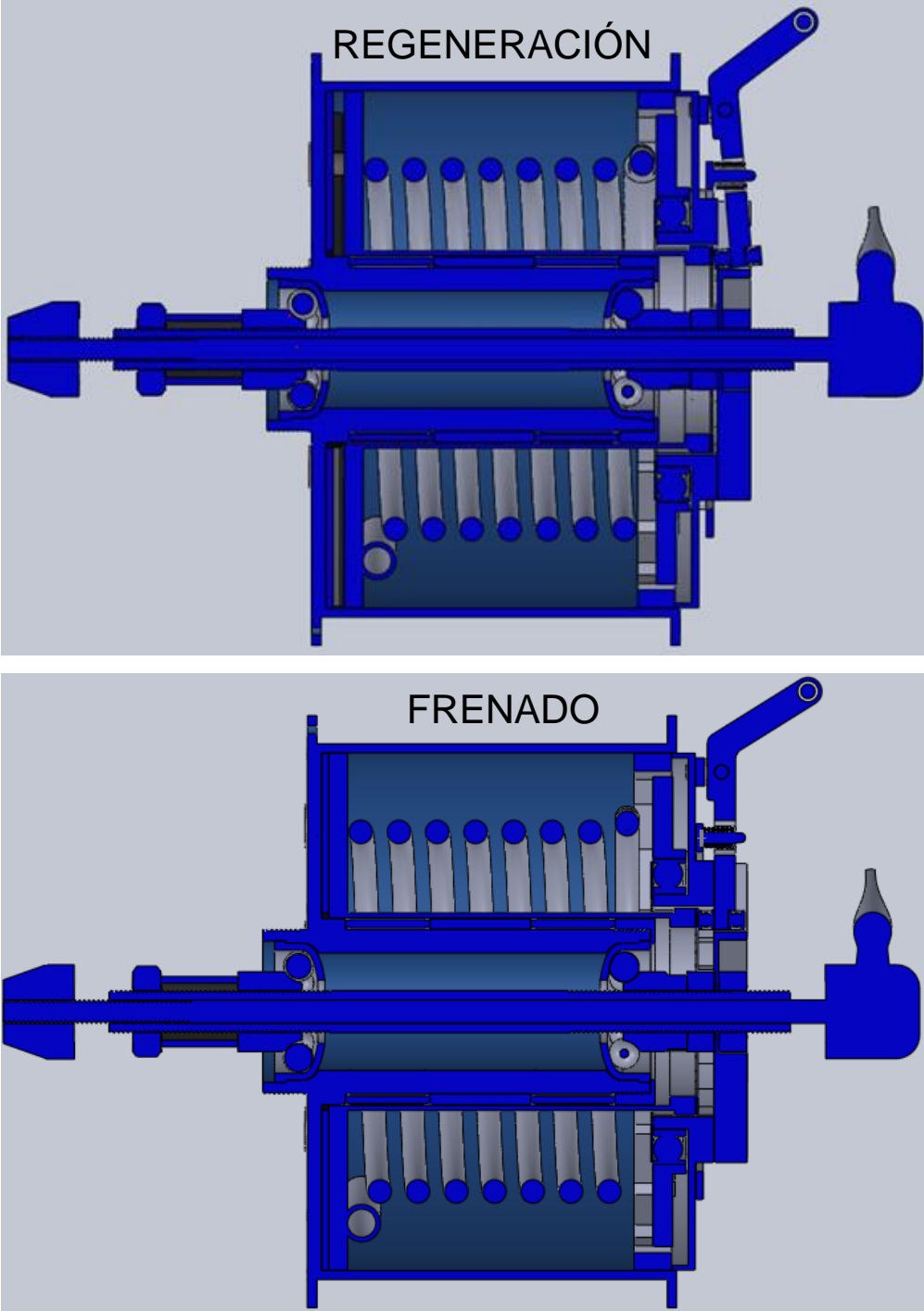
Fuente: MUELLAS Y RESORTES BOSCH SL. Muelles de torsión [sitio web]. Barcelona.

[Consultado: 17 julio de 2020]. Disponible en: <https://www.muellbosch.com/es/muelles-de-torsion>

Para el funcionamiento del resorte, se necesitará un mandril y dos platos que se conectarán de forma fija a los dos extremos del resorte helicoidal, un plato permanece fijo mientras el otro movable, el plato movable ira conectado al mandril del resorte, en la manzana debe ir un plato de forma que los dos platos se acoplen, al deformarse el resorte el resorte este tendera a recuperar su posición inicial por lo que será necesario usar un trinquete para el mandril que permitirá cuando se termine de frenar no se devuelva y retroceda la bicicleta. El plato fijo inicialmente debe tener un trinquete que permita acoplarse solo en el proceso de la regeneración a la rueda, en este momento el plato se desbloquea para mientras el otro plato se desacopla y bloquea debido al trinquete del mandril.

Con los elementos anteriores se obtiene el mecanismo que se presenta en la figura 27 donde se muestra en la vista de sección los componentes internos del freno, la relación y disposición entre estos, y sus partes de forma detallada se encuentran en el anexo H, plano 1.2.B.

Figura 27. Mecanismo del freno mecánico



Fuente: Autores.

El funcionamiento del freno mecánico regenerativo se lleva a cabo en dos tiempos, se describen a continuación:

1. Actuación del freno: se actúa la palanca del freno situada en el manillar, esta mueve a través de una guaya una palanca que acerca un rodamiento y mueve el mandril que se encuentra montado encima de la manzana, de esta forma el mandril que tiene un plato donde está sujeto un extremo del resorte se acoplará a la rueda, la cual está girando en el sentido que hace que la bicicleta vaya hacia adelante. El otro extremo del resorte va fijo en a otro plato el cual está bloqueado por otro plato, de esta forma el resorte se deformará hasta que se frene la bicicleta.
2. Regeneración del freno: el usuario al soltar la palanca se desactivará el acople del mandril, este al desacoplarse el resorte volverá su forma original, pero un trinquete en el mandril evitará esto. El otro plato tiene un trinquete que al soltarse debido a la deformación del resorte querrá ir hacia adelante por lo que este tiene un trinquete de forma que se acopla con la rueda y permitirá que la mueva hacia adelante y realizará el proceso de regeneración y entrega de la energía almacenada en el resorte. Al finalizar el proceso de regeneración el sistema volverá a su posición inicial.

Para el dimensionado de los elementos que conforman el mecanismo fue necesario realizar análisis de esfuerzos que presentan estos para el estado crítico de funcionamiento. El freno regenerativo tiene dos condiciones de trabajo, su condición crítica se dará cuando el resorte almacene la mayor energía posible, esto sucede para cuando tiene que almacenar energía para velocidad inicial de 30km/h, en esta condición el resorte obtiene la máxima deformación de trabajo por tanto la tensión del sistema de frenado será crítica en este estado por lo que se dimensionarán los elementos para que soporten este estado. El momento torsor aplicado por el resorte

para este estado es de 105,3 Nm, teniendo en cuenta la distancia de frenado normal.

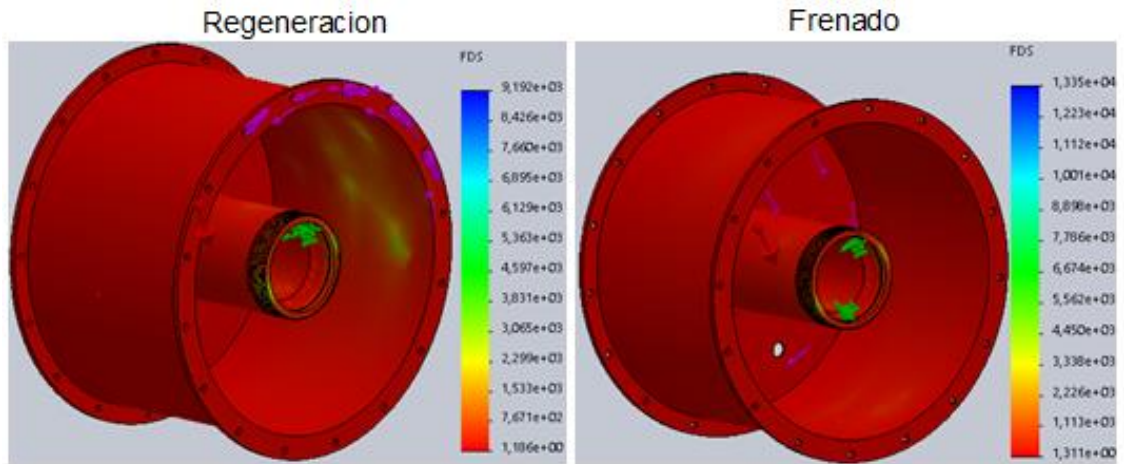
$$M_{critico} = 105,3 Nm$$

Además de que los elementos soporten el momento crítico del resorte también los elementos soportarán el peso del usuario, se hará mediante el software SolidWorks el análisis de carga por el método de elementos finitos, se simulará para que soporte la carga crítica del resorte y el peso del usuario en la llanta trasera por lo que entregara un factor de seguridad mayor. Para el análisis se tomará como referencia el material acero AISI 1020, se escogió este acero por sus propiedades de fácil maquinado y buena soldabilidad.

5.1.2.1. Manzana. Con el fin de utilizar componentes que se encuentren en el mercado de bicicletas, se decidió diseñar la manzana de forma que tenga las mismas dimensiones en donde se instala el eje de la rueda a esta, de forma que el eje en el que se soporta, los balines, conos esparcidos, copas entre otros componentes concertados a este eje son los mismos que tiene una bicicleta convencional. Sobre la manzana se pone el mandril por lo que en el espacio entre estos se deja un espacio para colocar dos rodamientos de agujas. Por lo que el diámetro para este será de 38 mm.

La manzana tiene un tambor el cual se fija un trinquete y donde tiene un acople para embragar con el mandril, esto permitirá el frenado y la regeneración. El lado derecho se deja libre, y ello causará mayor concentración de esfuerzos en el lado izquierdo, para observar el estado de cargas que presenta la manzana con su tambor, se concentra 100 kg en el lado derecho en el lugar de ubicación de los radios, esto para verificar si soporta esta carga durante el frenado y la regeneración, también se aplica el torque máximo para frenado. La figura 28 muestra que la manzana soporta el estado de esfuerzos en sus dos tiempos de trabajo crítico ya que se obtuvo un factor de seguridad mayor de 1,18.

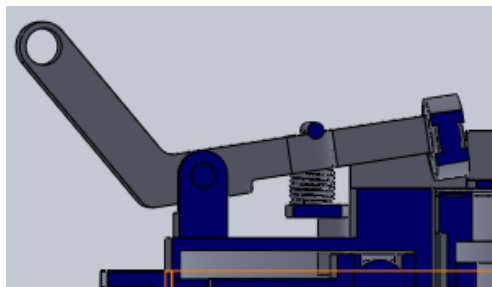
Figura 28. Distribución esfuerzos de la manzana



Fuente: Autores.

5.1.2.2. Carga de accionamiento. El resorte helicoidal al ser deformado aumenta su longitud y disminuye su diámetro, además, el poco espacio que existe debido al largo del eje de la rueda hace que este inicialmente este deformado en longitud ello hace que exista una carga inicial al activar el freno. En la figura 29 se muestra una palanca en donde la guaya que se actúa con la palanca que se encuentra en el manillar, se articula mediante un tornillo en el círculo libre que se muestra. Al activar el freno la guaya se recoge y esta palanca gira de forma que mueve el mandril para que embrague con la rueda, a su vez se mueve a través de un resorte, un plato con pines que retienen el plato derecho, La fuerza para accionar el freno debe ser moderada, de forma que el usuario no haga tanto esfuerzo.

Figura 29. Palanca del freno



Fuente: Autores.

En el embrague se asignó una distancia de 1 mm entre el plato del mandril y la rueda, además para que embraguen se propuso una distancia entre los dientes de 2 mm, de forma que la palanca debe mover 3 mm de forma axial al mandril. Se calcula la fuerza axial máxima que hace el resorte helicoidal, esto ocurre para cuando el resorte apenas empieza a formarse debido a que su deformación axial. La constante elástica para resorte a tensión está dada por:

$$k = \frac{d^4 G}{8D^3 N_a}, \quad (26)$$

$$N_a = N_b + \frac{G}{E}, \quad (27)$$

Donde d es el diámetro del alambre, D el diámetro medio, N_a el número de espiras activas, N_b el número de espiras y G el módulo de corte del material.

Sabiendo las características del resorte se reemplaza el módulo de corte para el acero SAE 4340 templado es 81,5 Gpa.

$$N_a = 7 + \frac{81.5}{212} = 7.3844 \text{ espiras}$$

$$k = \frac{(0.005)^4 (81.5 * 10^9)}{8(0.0765)^3 (7.3844)} = 1925.95 \frac{N}{m}$$

Se usa la ley de Hooke al conocer que la deformación axial máxima del resorte será de 25 mm, la fuerza axial F_1 que ejercerá el resorte es:

$$F_1 = ky$$

$$F_1 = (1925.95 \text{ N/m})(0.025m) = 48.15 \text{ N}$$

Respecto al embrague no se revisa si es necesario ejercer mayor fuerza que la del resorte debido a que encaja el plato del mandril a la rueda y la disposición entre las superficies del embrague son tal que es sólo necesario ejercer una fuerza mínima para su encaje.

En el bloqueo del plato derecho va un resorte que empuja el retenedor de este, en caso de accionar la palanca con la guaya y al principio no encaje entonces se

moverá la palanca moverá un rodamiento pequeño que permite empujar el mandril mientras este va rotando, al acoplarse el mandril a la rueda hará que rote el resorte y este moverá el plato derecho que permitirá que el retenedor bloquee el plato, el retenedor se moverá debido a la carga almacenada de su resorte. Se calcula la geometría del resorte para saber la fuerza que se le debe ejercer para deformarlo mientras encaja el retenedor en el plato derecho. El resorte se diseña para que encaje sobre un mandril de 2.5 mm de diámetro y largo de 7,5 mm, la deformación máxima que puede representar será de 2.2 mm. El material para el resorte será acero estirado duro A227¹³ y sus extremos planos para que encajen en la cavidad de la palanca, se realiza el mismo procedimiento anterior.

$$N_a = 7 + \frac{80.7}{198.6} = 7.4 \text{ espiras}$$

$$k = \frac{(0.0007)^4(80.7 * 10^9)}{8(0.0035)^3(7.4)} = 7633.78 \frac{N}{m}$$

$$F_2 = (7633.78 \text{ N/m})(0.0025\text{m}) = 19.08 \text{ N}$$

Tabla 11. Características resorte del retenedor:

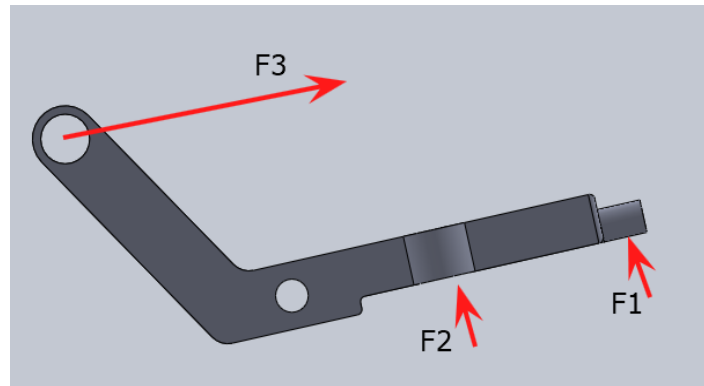
Constante elástica [N/m]	7633.78
Material	Acero estirado duro A227
Espiras	7
Diámetro alambre [mm]	0.7
Diámetro medio [mm]	3.5
Largo [mm]	7.5

Fuente: Autores.

¹³ BUDYNAS, Richard y NISBETT, Keith. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. 8 ed. México: McGraw-Hill Interamericana. 2008, p. 508. ISBN: 9789701064047.

Como se observa el resultado de la fuerza es baja, ahora se calcula la fuerza que ejercerá la guaya realizado-sumatoria de momentos en A donde F3 será la fuerza que debe ejercer la guaya como se muestra en la figura 30.

Figura 30. Fuerzas para frenado en la palanca



Fuente: Autores.

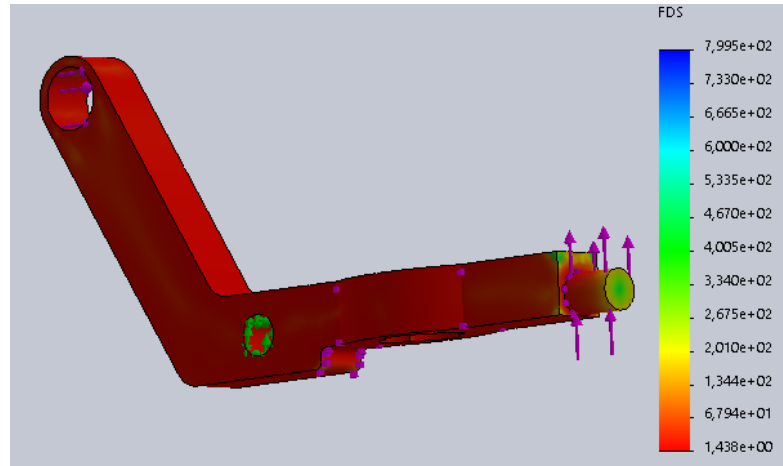
De sumatorias de momentos con respecto al punto A.

$$\sum M_A = 0; \quad F_3 = \frac{14.08 * 19.08 + 31 * 48.15}{18.35} = 95.98 \text{ N}$$

El resultado anterior muestra que el usuario podrá frenar de forma que tendrá que aplicar una fuerza menos de 100 N, esta fuerza se considera baja y que puede levantar un adulto sin gran esfuerzo.

Se realiza análisis de esfuerzos, obteniendo el factor de seguridad como se muestra en la figura 31, donde se observa que el factor máximo es 1,43 por Von Mises, por tanto, la palanca soporta las cargas al actuar el freno.

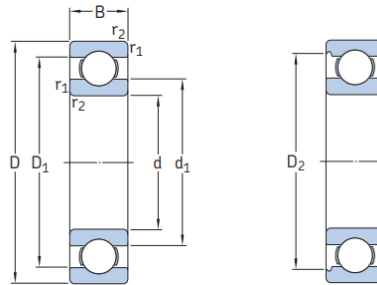
Figura 31. Factor de seguridad palanca de freno



Fuente: Autores.

5.1.2.3. Selección rodamiento de empuje. Este rodamiento sirve para empujar el mandril y se monta sobre el actuador, revisando los rodamientos que ofrece SKF debe tener un diámetro interno de entre 3 a 4 mm con ancho de 3 a 6 mm, el diámetro externo debe ser lo menor posible debido a su ubicación y el espacio entre los elementos.

Figura 32. Rodamiento de empuje SKF



Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades nominales		Masa	Designación
d	D	B	dinámica C	estática C ₀	P _u	Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	r. p. m.		kg	-
3	10	4	0,54	0,18	0,007	130 000	80 000	0,0015	623

Fuente: Catalogo rodamientos SKF¹⁴

El rodamiento que cumple con las consideraciones anteriores es el que se muestra en la figura 32.

5.1.2.4. Selección rodamiento del plato derecho. El plato derecho contiene un trinquete y debe ir encima de la tapa, por lo que el espacio es reducido, además, al ir encima de la tapa también debe ubicarse sobre el mandril por lo que su diámetro interno debe ser mayor de 45 mm al menos y su ancho lo menos posible pero que sea mayor de 4 mm, que es lo que tiene el trinquete de espesor. El diámetro externo debe ser mínimo para que el retenedor quede lo más abajo posible debido a la palanca, el rodamiento seleccionado del catálogo SKF tiene las siguientes características:

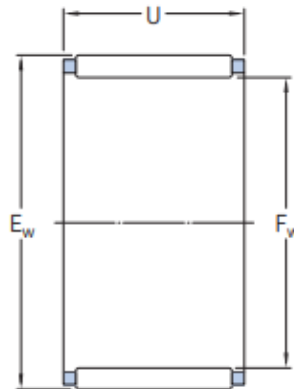
Figura 33. Rodamiento del plato derecho

Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades nominales		Masa	Designación
d	D	B	C	C ₀	P _u	Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	r. p. m.		kg	-
45	58	7	6,63	6,1	0,26	22 000	14 000	0,04	61809
	68	12	14	10,8	0,465	20 000	13 000	0,14	61909
	75	10	16,5	10,8	0,52	20 000	12 000	0,17	* 16009
	75	16	22,1	14,6	0,64	20 000	12 000	0,24	* 6009
	85	19	35,1	21,6	0,915	17 000	11 000	0,42	* 6209
	100	25	55,3	31,5	1,34	15 000	9 500	0,84	* 6309
50	120	29	76,1	45	1,9	13 000	8 500	1,55	6409
	65	7	6,76	6,8	0,285	20 000	13 000	0,052	61810
	72	12	14,6	11,8	0,5	19 000	12 000	0,14	61910
	80	10	16,8	11,4	0,56	18 000	11 000	0,18	* 16010
	80	16	22,9	16	0,71	18 000	11 000	0,26	* 6010

Fuente: Catalogo rodamientos SKF¹⁴

5.1.2.5. Selección rodamiento de aguja. La sección que se encuentra en la mitad de la sección del eje con el que rota la rueda se encaja mejor un rodamiento de aguja debido a su ancho, además porque un tambor encima de este rotaría junto al resorte, de esta forma el tambor gira libremente del eje con el que la llanta rueda, en esta situación el eje y el agujero del soporte pueden servir como caminos de rodadura para la corona de agujas, con esto el espacio radial se hace mínimo, además, permite estabilidad y fácil instalación.

Figura 34. Corona de agujas



Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga P_u	Velocidades nominales		Masa	Designación	Sello adecuado ¹⁾ Designación
F_w	E_w	U	dinámica C	estática C_0		Velocidad de referencia	Velocidad límite			
mm	mm	mm	kN	kN	kN	r. p. m.	r. p. m.	g	-	-
35	40	13	15,4	28	3,25	12 000	13 000	19	K 35x40x13	—
	40	17	19,8	39	4,65	12 000	13 000	21	K 35x40x17	—
	40	25	28,1	60	7,35	12 000	13 000	31	K 35x40x25	—
	40	27	23,8	49	6	12 000	13 000	39	K 35x40x27 TN	—
	42	16	23,3	37,5	4,5	11 000	13 000	34	K 35x42x16	G/SD 35x42x4
	42	18	26,4	44	5,3	11 000	13 000	34	K 35x42x18	G/SD 35x42x4

Fuente: Catalogo SKF

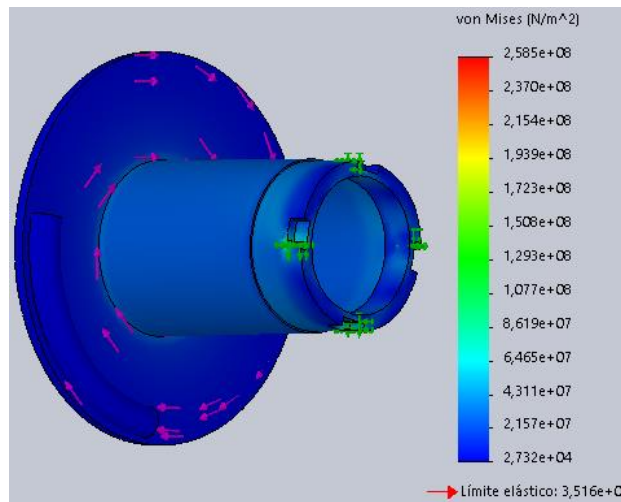
El rodamiento de agujas debe ser de diámetro 35 mm y ancho de entre 50 mm hasta 65 mm, se usa el catálogo de SKF¹⁴, se escoge el que aparece en la figura 34. Debido a que se necesita tener estabilidad en el centro del agujero se decide poner dos rodamientos con el fin de ocupar el espacio entre la manzana y el mandril del resorte.

Debido a la condición de trabajo de los rodamientos en el freno con elemento elástico no supera la velocidad límite y de fatiga, los rodamientos servirán para su funcionamiento en el freno mecánico regenerativo.

5.1.2.6. Mandril. Este componente contiene un trinquete, un plato embrague y un sostén. El mandril servirá además de eje para el resorte e impedir su pandeo. El sostén permite que un extremo del resorte se deforme al girar el plato del mandril, mientras que el trinquete impedirá que el mandril gire cuando se frena la bicicleta, es decir, que el mandril sólo rotará en el sentido de giro para que la bicicleta se desplace hacia adelante.

Figura 35. Distribución esfuerzos del mandril

¹⁴ Rodamientos SKF [en Línea]. Grupo SKF [Recuperado el 4 de junio 2020]. Disponible en: https://www.skf.com/binaries/pub201/Images/0901d19680416953-10000_2-ES---Rolling-bearings_tcm_201-121486.pdf

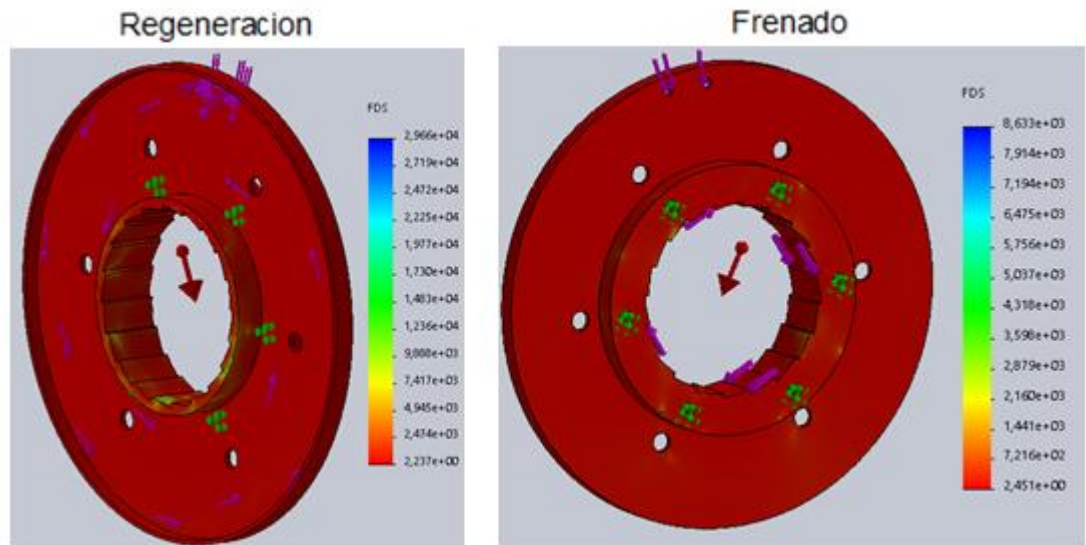


Fuente: Autores.

Se realiza análisis de esfuerzos mediante SolidWorks obteniendo el resultado de la figura 35. Como se observa el mandril resiste su estado crítico de funcionamiento, la concentración de esfuerzos se encuentra en la ubicación de los cuatro trinquetes, por esta razón se decidió poner esta cantidad de trinquetes para distribuir las cargas a experimentar.

5.1.2.7. Tapa. En esta pieza se monta el rodamiento del plato derecho, se mecaniza los dientes para los trinquetes del mandril, se instala el soporte para la palanca y sobre este se mueve axialmente el retenedor, además, funciona de tapa debido al ajustarse al tambor de la manzana con el fin de impedir el ingreso de partículas dentro de la manzana. Mediante un plato fijador que se soporta sobre el eje de la bicicleta ajusta la tapa para que se acerque al tambor dejando una leve distancia de 0.5 mm y permita libre movimiento del tambor respecto a esta. El plato fijador se une a la tapa con seis tornillos.

Figura 36. Análisis de carga de la tapa

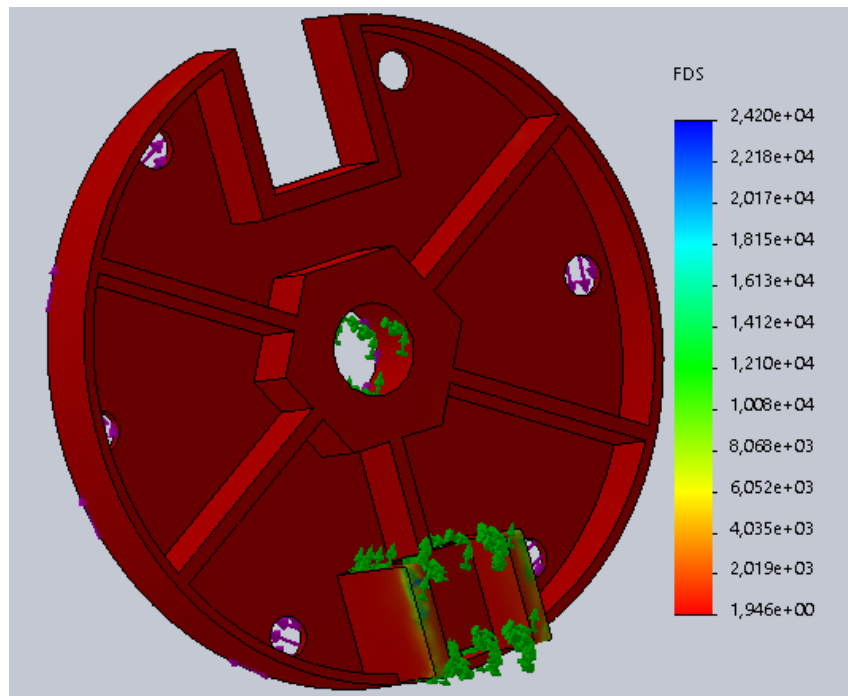


Fuente: Autores.

Entre las cargas críticas presentada en la tapa se encuentra el torque del resorte de torsión y las fuerzas de la palanca transmitidas a este a través de su soporte. Teniendo las fuerzas que ejercen estos elementos sobre la pieza se desarrolla mediante el análisis de esfuerzos obteniendo el resultado de la figura 36 para la regeneración y el frenado.

5.1.2.8. Plato Fijador. En este plato se fija la tapa encargándose de ajustar la tapa al tambor. Consiste en una placa circular la cual tiene 6 huecos con los que mediante tornillos se une a la tapa. A la placa se le suelda una tuerca para que la tapa se enrosque en el eje de la rueda, la tabla tiene un esqueleto conformado por 5 platinas soldadas a la tuerca y a un tubo. Dos platinas salen del plato para encajar en un tubo que hace parte a la armadura de bicicleta, de esta forma evitar que el plato con la tapa gire y así sus demás componentes. Debido a tener que actuar el rodamiento de empuje con el mandril se debe dejar un espacio para que este entre y pase por el plato.

Figura 37. Análisis carga del plato fijador

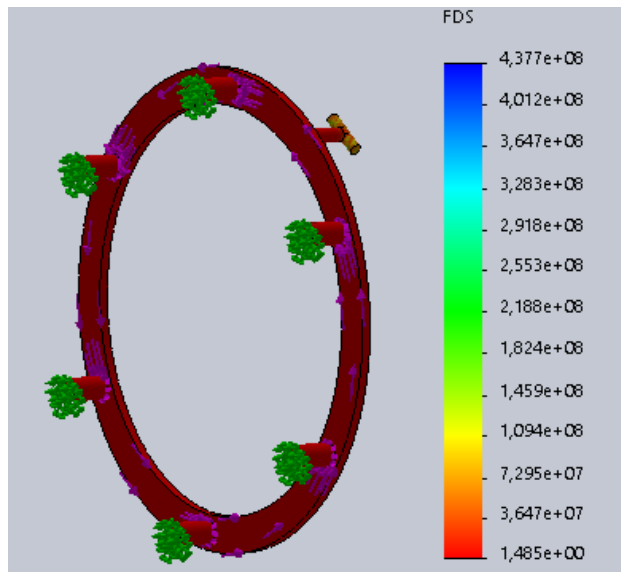


Fuente: Autores.

Se evalúa el estado de cargas del plato fijador mediante SolidWorks analizando los estados críticos en el frenado y la regeneración. Los resultados se muestran en la figura 37. Se observa que el plato fijador soporta las cargas críticas para los dos tiempos. El factor de seguridad crítico es de 1.95, por lo que es un factor de seguridad cercano a 1 pero es aceptable para su función.

5.1.2.9. Retenedor de plato. Esta pieza bloquea el plato derecho durante el frenado y lo desbloquea en la regeneración. Está conformado por seis pines que van soldados a un plato circular, por el otro lado del plato, se encuentra otro pin soldado que servirá de mandril para el resorte del retenedor, en su punta libre se suelda un pin de forma que sus ejes queda de forma perpendicular, este último pin es para que a través de la palanca pueda salir el retenedor del plato derecho.

Figura 38. Análisis carga del retenedor

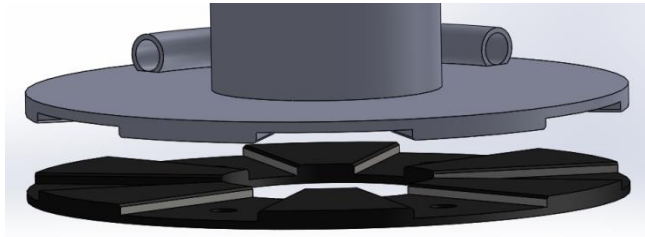


Fuente: Autores.

En la figura 38 se muestra el estado de esfuerzo de la estructura para su estado crítico el cual sucede durante el frenado. Como se observa la estructura resiste las cargas, en ella los esfuerzos máximos se encuentran en los pines que entran y acoplan con el plato derecho del resorte. Debido a los grandes esfuerzos que experimentaran los pines será necesario que sea fabricada con un acero más resistente como el AISI 4340 normalizado.

5.1.2.10. Acople mandril – manzana. Este elemento permitirá la conexión de la potencia del resorte a llanta de la bicicleta, este se diseñó para que transmita el momento máximo del resorte, el valor de este es 105,3 Nm. En un principio se estudió la posibilidad de utilizar un embrague a fricción, pero debido al alto torque y la poca superficie de contacto con la que dispone, se optó por un acople como el que se muestra a continuación.

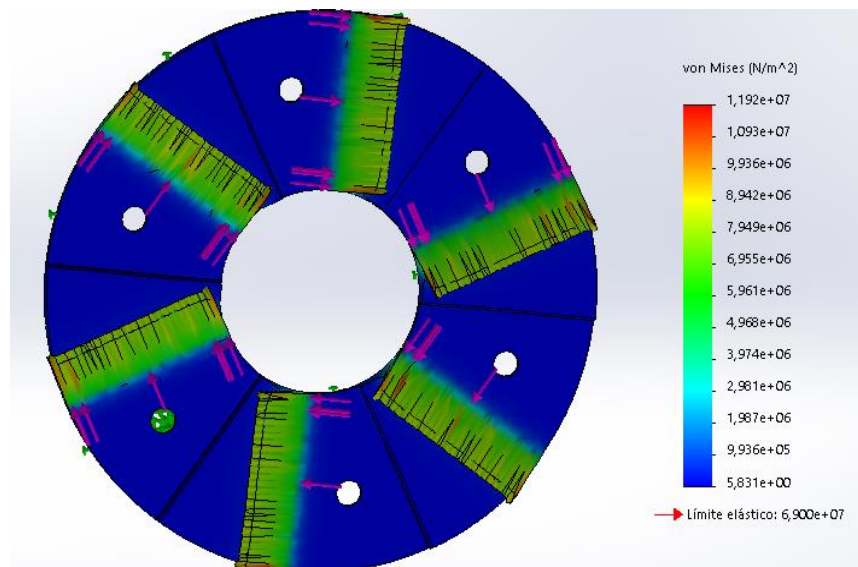
Figura 39. Acople mandril - manzana



Fuente: Autores.

Este acople tendrá dos partes en materiales diferentes esto con el fin de tener un materia más blando que disminuya el desgaste en la cara perteneciente al mandril y para protección del sistema ante sobrecargas, por lo se propuso utilizar el bronce por sus propiedades y su bajo costo, para dimensionar correctamente este elemento se realizó un análisis de cargas por medio del método de elemento finitos, aplicando una carga a cada uno de los elementos que sobresalen, El valor de la carga aplicada se tomó como la aplicada al radio medio de este elemento es 35 mm. Por lo tanto, la carga radial en el radio medio es de 3.008,57 N, el análisis por elementos finitos se muestra a continuación.

Figura 40. Análisis elementos finitos acople mandril manzana



Fuente: Autores.

Como se aprecia en la anterior figura elemento resiste la carga que se proporcionó, también presenta un factor de seguridad de 5.78 por lo que se este elemento se encuentra apto para la función a desempeñar.

5.1.2.11. Palanca de actuación. Este elemento es el permite al usuario activar el sistema de frenado regenerativo, para esto se utilizará una palanca de bloqueo remota la cual generalmente se usa en las bicicletas para activar el bloqueo de la suspensión, un elemento de este tipo se muestra a continuación.

Figura 41. Palanca de bloqueo remoto



Fuente: AMAZON. 1 palanca de bloqueo remoto para bicicleta con cable interior de aleación de aluminio, horquilla de resorte para bicicleta de montaña [en línea]. [Consultado: 11 de agosto de 2020]. Disponible en: t.ly/1H0Y

Este elemento se acciona de la siguiente forma: Primero se presiona la palanca principal generando desplazamiento de la guala hasta que se llega a un bloqueo, la acción de bloqueo activará un pulsador, el que en la imagen se aprecia de color

azul. Para desactivar este bloqueo se presiona el pulsador y esto permite que la guaya y la palanca retorne a su posición inicial. En el sistema de frenado el usuario deberá activar la palanca cuando desee frenar, y una vez quiera regenerar la energía deberá presionar el pulsador.

5.2. FRENO ELÉCTRICO

En esta sección se seleccionan los elementos que compondrán el subsistema de freno eléctrico comenzando por seleccionar el motor y su mecanismo de acople, en segundo lugar, se seleccionará la batería y por último se diseñará el circuito y el controlador de este subsistema.

5.2.1. Selección motor-generador. Para la correcta selección de este elemento primeramente se determina la potencia que disipa un freno al descender por una pendiente, teniendo en cuenta las fuerzas que intervienen en dicho proceso tal como se muestra en la figura 12, pero a diferencia de este diagrama tomará en cuenta la fuerza resistiva del aire la cual se define a continuación.

La fuerza del aire se opone al movimiento por lo tanto se dirección en sentido contrario a este, la ecuación de esta fuerza se muestra a continuación.

$$F_a = \frac{1}{2} * C_d * \rho * A * V^3, \quad (28)$$

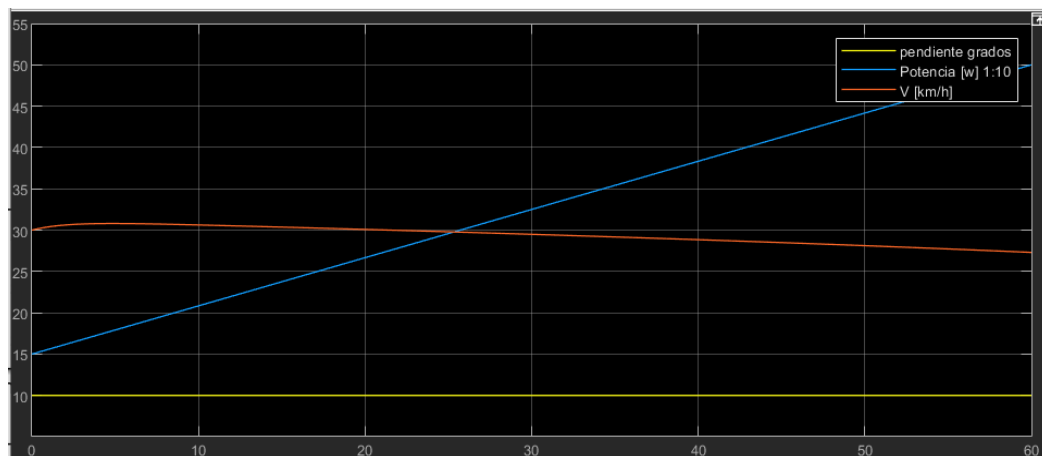
Donde: C_d es una constante que generalmente tiene un valor de 0.9, ρ es la densidad del aire en $[Kg/m^3]$, A es el área que se encuentra perpendicular al movimiento de la bicicleta; el valor de esta área se encuentra alrededor de los 0.45 $[m^2]$ para un ciclista en que se encuentre en una posición habitual y V la velocidad

en [m/s].¹⁵ Como Bucaramanga se encuentra ubicada a una altura de 959 metros sobre el nivel del mar por lo tanto la densidad del aire es aproximadamente 1.112 [Kg/m³]. Tomando en cuenta las fuerzas aplicadas se tiene la siguiente ecuación.

$$\sum F_x = m * g * \text{sen}(\beta) + \frac{1}{2} * Cd * \rho * A * V^3 + F_f, \quad (29)$$

A partir de la ecuación anterior se procedió a realizar un modelo en SIMULINK para estudiar la potencia que genera la fuerza de frenado a este modelo se le aplicaron distintos valores de esta con el fin de estudiar la respuesta de las demás variables. El diagrama de bloques de SIMULINK se muestra como anexo B. La respuesta se muestra a continuación.

Grafica 2. Comportamiento de la velocidad variando la potencia de frenado.



Fuente: Autores.

Este modelo se configuraron una pendiente descendente de 10 grados y una potencia de frenado que vario de 150 a 500 W, se encontró que la mínima potencia

¹⁵ NAVARRO, Paco; RUI-WAMBA, Javier; FERNADEZ, Alex; ALTISENCH, Oriol; GARCIA, Cristina; JULIA, Jordi; RUI-WAMBA Miguel. LA INGENIERIA DE LA BICICLETA. España: Fundación ESTEYCO, 2010. 284 p. ISBN: 978-84- 933553-5-7

que permite disminuir la velocidad a un valor inferior a 30 km/h es una superior a 300 W, por esto se buscará un motor-generator que permita generar una potencia mayor a esta.

Una vez se encuentra un valor de referencia para la potencia se procede a buscar un valor de referencia para la velocidad a la cual ha de trabajar el motor como referencia se utilizará una velocidad de 25 Km/h con la cual la llanta de la bicicleta giraría a 200.83 RPM, con el que se procedió a buscar en el mercado y se encontró que los motores de corriente continua suelen trabajar a velocidades altas superiores a 3000 RPM por lo que es necesario el uso de un reductor de velocidad.

Finalmente se seleccionó un motor MY1016Z3 el cual suele ser utilizado para Go-karts, motos y bicicletas eléctricas. El motor seleccionado se muestra a continuación

Figura 42. Motor DC 24 V - 350 W - MY1016Z3



Fuente: DELTAKIT: Electronics and Robotics Parts [en línea]. Satellite Ahmedabad. [Consultado: 12 de agosto de 2020] Disponible en: <https://www.deltakit.net/product/ebike-my1016z3-24v-350w-300-rpm-geared-dc-motor/>

Este motor cuenta con las siguientes especificaciones: Tensión nominal de 24 V, motor de corriente continua de imán permanente con escobillas, Relación de engranajes 9.78:1, velocidad nominal de 340 RPM, Piñón de 9 dientes con paso de 1/2" y #410 (apto para usa con la cadena de una bicicleta común) y potencia nominal

de 350 W, peso de 3.5 Kg. Las medidas y el comportamiento de las variables velocidad, torque, corriente y potencia se muestran en los anexos.

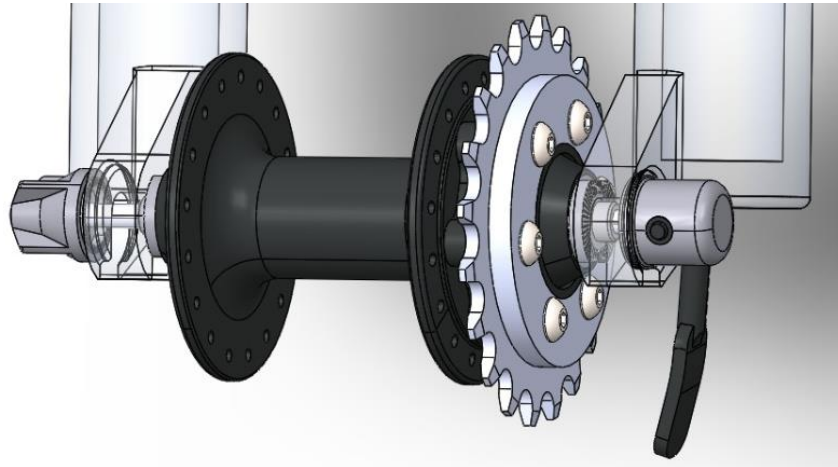
5.2.2. Mecanismo de acople motor-generador. El mecanismo de acople del motor comprende 2 partes, la primera el mecanismo de transmisión de potencia del motor que se hará por medio de piñones y cadena, la segunda la estructura que fijará el motor a la horquilla de la bicicleta.

Este motor tiene una velocidad nominal de 340 RPM siendo esta la velocidad necesaria del motor-generador para superar el umbral que permite el flujo de corriente, por lo que esta velocidad definirá el valor de velocidad en el que el freno comience a actuar, como referencia se tomará una velocidad de 20 Km/h equivalente a una velocidad de 160 RPM, con lo se encuentra que la relación de engranajes debe ser de aproximadamente 1:2.125 , teniendo en cuenta que el piñón del motor tiene 9 dientes, el piñón de la rueda deberá tener 20 dientes con un paso de $\frac{1}{2}$ " , lo cual equivale a una cadena ISO número 41, esta tiene un diámetro de rodillo de 7.77 mm, el diámetro primitivo de un piñón se define por la siguiente ecuación

$$D_p = \frac{Z * P}{\pi} , (30)$$

Donde Z es el número de dientes, P el paso. Se encontró que el piñón de 20 dientes configurado para este tipo de cadena que tiene un correspondiente diámetro primitivo de 80.85 mm, al realizar el modelo en SolidWorks se encontró que es apto para su instalación en la manzana de la bicicleta. El piñón y su montaje en la manzana se muestra a continuación.

Figura 43. Montaje del piñón en una manzana de bicicleta



Fuente: Autores.

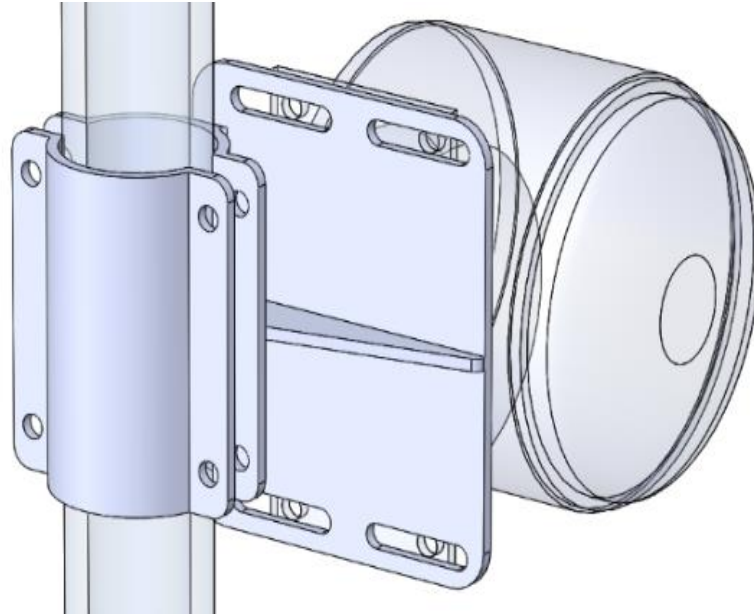
Los parámetros de diseño de este componente como diámetro externo, Angulo del flanco del diente y otros fueron hallados según el libro Diseño en ingeniería¹⁶ y el catálogo de Caderas S.A.¹⁷

Una vez diseñados los elementos de la transmisión se procede a diseñar el soporte que sostendrá al motor, el tubo de la horquilla de una bicicleta común tiene un diámetro que puede variar entre los 4 y 2 cm, por lo que este sistema debe configurarse el motor de manera que sea compatible con la mayoría de las bicicletas, por lo que se propuso el soporte que se muestra a continuación.

¹⁶ BUDYNAS, Richard G. y NISBELT, J. Keith. DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA DE SHIGLEY. 8 ed. México: MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORIALES, S.A., 2008. 1092 P.

¹⁷ CADERSA CADENAS Y DERIVADOS S.A., *Catálogo general* [sitio web]. Barcelona: Cadenas y derivados, S.A. [2020]. [Consultado 17 de septiembre de 2020]. Disponible en: <https://www.cadersa.es/ruedas-dentadas-para-cadena-datos-tecnicos-din-8187/>

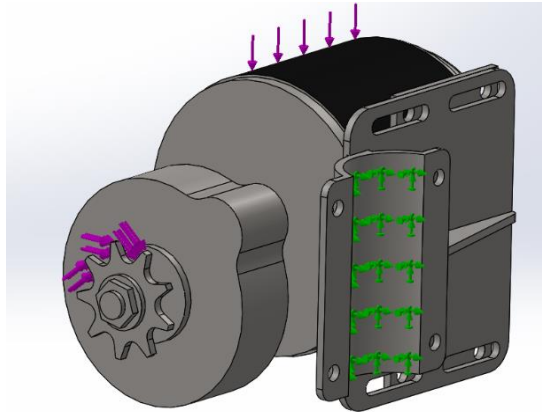
Figura 44. Soporte del motor-generator



Fuente: Autores.

Una vez se tuvo el modelo se procedió a analizar los esfuerzos que se dan en este soporte producto de el torque producido por el motor, las cargas del modelo se estudiaron por medio del método de elementos finitos que tiene SOLIDWORKS, la fuerza que se aplico fue la que se produce con el máximo valor de torque 13.3 Nm, el cual al ser transmitido por un piñón de 9 dientes con un diámetro primitivo de 36.38 mm, genera un fuerza aproximada de 365.58 N en los dientes, Para este estudio también se tubo e cuenta el peso del motor el cual equivale a 34.34 N, La fijación se ubicó sobre la cara del soporte que limita con la horquilla de la bicicleta, y las cargas se aplicaron sobre un modelo de SolidWorks del motor que tiene las medidas del motor seleccionado. El material con el que se realizó este estudio fue el acero AISI 1020. Las cargas utilizadas en la simulación se muestran a continuación.

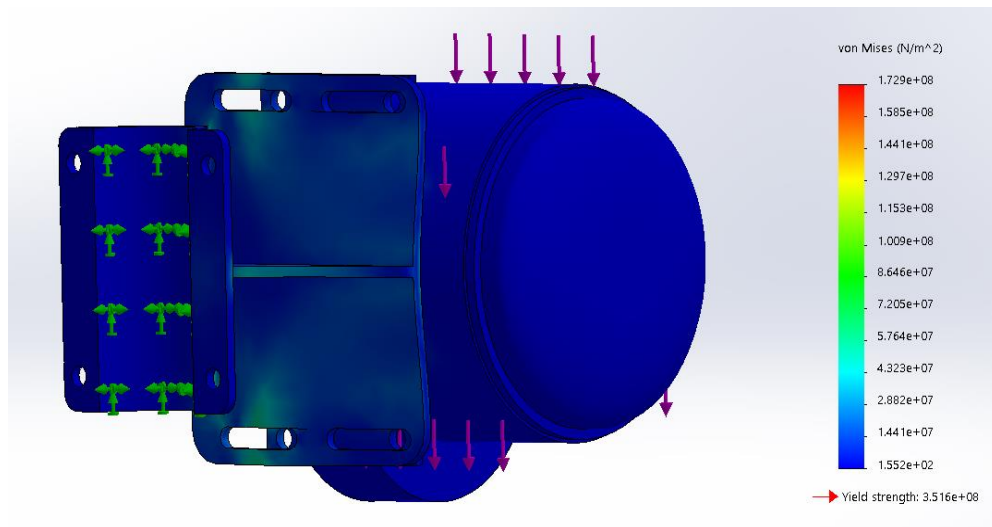
Figura 45. Ubicación de las cargas estudio del soporte motor



Fuente: Autores.

En la figura 45 los puntos de fijación se muestran en verde y las cargas en morado. A partir de estos datos se obtuvieron los siguientes resultados.

Figura 46. Esfuerzos soporte motor-generator



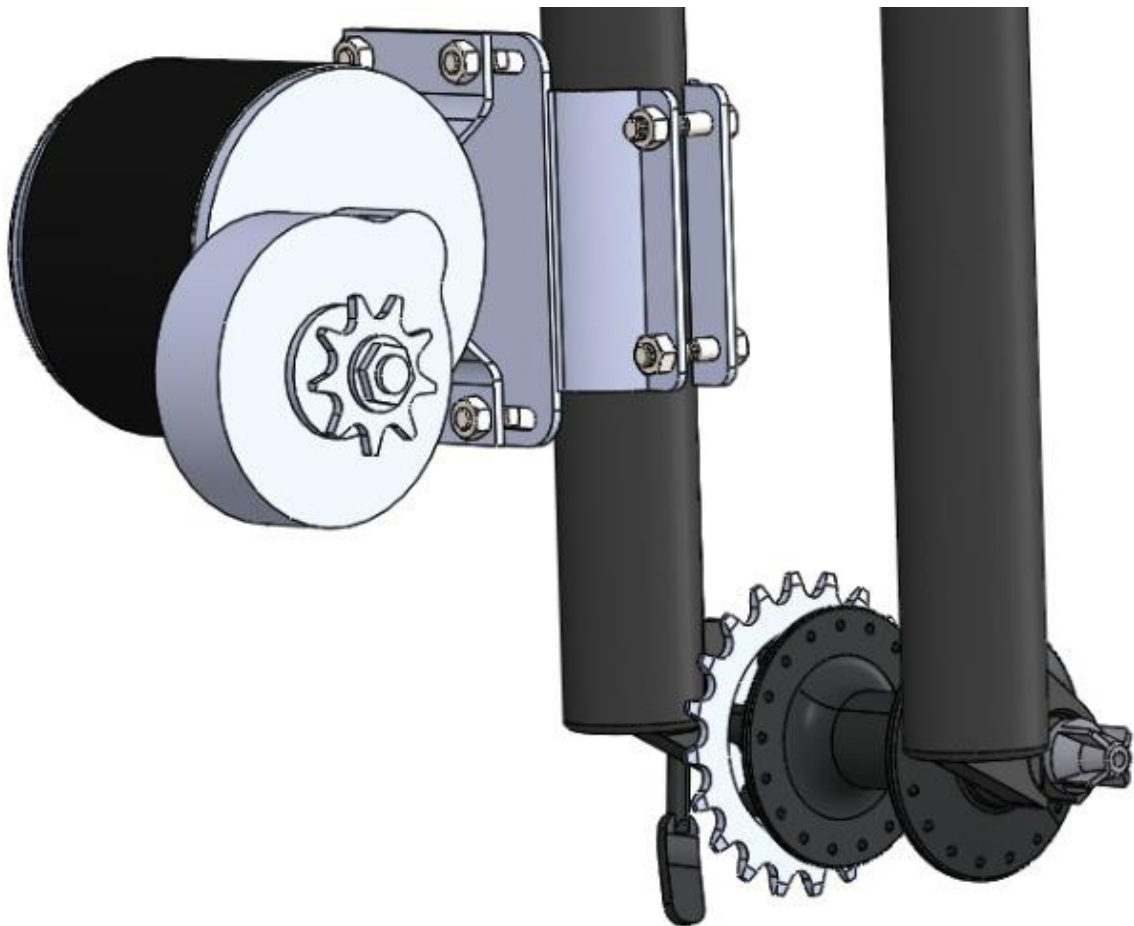
Fuente: Autores.

Como se puede apreciar el valor del máximo esfuerzo no es superior al esfuerzo de fluencia, de hecho, este es tiene un valor de seguridad de 2, por lo que se encuentra que este soporte es apto para soportar el motor-generator.

Este soporte del motor se instala sobre cualquier punto de la horquilla que tenga una sección circular, y el motor se puede ajustarse para que quede más cerca o más lejos de la llanta según lo requiera la bicicleta, el acople se fijará apretando un caucho contra la horquilla, el ancho de este caucho y el ajuste de los pernos permitirán que el acople se ajuste a las diferentes horquillas, los pernos que se utilizarán serán del mismo diámetro que los agujeros que soportan el motor, de 6 mm. La longitud de la cadena dependerá de cada bicicleta por lo que al ser instalado el sistema se debe buscar la medida adecuada de esta.

Una vez definidos los elementos del mecanismo de acople se procede a modelar en conjunto este sistema, el modelado en SolidWorks se muestra a continuación

Figura 47. Mecanismo de acople del motor-generator



Fuente: Autores.

5.2.3. Selección de la batería. La batería es uno de los elementos más importantes debido a que es el dispositivo de almacenamiento de energía, su capacidad limitará la autonomía y la capacidad de frenado ya que como se encontró de manera experimental la corriente debe limitarse para evitar dañar la integridad de este. Los principales parámetros para la selección de la batería son: voltaje de 24 V, capacidad de almacenamiento del valor más alto posible, tamaño y forma que permita una fácil acomodación en el marco de la bicicleta y una capacidad de descarga de por lo menos 18.36 A.

Con estos parámetros se realizó la búsqueda en internet, en las diferentes páginas web que venden este tipo artículos, donde se seleccionó una batería 24V 12 AH 7S2P Li-ion 18650, esta batería cuenta con las siguientes especificaciones: capacidad nominal 12 Ah, Tensión nominal 24 V, Voltaje corte de descarga de 20 +/- 1 V, Voltaje corte de carga 29.4 V, máxima corriente de descarga continua 18 A, máxima corriente de descarga instantánea 36 A, Corriente nominal de carga 2 A, máxima corriente de carga 5 A, ciclo de vida de más de 1000 veces, tamaño de 255*70*20 mm, un peso aproximado de 1 Kg. La batería se muestra a continuación.

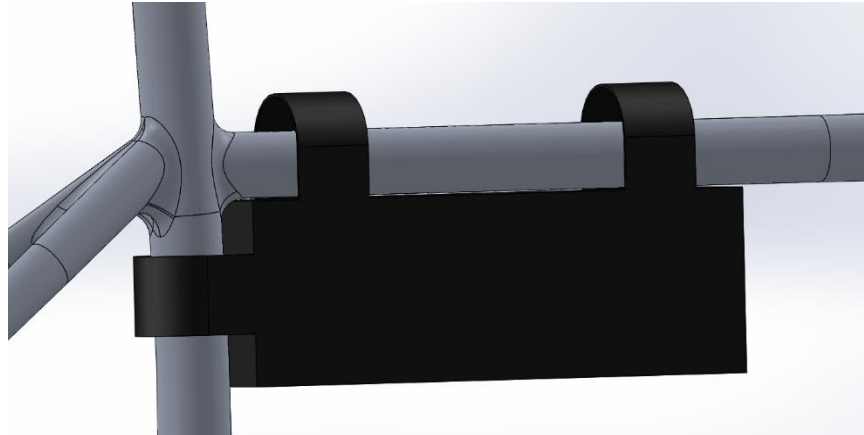
Figura 48. Bateria KAMPING 24V 10000mAH 7S3P



Fuente: Aliexpress. [en Línea]. Tienda online. [Consultado 10 de octubre 2020]. Disponible en: t.ly/hE90

Las especificaciones esta batería cumplen con las requeridas por lo tanto se selecciona esta, el soporte de esta batería será de tela y se ajustará al marco con una cinta de velcro que se configurará según las medidas del marco de la bicicleta, un modelo esquemático de lo anteriormente descrito se muestra a continuación.

Figura 49. Ubicación de la batería en la bicicleta



Fuente: Autores.

Como se puede apreciar en la anterior imagen, el soporte de la batería es simple y permite acoplarse a un sinfín de marcos de bicicleta, además de ser fácil de instalar.

5.2.4. Diseño del controlador. El controlador de este sistema se compone de 2 partes, la primera activa la función de frenado y la segunda activa el motor para que asista el pedaleo, como ya se estudió en la sección 3.5.2.3. la principal función que debe cumplir el circuito de carga de una batería es limitar la corriente que fluye hacia esta, como el valor de corriente máxima de carga de la batería seleccionada es de 5 A se debe limitar a un valor menor, para esto se utilizará el integrado LM-317, el máximo valor de corriente que puede limitar este integrado es 1.5 A por lo tanto se colocarán 3 en paralelo para que se sumen sus corrientes, la resistencia que se debe ubicar entre el pin de salida y ajuste debe ser de un valor de 0.83Ω , estas resistencias disiparán 1.88 W por lo que se la resistencia que se ubique debe superar este valor.

debe circular por el rele es alta 26.87 A, equivalente al mayor valor de corriente que necesita el motor, los relevadores comerciales no tienen 2 contactos independientes, por lo que se instalaron 4 relevadores, 2 de ellos corresponden a R1 y los otros 2 a R2, los relevadores se ubicarán en el mismo punto y tendrán una configuración en paralelo, el relevador que se seleccionó fue el SLA-24VDC-SL-C el cual tiene las siguientes especificaciones: voltaje de bobina 24 V DC, corriente máxima contacto 30 A, 5 pines.

El pulsador que P que activa la bobina R1 se activará al presionar la maneta del freno convencional, en el mercado actualmente encontramos manetas de freno con pulsador, por lo que se utilizará una de este tipo. El elemento descrito se muestra a continuación

Figura 51. Manetas de freno con pulsador.



Fuente: Bipandbip. [en Línea]. Tienda online. [Consultado 1 de octubre 2020]. Disponible en: <https://www.bipandbip.com/recambios-bicicletas-electricas/juego-de-manetas-de-freno-para-bicicleta-electrica-.html>

Como interruptor se utilizará uno que permita su fácil acople al manubrio de la bicicleta, el mercado actual ofrece una gran cantidad de estos, ya que se utilizan en

muchas aplicaciones como en encendido de luces. Un interruptor de estos se muestra a continuación.

Figura 52. Interruptor con acople al manubrio de la bicicleta.



Fuente: AliExpress. [en Línea]. Tienda online. [Consultado 1 de octubre 2020]. Disponible en: <https://es.aliexpress.com/i/4000127142741.html>

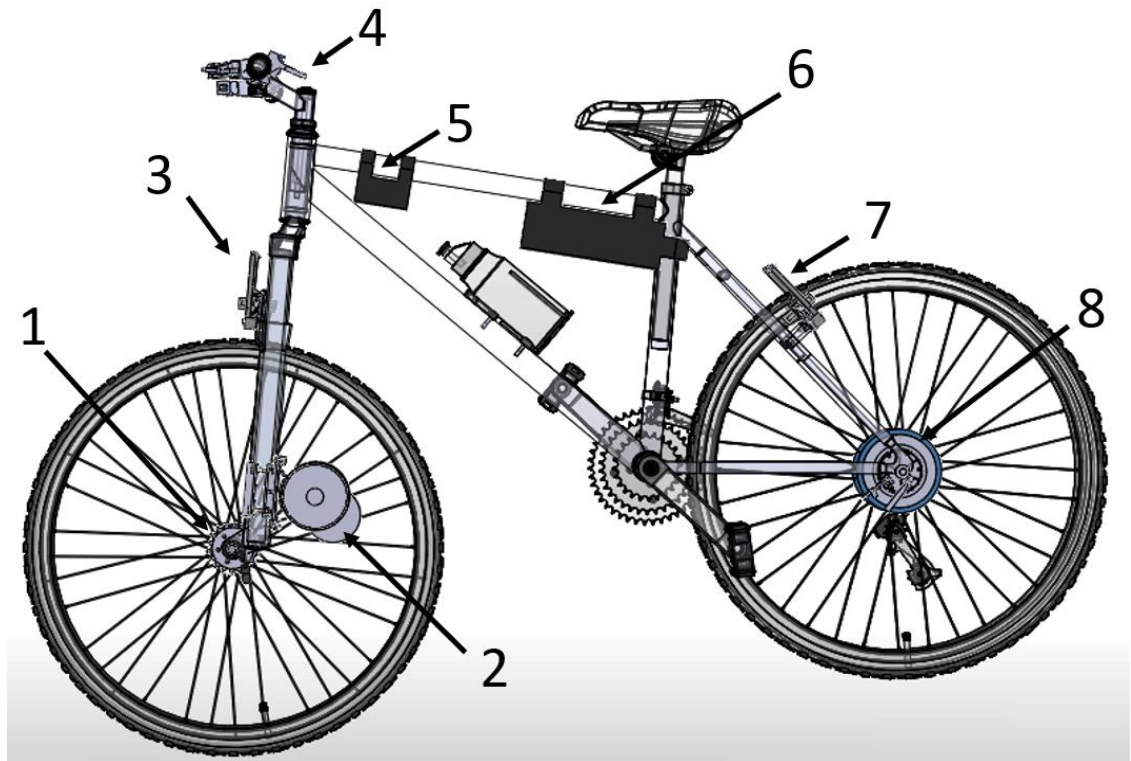
La corriente que fluirá por el pulsador y el interruptor será baja ya que esta sólo activará la bobina del rele. El contrador se ubicará junto a la pila y se acolará de manera similar a ésta.

5.3. SISTEMA DE FRENO REGENERATIVO

La presente sección muestra el freno regenerativo en conjunto, su funcionamiento y la configuración espacial de sus componentes, a continuación se muestra una modelación de bicicleta rin 26" con el freno regenerativo.

Figura 53. Bicicleta con el sistema de freno regenerativo

Figura 54. Distribución espacial de los elementos en la bicicleta



Fuente: Autores.

Donde:

1: Piñón acoplado a la manzana delantera de la bicicleta

2: Motor-generator

3: Freno convencional delantero tipo V-brake

4: elementos de manipulación del freno (Se especifica a continuación)

5: Controlador Subsistema freno eléctrica

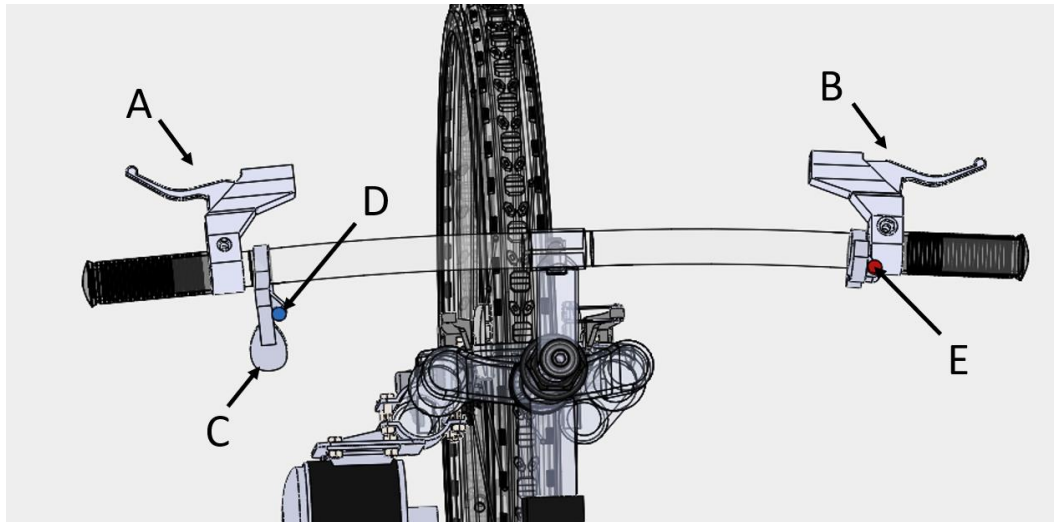
6: Batería eléctrica

7: Freno convencional trasero tipo V-brake

8: Mecanismo y resorte subsistema freno de elementos elásticos

El usuario de la bicicleta manipulará el freno por medio de los siguientes elementos.

Figura 55. Elementos de manipulación del freno



Fuente: Autores.

Donde:

A: Manetas de freno convencional delantero con pulsador

B: Manetas de freno convencional trasero con pulsador

C: Palanca de actuación freno regenerativo mecánico

D: Pulsador que activa la regeneración

E: Interruptor que activa la función de asistencia al pedaleo

La activación de cada freno será de la siguiente forma: para activar el freno regenerativo eléctrico basta sólo con presionar cualquiera de las 2 manetas (A o B) del freno convencional, por lo que indirectamente cuando una persona frene de habitual cargará la batería, cuando la persona desee hacer uso de la energía almacenada en la batería debe oprimir el interruptor E. La activación del freno mecánico se hará por medio de la palanca C la cual tensionará la gualla que conecta con el mecanismo de este sistema activándolo, cuando la persona desee regenerar la energía almacenada en el resorte deberá presionar el pulsador D, el cual destensa la gualla permitiendo que el mecanismo regenere y posteriormente vuelva al estado inicial.

Algunos de los elementos mostrados en las imágenes fueron tomados de la base de datos virtual GRABCAD¹⁸. Como se puede evidenciar en la sección anterior, el motor generador se acoplará al tenedor de la bicicleta y se conecta a la manzana por medio de una cadena.

5.4. DISEÑO PARA LA MANUFACTURA Y ENSAMBLE

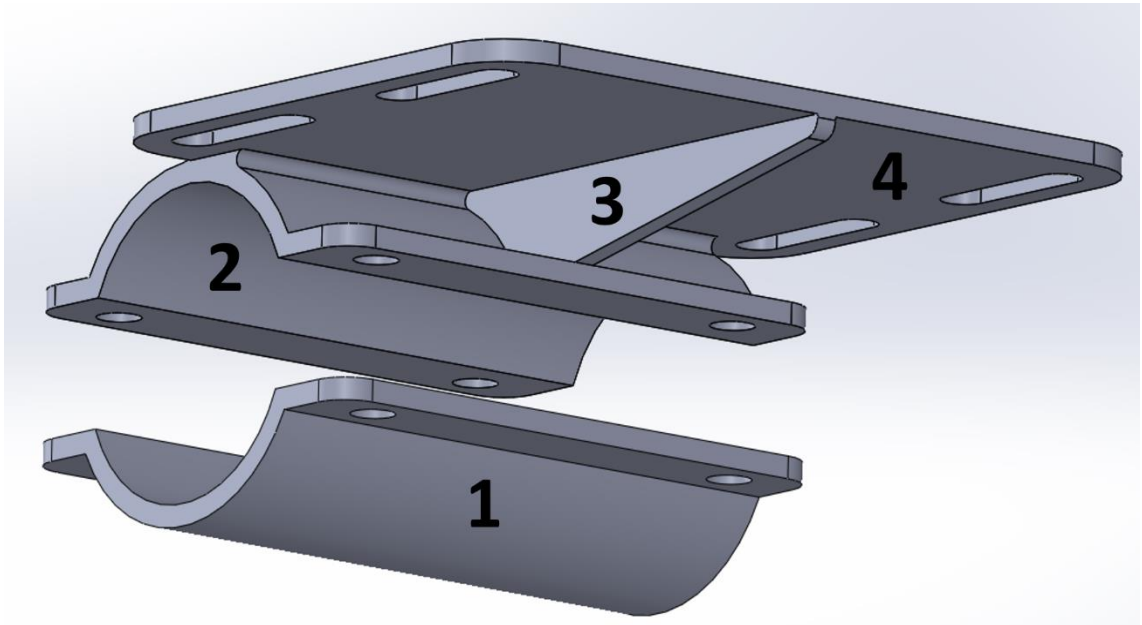
Esta sección se hablará acerca de el metodo de manufactura y ensamble de los componentes del sistema de frenado regenerativo. Los elementos que hacen parte del freno mecánico algunos se formarán a partir de partes unidas con soldadura, tornillos y maquinado, para las piezas de mecanizado completo se utilizará acero SAE 1020, piezas como la manzana, la cual contiene un tambor que se fabricará una parte con maquinado y otra con uniones de lámina con soldadura. Se describirán los procesos a seguir para cada componente que necesita de mecanizado a partir de un bloque de acero AISI 1020, y otros procesos de manufactura a partir de la selección de láminas, tubos o perfiles estándar. En los procesos de soldadura se utilizará MIG de alambre ER70S-3¹⁹.

¹⁸ Base de datos GrabCAD: Comunidad virtual [sitio web]. [Consultado 1 de octubre de 2020]. Disponible en <https://grabcad.com/>

¹⁹ *24 tipos de alambres utilizados con soldadura MIG* [en Línea]. 2 de julio de 2012. [Consultado 10 de septiembre de 2020]. Disponible en <https://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/tipos-de-alambres-utilizados-con-soldadura-mig>

5.4.1. Soporte motor generador. El soporte del motor-generator consta de dos partes, una que soporta el motor y otra que permite ajustar la horquilla de la bicicleta, tal como se muestra en la siguiente figura.

Figura 56. Soporte motor-generator



Fuente: Autores.

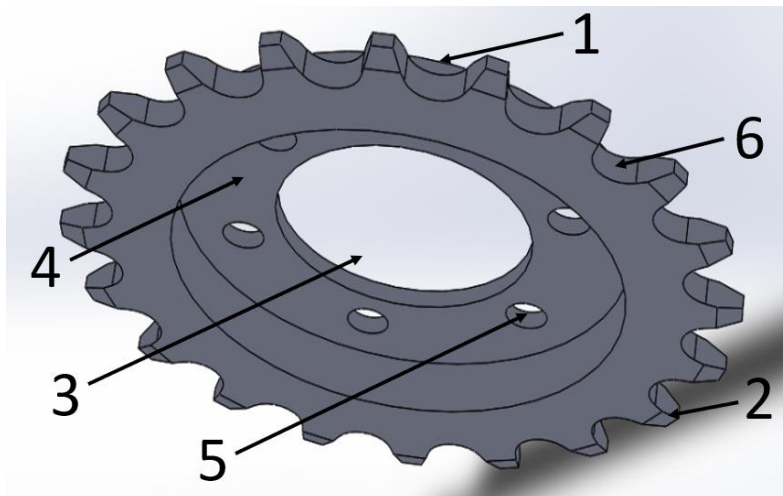
En la imagen se evidencian las dos partes mencionadas anteriormente, la primera conformado por el elemento 1, el cual se manufacturará como una lámina calibre 11 (3.04 mm) recortada a la que en un principio se le harán los 4 agujeros que tiene cerca a las esquina por medio de una operación de taladrado, después se procederá por medio de una operación de formado de lámina a darle la forma circular que tiene en el centro.

En cuanto a la parte superior conformado por los elementos 2, 3 y 4, cabe la pena resaltar que elemento 2 se fabrica de la misma manera que el 1. La lámina que soportará al motor (elemento 2) se manufactura primeramente recortando una lámina y posteriormente realizando una operación de fresado para realizar los agujeros. Por último, la lámina 3 sólo tendrá un proceso de manufactura sencillo, ya

que sólo se recorta una lámina con las medidas de esta. Estos 3 elementos van soldados de la siguiente forma: la lámina 4 se solda con 3 por medio de un cordón de soldadura situado en los puntos de contacto entre estas dos placas; posteriormente este conjunto de placas se soldará al elemento número 2 colocando un cordón de soldadura entre las uniones de estos, la soldadura entre el elemento 4 y 2 debe ser de buena calidad, ya que allí se presenta un concentrador de esfuerzos. Todos los elementos del soporte tendrán un recubrimiento por pintura, la cual evitará su corrosión a los ambientes a los cuales se expone generalmente una bicicleta.

5.4.2. Piñón manzana delantera. La manufactura de este elemento se realizará en su totalidad por operaciones de maquinado debido a que su forma irregular, se fabrica de en acero AISI 1020, las operaciones de manufactura de este elemento se describen a continuación.

Figura 57. Operaciones para la manufactura del piñón.



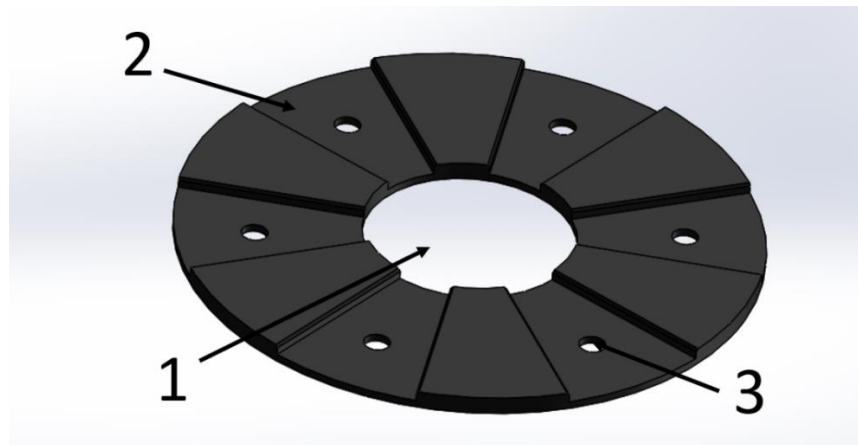
Fuente: Autores.

En la figura 57 se muestra los pasos pertinentes que se deben llevar a cabo para la manufactura de este elemento, partiendo de una barra de 90 mm de diámetro y 8 mm de largo, la cual será llevada en un principio a un torno, en el que se realizará la operación número 1 la cual equivale a un cilindrado externo, y disminuirá el

diametro a 62 mm, posteriormente se realizará la operación 2 un refrentado, este se debe llevar a cabo en la cara anterior y posterior de este elemento, una vez terminado este paso se procederá a realizar el paso 3 el cual se realizará por la operación de taladrado, posteriormente se realiza un cilindrado interno equivalente a la operación 4, una vez realizadas estas operaciones se procede a llevar el elemento a una taladro en el que se le realizarán los agujeros correspondientes al numeral 5, finalmente se llevará a una fresadora para realizar los dientes correspondientes al paso 6.

5.4.3. Acople mandril – manzana. Este elemento se fabricará por medio de operaciones de maquinado esto debido a la forma del elemento a manufacturar, así mismo el bronce es un material que permite un fácil maquinado, el proceso de manufactura de este elemento se menciona a continuación.

Figura 58. Operaciones manufactura acople de mandril - manzana



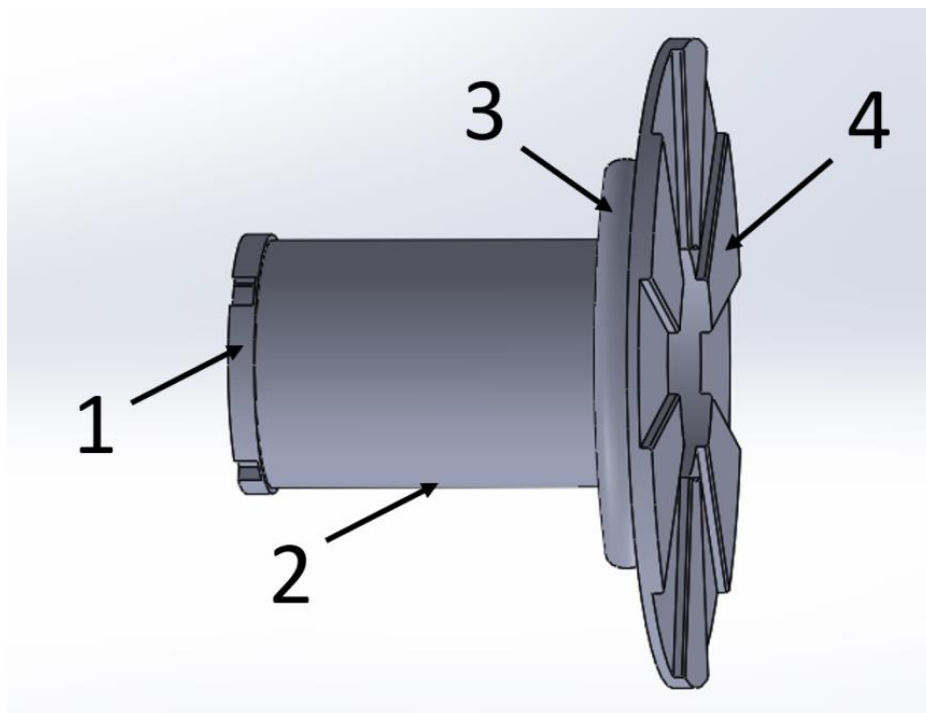
Fuente: Autores.

Se parte de una lámina de calibre 9 (3.8 mm) recortada en forma circular con un diametro de 110 mm, a la que en un principio por medio de fresado frontal se le hará el agujero al que se apresiar en al imagen con el número 1, posteriormente se realizarán las cavidades que permiten el acople del sistema (operación 2) por medio

de fresado frontal, finalmente se llevará a un taladro en el que se realizarán los 6 agujeros marcados como 3 en la figura 58.

5.4.4. Mandril. Este elemento se compone de cuatro partes la cuales se fabricarán por aparte y posteriormente se ensamblarán, la fabricación de esta pieza se describe a continuación.

Figura 59. Partes del ensamble mandril



Fuente: Autores.

Como se muestra en la figura 59 el mandril se configura de cuatro componentes: La pieza 1 que es parte de un trinquete y se fabricará por operaciones de maquinado partiendo de una pieza proveniente del el corte de barra de 45 mm , la que por medio de fresado se le dará la forma final, icluyendo en agujero del centro y los acoples para los trinquetes.

El componente número 2 se fabricará a partir de un perfil tubular con un diametro interno de 40 mm al cual de ser necesario se realizará una operación de cilindrado interno con el fin de llegar al diametro externo externo de este componente.

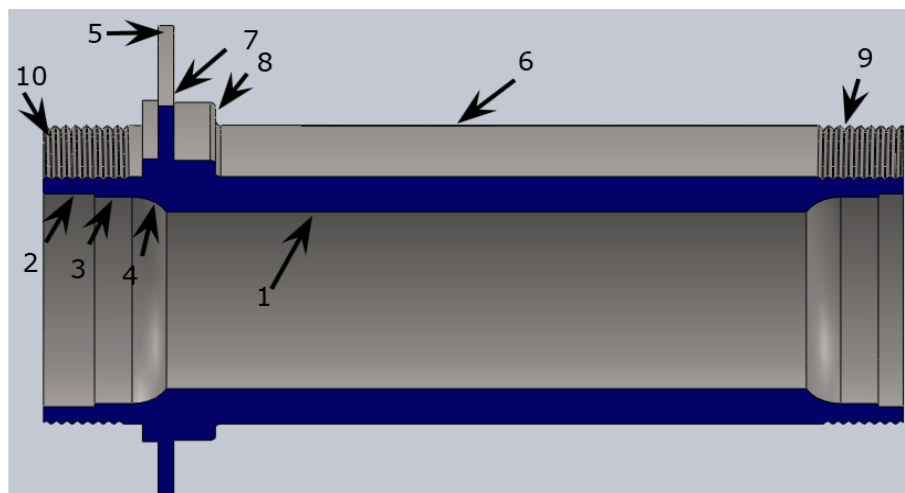
La tercera pieza es el soporte del resorte se manufacturará a partir de un tubo con el diámetro interno equibalente al del resorte, esta tubular se debera doblar para que adquiera la forma arqueada que tiene.

El componente número 4 es una parte primordial ya que esta hace parte del mandril y del acople con la manzana, su manufactura se realiza de forma similar a la descrita en el numeral 4.4.3. pero se realiza con un acero AISI 1020 al igual que todos los componentes de este ensamble.

Una vez se tengan todos los componentes se procedera a realizar el ensambre de estos, por medio de soldadura.

5.4.5. Manzana. Para la fabricación de la manzana se deberá llevar a diferentes procesos de manufactura. El conjunto de la manzana se compone de un eje, dos platos, un tambor y un trinquete, que mediante soldadura se unen para formar el conjunto de la manzana.

Figura 60. Operaciones manufactura eje manzana

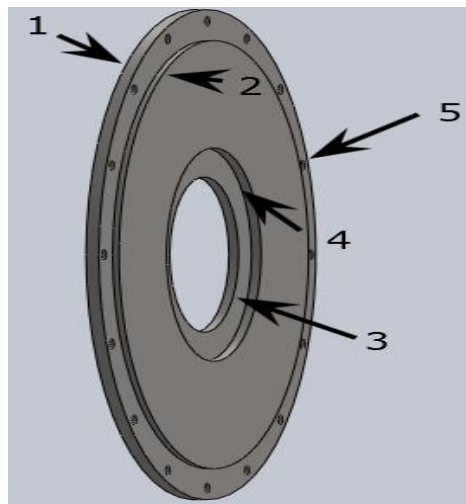


Fuente: Autores.

El eje que se muestra en la figura 60 es conseguido a partir de un redondo de acero de 56 mm de diámetro y 84 mm. Todas las operaciones de cilindrado, roscado y refrentado se deben llevar a cabo en torno. Se realiza primero un refrentado para obtener el largo requerido. Luego sigue la operación 1, que consiste en un taladrado por todo el redondo, para seguir con las operaciones 2, 3 y 4 en donde se debe realizar cilindrado interior. Las operaciones 5, 6, 7 y 8 se deben realizar mediante cilindrado exterior. Las operaciones 9 y 10 se deben llevar a cabo mediante roscado exterior, las dos roscas son derechas.

El plato que se muestra en la figura 61 se obtiene empezando de una lámina de una lámina calibre 11 de 13 cm por 13 cm, luego mediante cizallado se obtiene la operación 1. La operación 2 se obtiene por cilindrado exterior. La operación 3 se obtiene mediante ranurado frontal. La operación 4 se obtiene mediante cilindrado interior. La operación 5 se obtiene mediante taladrado, se deben hacer 16 agujeros.

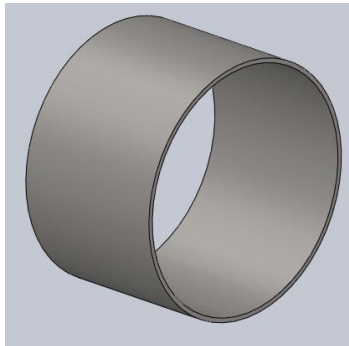
Figura 61. Operaciones manufactura plato izquierdo manzana



Fuente: Autores.

El cilindro mostrado en la figura 62 se obtiene de una lámina calibre 14 de 75 mm por 355 mm, se dobla la lámina para que forme el cilindro y mediante cizalladura se corta la parte sobrante. La lámina se une mediante soldadura MIG.

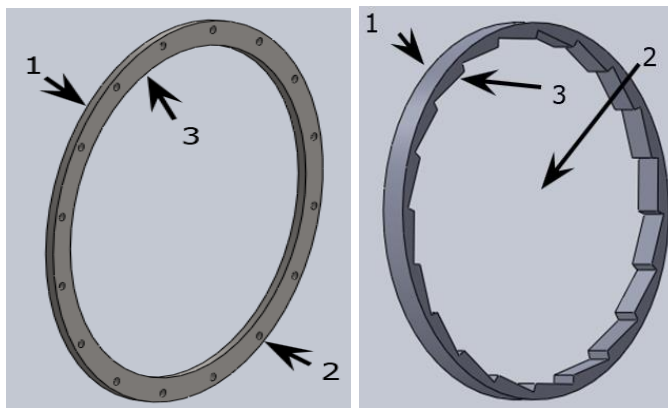
Figura 62. Operaciones manufactura cilindro de la manzana



Fuente: Autores.

En la figura 63 se muestra un plato y un trinquete, el plato el cual se obtiene de una lámina calibre 14 de 13 cm por 13 cm. Mediante cizalladura se obtiene la operación 1. La operación 2 se realiza mediante taladrado de 16 agujeros. La operación 3 se lleva a cabo con un ranurado frontal. El trinquete se obtiene a partir de una placa de 8 mm de espesor la operación 1 se obtendrá tras corte con sierra. La operación 2 se obtiene tras refrentado frontal en torno y su última operación es la de los dientes que se llevan a cabo a tras un fresado frontal.

Figura 63. Operaciones manufactura plato derecho y trinquete de la manzana

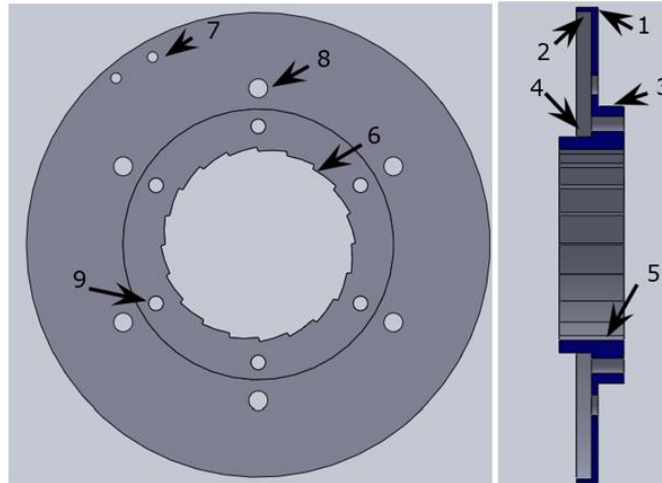


Fuente: Autores.

Las cuatro partes que se muestran en las figuras 60-63 van soldadas entre sí. La parte que se muestra en la figura 60 va soldada al plato de la figura 61, luego el cilindro se suelda con el trinquete, los dos conjuntos obtenidos se unen también con soldadura para luego soldar el plato derecho a estos, formando de esta manera la manzana.

5.4.6. Tapa. La tapa se manufactura de una placa²⁰ de acero de espesor de 5/8" de 112 mm por 112 mm, la cual se corta a laser para obtener un círculo de diámetro 110 mm, de esta forma se obtiene la operación 1. La operación 2 se realiza mediante un cilindrado interno. Las operaciones 3 y 4 se realizan mediante cilindrado exterior. La operación 5 es llevada a cabo mediante ranurado. La operación 6 se realiza mediante fresado frontal. La operación 7 se lleva a cabo mediante un taladrado y roscado. Las operaciones 8 y 9 se realizan mediante taladrado de 6 agujeros.

Figura 64. Operaciones manufactura de la tapa



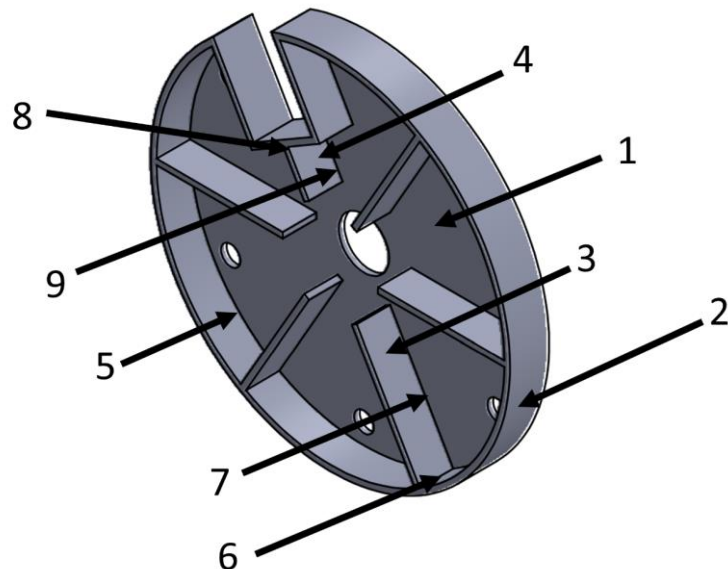
Fuente: Autores.

²⁰ Placa de Hoja/Placa de Acero: Comunidad virtual [sitio web]. Monterrey: Blvd. Carlos Salinas de Gortari Km. 8.8, Apodaca, N.L., C.P. 66600. 2019. [Consultado: 29 de septiembre de 2020]. Disponible en: https://www.fortacero.com/cat_placa_hoja/

5.4.7. Plato fijador. Este elemento se compone de láminas de 1 mm (calibre 19) soldadas entre sí, su manufactura comienza con la operación de corte de lámina en donde se definirá la forma de las piezas 2.6.1, 2.6.2, 2.6.3 y 2.6.4, y se definirán con la operación 1, 2, 3 y 4 respectivamente, la segunda lamina tendrá será doblada para que adquiriera la forma tiene.

Una vez se tiene los elementos, se ensamblan de la siguiente forma: primero se suelda la pieza 2.6.1. con el componente 2.6.2 (operación 5), en segundo lugar, se suelda el elemento 2.6.2 con el 2.6.3 (operación 6), posteriormente se suelda el componente 2.6.3 con el 2.6.1 (operación 7), el paso 6 y 7 se repite para los otras 5 láminas, Por ultima se fijará la lámina 2.6.4 soldándola con 2.6.2 (operación 8) y 2.6.1 (operación 9)

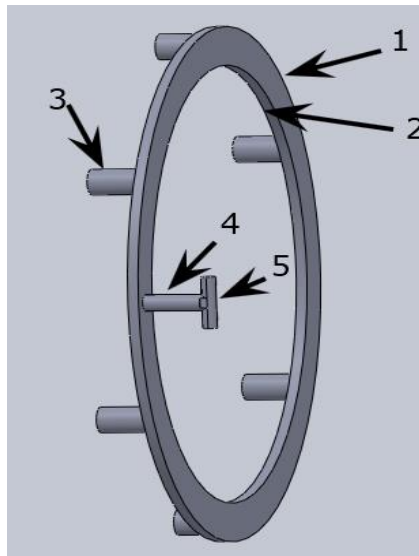
Figura 65. Operaciones manufactura del plato fijador



Fuente: Autores.

5.4.8. Retenedor. El retenedor se manufactura de lámina calibre 14 de 80x80 cm. Mediante la cizalladura de esta lámina se obtiene la operación 1. La operación 2 se obtiene mediante ranurado frontal de la lámina. La operación 3 se obtiene al soldar 6 pines. La operación 4 se obtiene al soldar un redondo de largo 8 mm. La operación 5 se obtiene al soldar un pin sobre el pin del resultado de la operación anterior quedando estos perpendiculares.

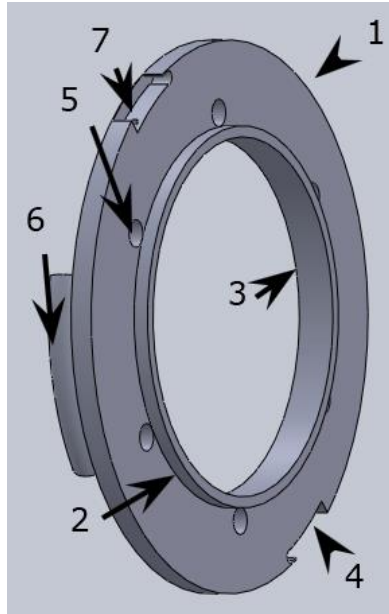
Figura 66. Operaciones manufactura del retenedor



Fuente: Autores.

5.4.9. Plato derecho. El plato derecho se manufactura de una lámina de calibre 2 de 10x10cm, mediante corte laser de la lámina se obtiene la operación 1. La operación 2 se obtiene mediante cilindrado exterior. La operación 3 se obtiene mediante refrentado frontal. La operación 4 se obtiene mediante fresado frontal. La operación 5 se obtiene mediante taladrado de seis agujeros. La operación 6 se obtiene mediante el corte de un tubo de ¼", este se dobla y se suelda al plato, y la operación 7 que consiste en un hueco donde ingresa el resorte para la uñeta se hace con taladrado.

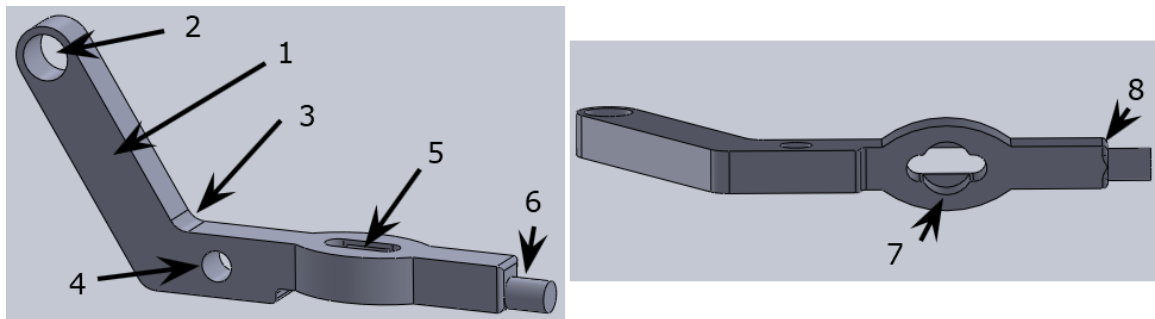
Figura 67. Operaciones manufactura del plato derecho



Fuente: Autores.

5.4.10. Palanca actuadora. Como se aprecia en la figura 67 la palanca del freno se manufactura partiendo de un bloque de acero 8x55x25 mm, mediante corte con tronzadora y fresado se realiza el perfil frontal que se muestra en la figura 68 de esta forma se realiza la operación 1. Las operaciones 2, 4 y 7 se realizan con taladrado. La operación 3 se realiza con fresado. La operación 4 se realiza con taladrado. Las operaciones 5, 6 y 8 se realizan mediante fresado de cavidades.

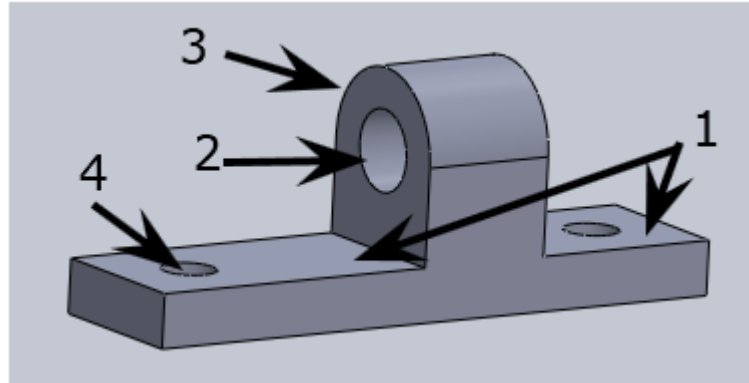
Figura 68. Operaciones manufactura de la palanca de freno



Fuente: Autores.

5.4.11. Soporte palanca. Esta pieza se manufactura de un bloque de acero de 10.6x14x6 mm, mediante fresado por cavidades se realizan las operaciones 1 y 3, la operación 2 se realiza mediante taladrado y la operación 4 mediante taladrado y roscado interno.

Figura 69. Operaciones manufactura del soporte palanca



Fuente: Autores.

5.4.12. Otros componentes del freno mecánico. Componentes como el eje de la rueda, los resortes, los rodamientos, los balines, entre otros, son elementos que se encuentran ya sea en el mercado local fabricados, se hayan seleccionado por catálogo de fabricante o el fabricante tenga su método para fabricar piezas como sucede con los resortes.

6. MODELO FUNCIONAL

Con el fin de comprobar el funcionamiento del sistema de frenado regenerativo se realizaron 2 modelos funcionales uno por cada subsistema.

6.1. MODELO FUNCIONAL DEL FRENO MECÁNICO

Con el fin de mostrar el funcionamiento del mecanismo activador y regenerador del freno con elementos elásticos se realizó un modelo funcional, el cual se diseñó para un frenado de menor capacidad, este se muestra en la figura 70.

Figura 70. Modelo funcional freno mecánico



Fuente: Autores.

Las características del modelo desarrollado están para máximo una distancia de frenado de 4 m debido al diseño del resorte helicoidal a torsión seleccionado, se utilizaron dos trinquetes, uno conectado al eje que funciona como mandril para el resorte, este tiene un plato que conecta a la rueda al moverse de forma axial, al accionar el freno una guaya se mueve haciendo que mueva una palanca que

contiene un rodamiento y un pin, el rodamiento mueve el mandril mientras que el pin bloquea el plato que no hace parte del mandril. Al acoplarse a la rueda en movimiento el resorte se deforma y produce una fuerza contraria que va aumentando al irse deformando este. Al detenerse la bicicleta el usuario no debe soltar la palanca del freno. El proceso de regeneración sucede al dejar de accionar el freno un resorte hace que la guaya vuelva a su posición normal y desbloquea el plato que inicialmente estaba fijo, este tiene un trinquete con el fin de regenerar la energía almacenada a la rueda, este se bloqueó al frenar mediante un pin que ingresa para pasar por uno de los agujeros que este tiene, de esta forma bloquea el plato. En la figura 71 se muestra a detalle cada conjunto de componente del modelo funcional construido.

Figura 71. Componentes del modelo funcional



Fuente: Autores.

6.1.1. Pruebas del modelo funcional. Se realizó una prueba de frenado con el fin de mirar las características al frenar de este, debido al diseño específico para que frenara en una distancia máxima de 4 m, las pruebas serán de bajo nivel energético, es decir para velocidades de entre en 8 a 10 km/h en superficies planas de asfalto. Se realizaron las pruebas obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 12. Resultados frenado modelo funcional

Masa usuario	70 kg		
Masa bicicleta	15 kg		
Prueba	Velocidad inicial (km/h)	Tiempo de frenado (s)	Distancia de frenado (m)
1	15	2	3,8
2	10	1,7	2,1
3	12	3	3,1
4	13	2	3,8
5	10	1,5	3,7

Fuente: Autores.

De las pruebas realizadas se usó solamente el freno regenerativo con resorte por lo que se tiene que cumplió su función de frenado. No se usaron los frenos convencionales por lo que parte de la energía de frenado fue almacenada en el resorte y disipada por la fricción generada tras el movimiento entre los componentes del freno y bicicleta. Para evaluar la eficiencia del sistema y evaluar el proceso de la regeneración se hicieron pruebas soltando el freno y dejando que la bicicleta se moviera. Para reducir la fricción entre los componentes de la bicicleta estas pruebas se hicieron sin que el usuario estuviese montado en la bicicleta. Se registrará si se movió la bicicleta y si realizó este proceso hacia adelante. Los resultados son tras el proceso de regeneración de las pruebas anteriores.

Tabla 13. Resultados regeneración modelo funcional

Masa bicicleta	15 kg	
Prueba	Movió la bicicleta	Dirección movimiento
1	si	Hacia adelante
2	si	Hacia adelante
3	si	Hacia adelante
4	si	Hacia adelante
5	si	Hacia adelante

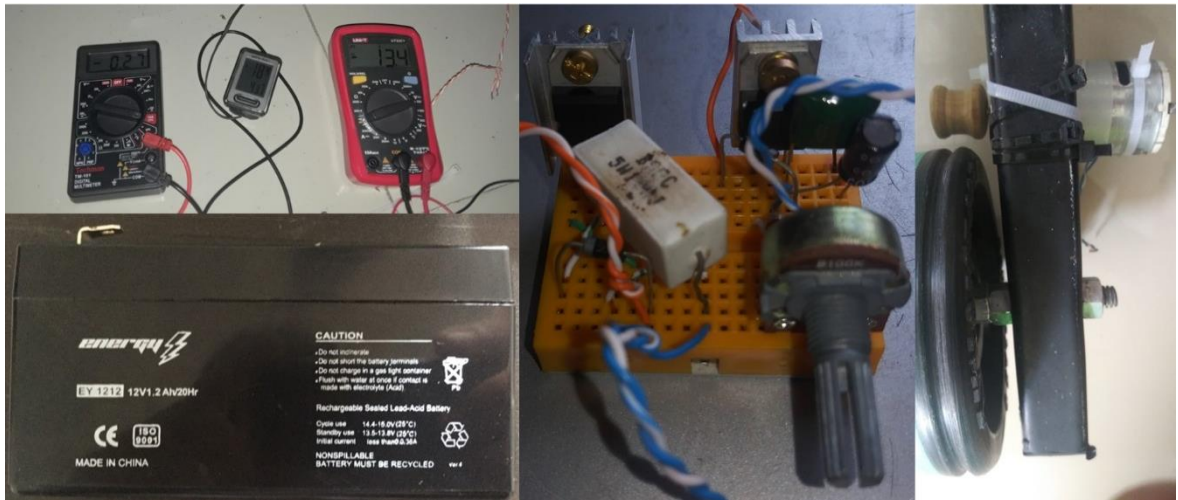
Fuente: Autores.

Como se observa en la tabla 8 los resultados muestran que el proceso de regeneración cumplió los objetivos de funcionamiento, por lo que el modelo funcional satisface las características para el frenado regenerativo a partir de elementos elásticos.

6.2. MODELO FUNCIONAL ELÉCTRICO

Para este modelo se tuvieron en cuenta las observaciones que se encontraron con los prototipos, con este se pretendió con este encontrar el comportamiento del sistema cargando una batería real, para esto se utilizaron los siguientes componentes: un motor DC imán permanente, una batería de 12 V con una capacidad de 1.2 Ah, un limitador de corriente LM-317, 2 multímetros digitales y un velocímetro, los elementos se mostrarán a continuación.

Figura 72. Componentes del circuito.



Fuente: Autores.

El montaje de este modelo funcional se realizó sobre un rodillo de bicicleta, debido a que se disponía de una entrada de potencia fácil de manejar y medir, El rin de la bicicleta era de 26 pulgadas de diámetro, el del tambor del rodillo 11.5 cm y estaba unido al motor mediante una correa de caucho, el diámetro de la polea del motor era de 2 cm, esta transmisión tenía una relación total de 1:33.02, el montaje se muestra a continuación.

Figura 73. Montaje modelo



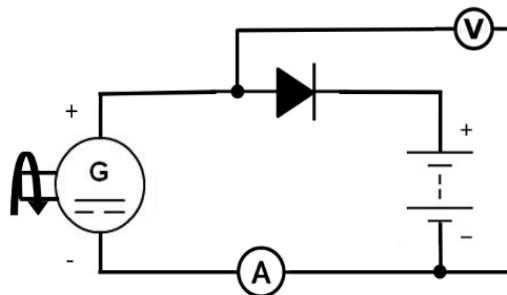
Fuente: Autores.

Con este modelo lo que se pretendió encontrar el comportamiento del sistema con y sin controlador de carga para la batería, para esto se estudiará el comportamiento de la corriente y el voltaje utilizando únicamente un diodo rectificador y otro un limitador de corriente.

Las 2 configuraciones utilizadas en esta prueba se mostrarán a continuación:

- Circuito con diodo rectificador: Con este circuito se pretendió estudiar el comportamiento de una batería al cargarse, por lo que esta se colocó como única carga, adicionalmente se ubicó un diodo rectificado en la terminal positiva de la batería con el fin de la corriente no circulará en el sentido de descarga, el diagrama del circuito se muestra a continuación.

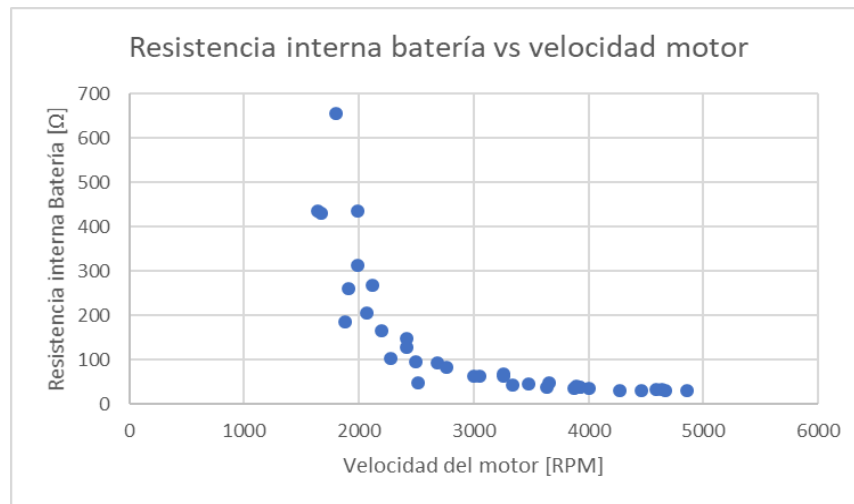
Figura 74. Circuito con diodo rectificador



Fuente: Autores.

Se tomaron los datos de voltaje, velocidad y corriente para distintas velocidades, las velocidades que se manejaron no fueron altas debido a que se superaba por mucho la corriente recomendada para cargar la batería, con estos datos se encontró el comportamiento de la resistencia interna de la batería a medida que se aumenta la velocidad, a continuación, se muestra una gráfica del comportamiento que se encontró utilizando los datos hallados en la prueba realizada a este circuito.

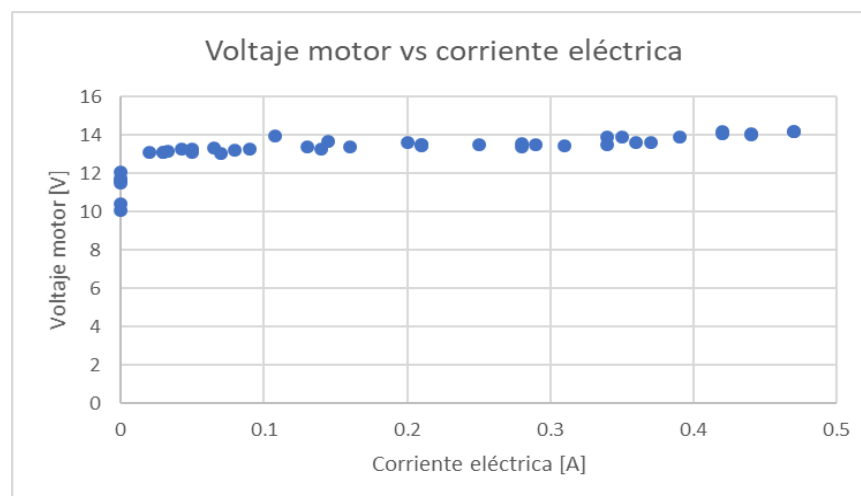
Grafica 3. Resistencia interna de la batería.



Fuente: Autores.

Como se puede apreciar el comportamiento de la gráfica tiene un decaimiento exponencial, en un principio la resistencia interna tiende a un valor alto, esto se debe a que el generador debe alcanzar un voltaje superior al de la batería para que exista un flujo de corriente eléctrica, para entender mejor este comportamiento se mostrará a continuación la variación del voltaje con respecto de la corriente.

Grafica 4. Voltaje motor vs corriente de la batería.



Fuente: Autores.

Como se puede apreciar en la gráfica 3, la corriente sólo circula cuando se logra un voltaje superior a los 13 V; asimismo, se observa que después de alcanzar este voltaje este se mantiene casi constante, en la práctica la corriente suministrada a la batería era más de la que se recomienda (0.12 A). No se tomaron datos con corrientes más elevadas ya que se ponía en riesgo la integridad de este elemento.

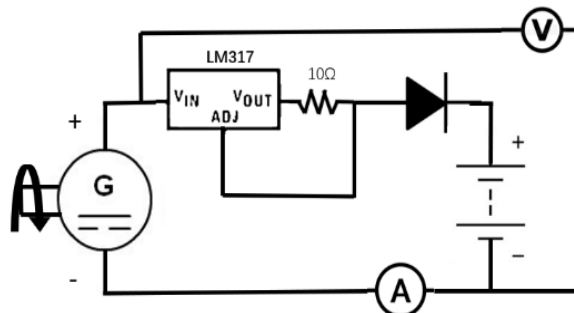
- Circuito con limitador de corriente: Este circuito utiliza un LM317 para limitar la corriente que llega a la batería, la corriente de salida se configura con una resistencia que se ubica entre el pin ajuste y el pin salida de este integrado, el valor de esta resistencia está dado por la siguiente ecuación.

$$i_{out} = \frac{1.25}{R}, \quad (30)$$

Donde: i_{out} es la corriente de salida, R la resistencia.

Utilizando esta ecuación encontramos que el valor de la resistencia adecuado para limitar la corriente a 1.2 A es 10.42Ω por lo que se utilizó una resistencia de 10Ω , el circuito se muestra a continuación.

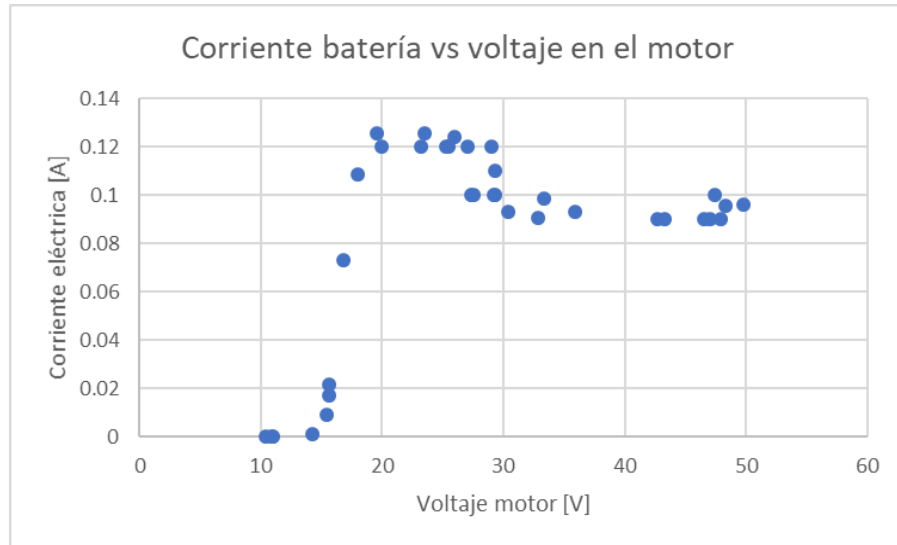
Figura 75. Circuito con limitador de corriente.



Fuente: Autores.

Para este montaje se tomaron datos de velocidad, voltaje y corriente, el comportamiento que de la corriente se muestra a continuación.

Grafica 5. Corriente batería vs voltaje del motor.



Fuente: Autores.

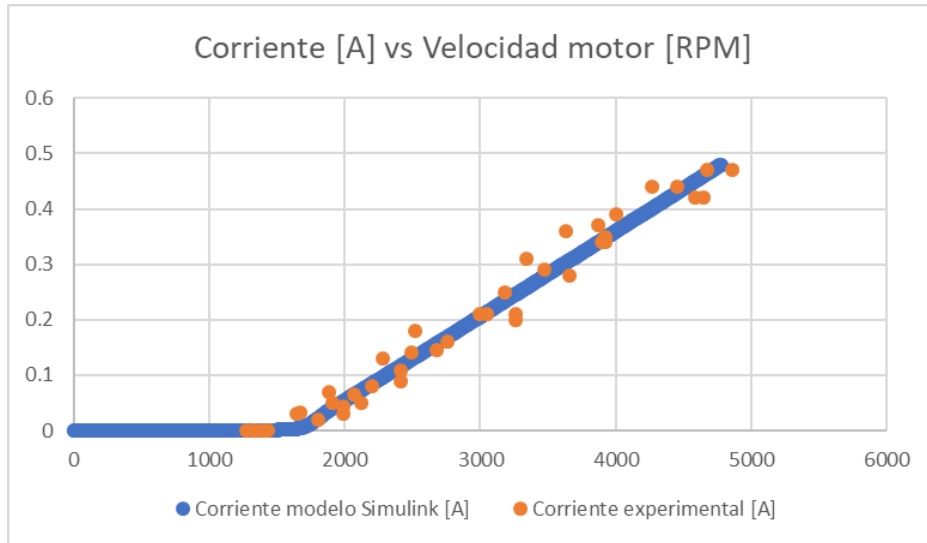
Como se puede observar en la gráfica el limitador de corriente evita que la corriente se eleve por encima de los 0.125 A lo cual era de esperarse, asimismo se encontró que después de los 30 V el valor de corriente decae aproximadamente 0.02 A.

Con el fin de comparar el modelo matemático de un generador DC descrito en la sección 2.3. se procedió a realizar un modelo en SIMULINK esto para identificar que tanto se aproxima el comportamiento teórico con el experimental, para hallar la constante del motor se midió el voltaje producido por esta sin ningún tipo de carga y se encontró que tiene un valor de 0.00809 [V/RPM], para encontrar la resistencia de la batería se utilizaron los datos obtenidos con el primer circuito y se encontró un valor promedio de 51.63 [Ω]. El diagrama de bloques de SIMULINK se muestra en los anexos.

Para el modelo se configuro una entrada de velocidad que variaba de 0 a 18 km/h con el fin de compararlo con los datos obtenidos en el primer circuito, cuando la

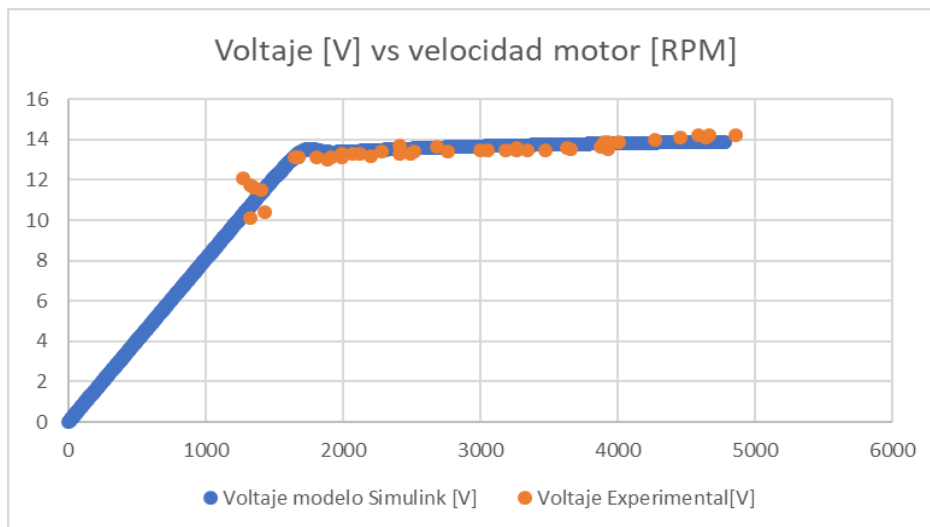
única carga eléctrica era la batería. Las gráficas en donde se puede observar la similitud entre los modelos se muestran a continuación.

Grafica 6. Corriente eléctrica modelo experimental y teórico.



Fuente: Autores.

Grafica 7. Voltaje modelo experimental y teórico.



Fuente: Autores.

Como se puede apreciar en ambas graficas el comportamiento del modelo de simulink se aproxima al encontrado de manera experimental, mostrando asi la valides de esta modelo.

Todos los datos que se tomaron de manera experimental en esta sección, se adjuntan en anexos.

7. ESTUDIO DEL SISTEMA DE FRENO REGENERATIVO

Una vez se tiene seleccionados todos elementos del sistema se procede a estudiar su comportamiento en conjunto, para esto se utilizarán los modelos que fueron encontrados a lo largo del proceso de diseño, los parametros que se utilizaron para esta simulación se muestran a continuación:

- Voltaje batería: 24 [V]
- Constante electromotriz del motor generador: 0.071 [V/RPM]
- Resistencia interna del motor: 0.9 [Ω]
- Reducción motor 2.22:1
- Voltaje de carga máximo: 29.4 [V]
- Límite de corriente de carga: 4.41 [A]
- Masa ciclista: 80 [Kg]
- Masa bicicleta: 15 [Kg]
- Constante aerodinámica: 0.9
- Densidad del aire: 1.112 [Kg/m³]
- Área perpendicular al movimiento: 0.45 [m²]
- Constante efectiva del resorte freno mecánico: 3.866 [Nm/rad]

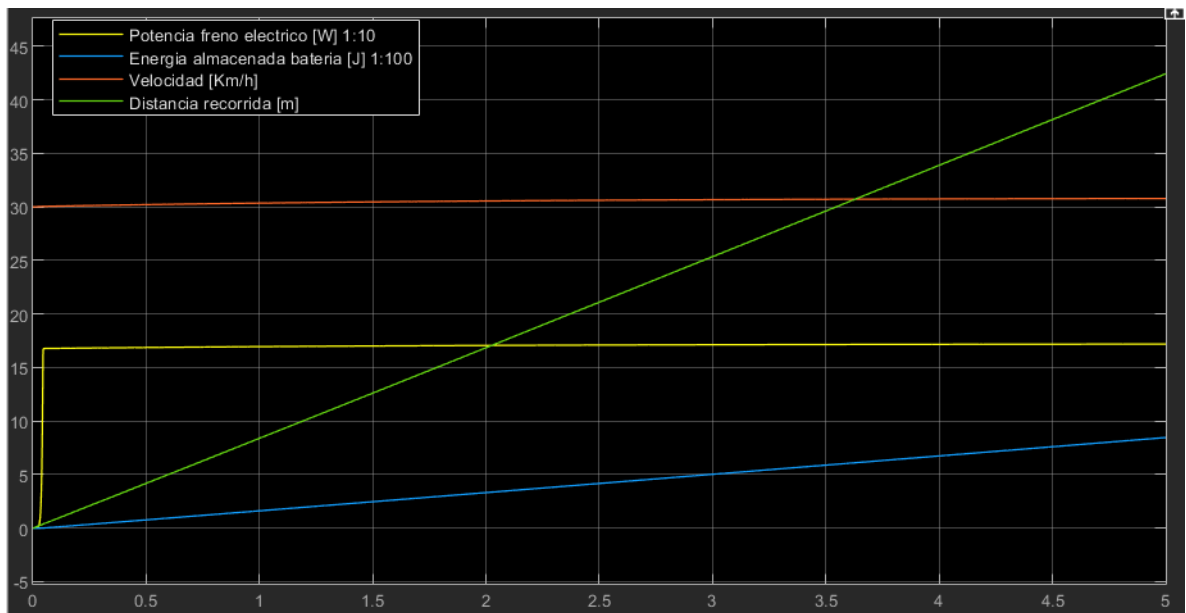
Los parametros anteriormente mostrados se calcularon con los datos equivalentes a cada elemento, para el caso del motor lo datos como la resistencia interna, y la constante electromotriz se tomaron de los datos nominales del motor, el voltaje maximo al que se debe cargar se tomo de los datos de la batería, la corriente limite de carga fue la que se limito con los 3 integrados LM317. El diagrama de bloques del modelo relizado en Simulink se adjunta como el anexo G.

A partir de este modelo se estudio la cantidad de energía que almacena cada subsistema y posteriormente del sistema en conjunto.

7.1. FRENO ELÉCTRICO

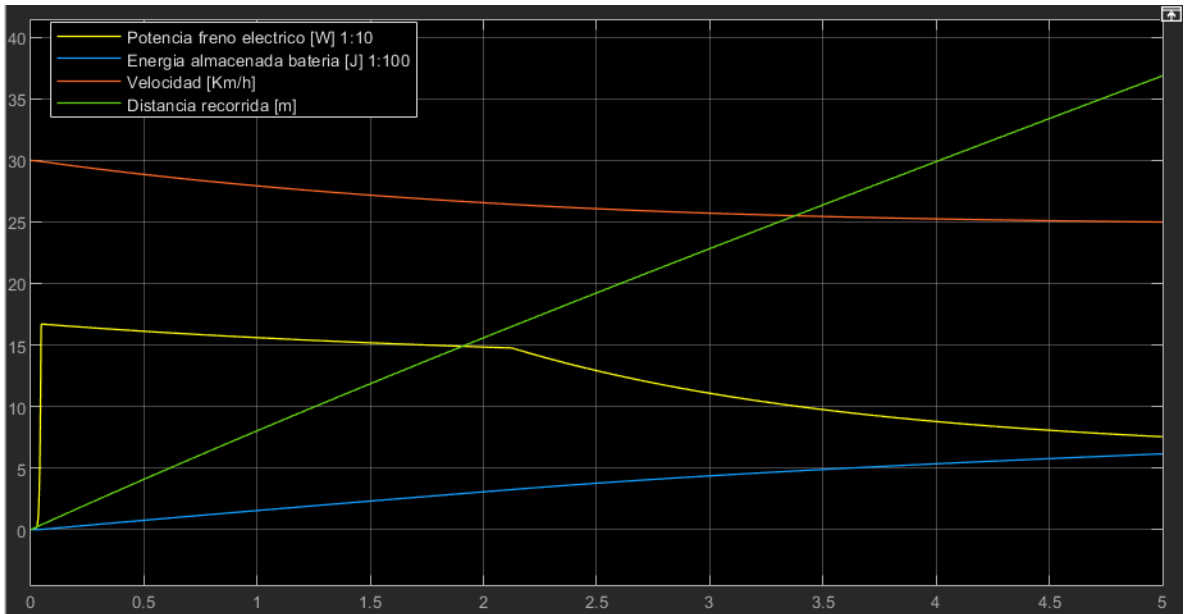
Primeramente se analizó el subsistema de freno eléctrico cuando se desciende por una pendiente de 10 grados y 5 grados activando sólo el freno eléctrico, la velocidad inicial de la bicicleta se configuró en 30 Km/h, la respuesta del modelo se muestra a continuación.

Gráfica 8. Comportamiento del freno eléctrico al descender por una pendiente de 10 grados.



Fuente: Autores.

Grafica 9. Comportamiento del freno eléctrico al descender por una pendiente de 5 grados.



Fuente: Autores.

Como se puede apreciar el comportamiento del freno eléctrico se ve afectado con la variación de la pendiente, en la primera grafica se puede apreciar que el freno eléctrico sostiene la velocidad a un valor cercano a 30 Km/h y la energía almacenada tiene un crecimiento lineal. En la segunda grafica el valor de la velocidad decae hasta llegar a un valor constante y asimismo el valor de la potencia del freno disminuye.

Una vez se encontro el comportamiento de el subsistema en la bicicleta se procedio a calcular la potencia de cara de la, aplicando valores de velocidad desde 20 a 30 [Km/h], ya que es la variable que mas afecta el comportamiento del freno.

Tabla 14. Potencias freno eléctrico

Velocidad [Km/h]	Potencia carga batería [W]	Potencia freno eléctrico [W]
30	129.65	150
28	129.65	138.85

25	70.4	70.64
23	0	0
20	0	0

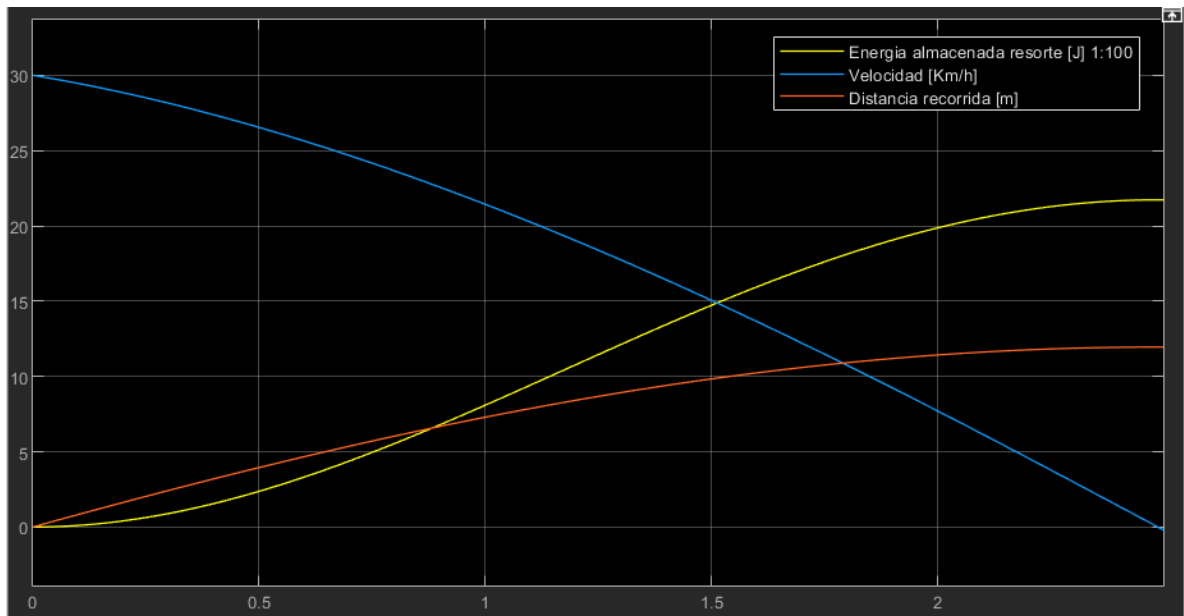
Fuente: Autores.

En la tabla 14 se muestran 2 potencias una equivalente a la de carga de la batería y una segunda que toma la potencia de toda la carga eléctrica (batería + limitador de corriente) como se puede apreciar el limitador de carga disipa la energía excedente una vez se llega al límite de corriente configurado. Cabe resaltar que el modelo realizado no toma en cuenta la energía disipada en algunos elementos como las conexiones y el circuito de control.

7.2. FRENO DE ELEMENTO ELÁSTICO

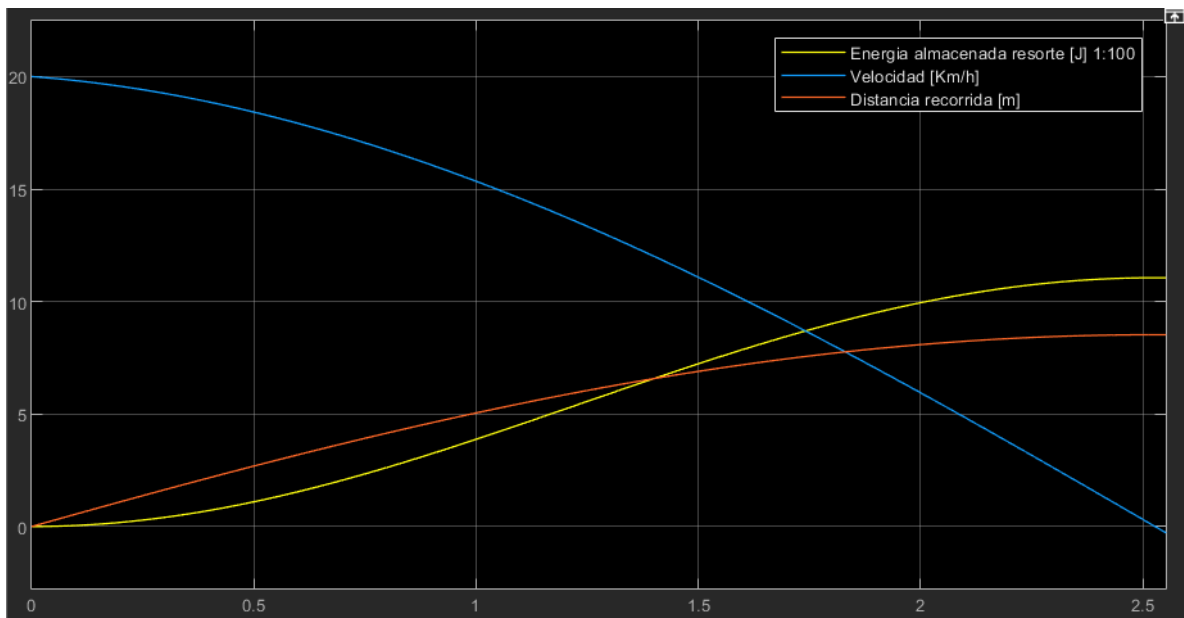
A continuación se procede a estudiar el comportamiento del freno de elementos elásticos por lo que se configuró una pendiente de 0 grados y dos valores de velocidad inicial: 30Km/h y 20Km/h

Grafica 10. Comportamiento freno regenerativo mecánico con una velocidad inicial de 30 Km/h



Fuente: Autores.

Grafica 11. Comportamiento freno regenerativo con una velocidad inicial de 20 Km/h



Fuente: Autores.

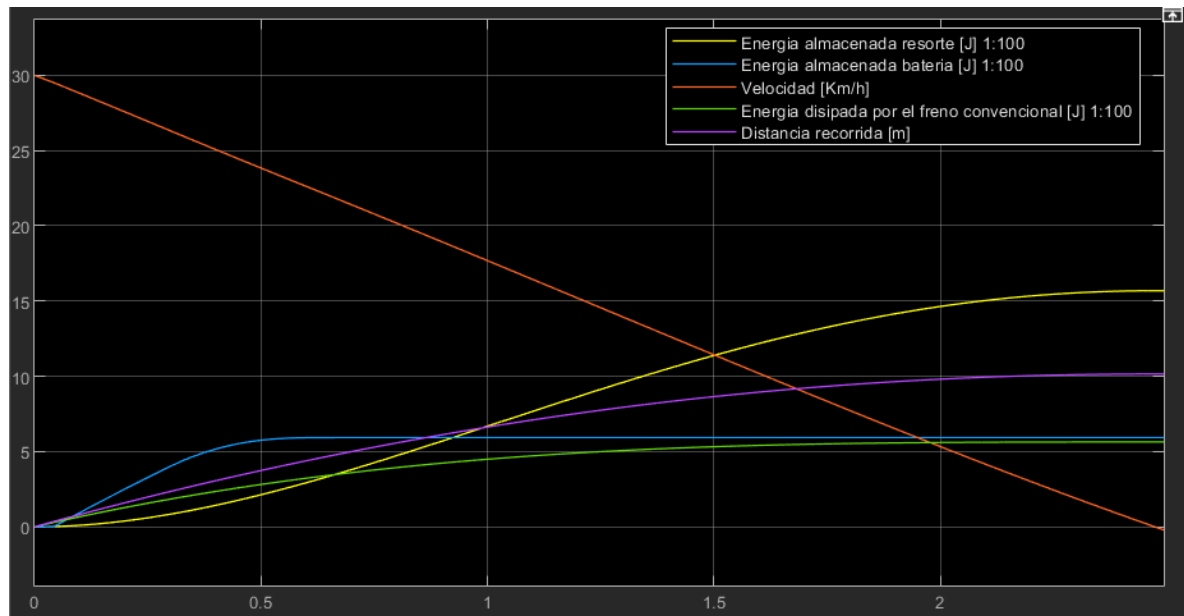
Como se puede apreciar en la gráfica la acción del freno de elementos elasticos, la velocidad en un principio decae a un menor nivel, pero va aumetando a medida que incrementa la distancia recorrida, esto se debe a que la fuera del resorte es proporcional a esta, como ya se había descrito en la sección 3.5.1.2.

7.3. SISTEMA DE FRENADO EN CONJUNTO

Un se estudiaron los subsistemas por aparte, se procede estudiarlos en conjunto e introduciendo el efecto de un freno convencional los cuales generan una fuerza porporcional a la velocidad de la bicicleta, además de ser dependiente de muchas variables como la presión que el usuario de la bicicleta aplica a las manetas de freno, el tamaño y material del freno, coeficiente de fricción, etc.

Por motivos practicos se configuro una constante del freno convencional de $10 \frac{N*s}{m}$, un pendiente de 5 grados y una velocidad inicial de 30 Km/h. la respuesta del sistema se muestra a continuación.

Grafica 12. Comportamiento sistema freno en conjunto



Fuente: Autores.

Como se aprecia en la gráfica 12 el uso en conjunto de los 3 frenos genera un decaimiento de la velocidad casi lineal, lo cual es más cómodo para el usuario, este comportamiento se debe a que en un principio al ser la velocidad alta el freno eléctrico puede convertir gran parte de la energía, pero una vez disminuye la velocidad el freno eléctrico pierde protagonismo. Asimismo, el freno regenerativo mecánico produce un toque más alto a medida que se deforma el resorte generando un mayor efecto sobre el frenado una vez se está cerca de detenerse.

8. ANALISIS DE COSTOS

En esta sección se estudiarán los costos de realización de este proyecto en donde se incluyen el valor de sus componentes, materias primas y procesos de manufactura. A los objetos importados se les aplicó una tasa de cambio de 3697²¹ COP/ USD esta corresponde a la tasa de cambio del día 15 de septiembre del 2020.

8.1. COSTOS DIRECTOS

Se determinarán los costos de la materia prima, componentes adquiridos y costos de mecanizado de algunas piezas.

8.1.1. Materia prima. Se describe en la Tabla la materia prima utilizada y su costo.

Tabla 15. Costos materia prima

Cantidad de elementos	Elementos	Valor unitario	Valor total [\$]
Lámina de 33x53 cm	Lámina calibre 11 de acero AISI 1020	78.000/m ²	13.642,2
Lámina de 21x36 cm	Lámina calibre 14 de acero AISI 1020	60.000/m ²	4.536
Lámina de 21x36 cm de 6.5x6.5 cm	Lámina calibre 19 de acero AISI 1020	50.000/m ²	211,25
0.0869 Kg	Bloque de acero AISI 1020 de 8x55x25 mm	2.400/kg	208,56

²¹ DÓLAR HOY; Tasa TRM dólar. [Sitio web]. [Consulta: 15 de septiembre 2020]. Disponible en: <https://www.dolarhoy.co/>

7.03 g	Bloque de acero AISI 1020 de 10.6x14x6 mm	2.400/kg	16,87
1.63 Kg	Redondo liso de 56mm de diámetro por 84 mm de largo	2.800/kg	4.564
Total			23.178,88

Fuente: Autores.

8.1.2. Componentes. Se registra en la Tabla los componentes seleccionados y los que entrega el fabricante.

Tabla 16. Costo elementos seleccionados

Cantidad de elementos	Elementos	Valor unitario [COP]	Valor total [COP]
1	Motor-generador MY1016Z3	332286,36 ²²	332286,36
1	Cadena motor - generador	15000	15000
1	Batería 24V 12 AH 7S2P Li-ion 18650 battery pack	183075.44 ²³	183075.44
1	Funda de la batería en tela	30000	30000
3	Integrado LM317	1500	4500

²² Amazon [en Línea]. Tienda online. [Consultado 10 de octubre 2020]. Disponible en <https://www.amazon.com/-/es/350-Watt-my1016z3-Gear-Reducci%C3%B3n-el%C3%A9ctrico-dientes/dp/B06XH56PK7#customerReviews>

²³ Aliexpress. [en Línea]. Tienda online. [Consultado 10 de octubre 2020]. Disponible en: t.ly/hE90

3	Resistencia 0.85 Ω 2 W	1000	3000
1	Diodo rectificador 5 A	1500	1500
4	Relevador SLA- 24VDC-SL-C	8000	32000
1	Manetas de freno con pulsador	42500 ²⁴	42500
1	Interruptor manubrio bicicleta	15000	15000
1	Cableado y montaje del circuito	50000	50000
1	Palanca de bloqueo remota	44696,73 ²⁵	44696,73
2	Corona de agujas ref.: k35x40x27TN	21000	42000
1	Rodamiento de bolas ref.: 623	21800 ²⁶	21800

²⁴Mercado Libre [en Línea]. Tienda online. [Consultado 10 de octubre 2020]. Disponible en https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-585306449-manillar-freno-bicicleta-electrica-_JM?quantity=1&shippingOptionId=undefined²⁴

²⁵Amazon [en Línea]. Tienda online. [Consultado 10 de octubre 2020]. Disponible en <https://www.amazon.com/-/es/Palanca-horquilla-bicicleta-aleaci%C3%B3n-aluminio/dp/B07F386Z3T>

²⁶Lugo Hermanos S.A. Catálogo de Rodamientos – Distribuidores Autorizados SKF. [Sitio web]. Bogotá. [Consultado: 15 de septiembre 2020]. Disponible en <https://www.lugohermanos.com/tienda-online/categoria/marcas/distribuidor-productos-skf/distribuidores-autorizados-skf-rodamientos/>

1	Rodamiento de bolas ref.: 61810	34000	34000
1	Resorte helicoidal a torsión	25000	25000
1	Resorte helicoidal a compresión del retenedor	5000	5000
1	Kit de eje para manzana trasera de bicicleta	15000	15000
Total			882.858,47

Fuente: Autores.

8.1.3. Costos procesos de manufactura. En la tabla se consigna el valor por cada proceso realizado. Los datos fueron obtenidos de talleres de la región.

Tabla 17. Costo procesos

Proceso	Valor [\$]
Trabajo en torno	80000
Trabajo en fresadora	30000
Trabajo con taladro	25000
Soldadura MIG	40000
Corte de lámina	25000
Ensamble y pintura	60000
Total	260000

Fuente: Autores.

8.2. COSTO DIRECTO TOTAL

Con los resultados de los costos de cada tipo de costo, se suman para calcular el costo total del freno regenerativo, y así poder evaluar la relación beneficio-costo.

Tabla 18. Costos directos totales

Costo	Valor [€]
Materia prima	23.178,88
Componentes	882.858,47
Costo proceso de Manufactura	260.000
Total	1166037,4

Fuente: Autores.

8.3. RELACIÓN COSTO BENEFICIO

Para hacer una evaluación del freno regenerativo en cuanto a su desempeño en la regeneración es necesario revisar la energía almacenada en su proceso. Se realiza la evaluación para un trayecto por ciudad de 10 km en terreno plano ya que es el lugar en donde un usuario de bicicleta frena más veces. Debido a los semáforos y en los pares el usuario debe usar los frenos para detener la bicicleta por lo que el freno regenerativo almacenará mayor energía que cuando el usuario utiliza el freno sólo para disminuir la velocidad. Teniendo en cuenta esto se realizaron las siguientes consideraciones para la evaluación.

- Trayecto por la ciudad de 10 km.
- Número entre semáforos y pares de 16.
- Bicicleta y usuario con las características mencionadas en los objetivos.
- Velocidad inicial de frenado de 25 km/h.
- Terreno plano.

La energía disponible para frenado según las consideraciones anteriores es de 2353,40 J. Suponiendo que durante el frenado regenerativo toda la energía que se puede almacenar tanto en el resorte como en la batería se realiza la comparación entre una bicicleta sin frenado regenerativo y una con el sistema de frenado diseñado. Para la velocidad de 25 km/h la distancia de frenado considerada normal sería de 7,95 m, con estas consideraciones la energía almacenada en el resorte es de 1089 J mientras que en la batería es de 510 J, la energía restante se disipará en los frenos convencionales, por lo que el porcentaje de energía regenerada es del 68,37%, y esto despreciando las pérdidas de energía por la fricción entre los componentes del freno regenerativo. La energía regenerada durante todo el trayecto supuesto sería de:

$$E_{regenerada} = 16(2353,40 \text{ J}) * 68,37\% = 25744,31 \text{ J}$$

Como esta energía regenerada servirá para impulsar la bicicleta después del frenado, además de que el sistema de freno eléctrico en la regeneración funciona como motor, y el resorte ofrece un torque que mueve hacia adelante la bicicleta, se comparará el freno regenerativo en cuanto a su costo y beneficio con el de una bicicleta eléctrica. Se realiza la comparación en cuanto al costo de un kit para bicicleta eléctrica que es de \$1.990.000²⁷ con el costo y beneficio del sistema regenerativo que cuesta \$1.166.037,4 resultando una diferencia de \$823.962,6. El precio del sistema regenerativo diseñado es más económico, siendo los dos de la misma potencia.

²⁷ Mercado Libre [en Línea]. Tienda online. [Consultado 10 de octubre 2020]. Disponible en https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-587867488-kit-de-conversion-electrico-para-bicicleta-bateria-litio-_JM#position=12&type=item&tracking_id=f28ea849-632d-45d5-8c17-3330e5bba609

Se calcula la cantidad de energía ahorrada en un año con la frenada regenerativa para un bici usuario que realiza dos trayectos de 10km por día, realizando el cálculo se obtiene:

$$E_{ahorrada} = (25744,31J) * 2 * 365 * \frac{1KJ}{1000J} = 18793,3463 KJ$$

El precio de energía eléctrica para estrato 3 es de \$448,9/kWh²⁸ por lo que se calculara cuanto sería el ahorro de energía en el año, con la bicicleta eléctrica.

$$Precio_{Energia} = 18793,3463 KJ * \frac{1kWh}{3600KJ} * \frac{\$448,9}{1kWh} = \$2343,4258$$

Como se observa el ahorro no es tan significativo, aunque el sistema diseñado sea más económico que el kit eléctrico. En general una bicicleta eléctrica a 25km/h necesita de 5 Wh/km²⁹, por tanto, para la distancia considerada de 10km se obtiene que la regeneración aporta la siguiente autonomía.

$$d_{regeneracion} = (25744,31 J) * \frac{1KJ}{1000J} * \frac{1Wh}{3,6KJ} * \frac{1 km}{5Wh} * \frac{1000 m}{1 km} = 1430,24 m$$

En cuanto al porcentaje del recorrido este aporta un 14,3% más de autonomía, por lo que se observa que un porcentaje de más del 10% es un valor muy considerable en cuanto a su autonomía, para un valor exacto en el cálculo de su viabilidad sería necesario conocer de forma experimental el valor de su eficiencia.

²⁸ ELECTRIFICADORA DE SANTANDER S.A. ESP. Tarifas Residenciales. [Sitio web]. Bucaramanga: ESSA [Consultado 10 de octubre 2020]. Disponible en: https://www.essa.com.co/site/Portals/0/documentos/mi-factura/tarifas/2020/Tarifa_ESSA_202010.pdf

²⁹ LEGENDS EBIKES. ¿Cuántos kilómetros puedo recorrer con una bicicleta eléctrica? [Sitio web]. Madrid. [Consulta: 10 de octubre 2020]. Disponible en: <https://legendebikes.com/consejos-bicis-electricas/autonomia-bicicleta-electrica/>

CONCLUSIONES

- Se encontró posible la construcción de un sistema de frenado regenerativo que permite la transformación de energía potencia y cinética en potencial elástica y eléctrica.
- Se encontró que el freno regenerativo eléctrico es más eficiente para transformar energía potencial y el freno de elemento elástico energía cinética.
- El accionamiento simultáneo de los frenos eléctrico, de elemento elástico y convencional generan un decaimiento casi lineal en la velocidad, un comportamiento ideal para un usuario de bicicleta.
- Al realizar el diseño del mecanismo actuador del freno mecánico se necesitó que este se activará con una sola palanca, tanto para el frenado como para la regeneración para que fuese más compacto y tuviese menor peso, por ello, los principales componentes, además del resorte y el actuador son dos trinquetes que ayudarán a almacenar y entregar la energía del frenado sin necesitar de activar otro actuador.
- Se obtuvo que de entre los elementos elásticos el más conveniente para el trabajo tanto en el frenado como en la regeneración era utilizar un resorte helicoidal a torsión debido a que este necesita un menor volumen y peso para operación de trabajo, además, es fácil su adecuación en la manzana y tiene mayor resistencia en comparación con los demás.
- Se observó que el sistema regenerativo afectará en la bicicleta al dar reversa debido al trinquete encargado de la regeneración. Al dar reversa a la bicicleta el trinquete acopla la rueda con el resorte de forma que se deformará este por lo que será necesario realizar la reversa con la llanta trasera levantada o permitir que el resorte se deforme y guarde energía para ser utilizada cuando se vaya a arrancar la bicicleta.
- El sistema regenerativo diseñado es factible económicamente al compararlo con una bicicleta eléctrica porque su freno regenerativo otorga mayor

autonomía, característica que es muy importante en los vehículos eléctrico, además tiene menor valor.

BIBLIOGRAFÍA

ATHALYE, Ravi G. *Sistema de Frenado Regenerativo Basado en Resorte*. [En línea]. World Intellectual Property Organization WIPO. 31 de agosto 2017. [Consultado 12 de enero 2020]. Disponible en <https://patentimages.storage.googleapis.com/af/40/c1/ba96056a0c15ed/WO2017145174A1.pdf>

BUDYNAS, Richard y NISBETT, Keith. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. 8 ed. México: McGraw-Hill Interamericana. 2008, 1092p. ISBN: 9789701064047.

CHAPMAN, Stephen J. *Maquina eléctricas*. 5 ed. México: McGraw-Hill/Interamericana de editores, 2012. ISBN: 978-607-15-0724-2.

DATTA, Sankha Subhra. *An Innovative Design of Regenerative Brake System for Bicycle*. En: *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* [En línea]. West Bengal, India: IJERT, noviembre, 2013, Vol. 2, Numero 11. 6 p. [Consultado 5 noviembre de 2019]. Disponible en <https://www.ijert.org/research/an-innovative-design-of-regenerative-brake-systemfor-bicycle-IJERTV2IS110370.pdf>
ISSN: 2278-0181

DAVALOS ROMERO, Daniel Alejandro y ROMERO REGINFO, Maria Jose. *Diseño e implementación del freno regenerativo para un vehículo eléctrico*. Trabajo de grado. Ingeniero en electrónica y control. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. 2013.

DUNKLEY, Jason. Int. CL.: B62M 1/10. *Regenerative braking and driving apparatus*. [En Línea]. Fecha de solicitud: 09, septiembre, 2001. Estados unidos, patente de aparato. US6557877 B2. 06, mayo, 2003. [Consultado 15 de octubre de 2020]. Disponible en <https://patents.google.com/patent/US6557877B2/en>

FUNDACION STEYCO. *La Ingeniería de la Bicicleta*. [En Línea]. Madrid. Asociados & Cía. [Consultado 10 de junio 2020]. Disponible en https://www.esteyco.com/wp-content/uploads/2017/02/r2010_IngBici.pdf

HAMROCK, Bernard J., SCHMID, Steven R. y JACOBSON, Bo O. *Fundamentals of Machine Elements*. Third Edition. USA, UK. CRC Press. 2014, 627 p. HIBBELER, R. C. *Ingeniería Mecánica – Estática*. Decimosegunda edición. México. PEARSON EDUCATION. 2010, 659 p.

MOTT, Robert L. *Diseño de elementos de máquinas*. 4 ed. México: Pearson Educación. 2006. ISBN: 9702608120.

NAVARRO, Paco; RUI-WAMBA, Javier; FERNADEZ, Alex; ALTISENCH, Oriol; GARCIA, Cristina; JULIA, Jordi; RUI-WAMBA Miguel. *LA INGENIERIA DE LA BICICLETA*. España: Fundación ESTEYCO, 2010. 284 p. ISBN: 978-84- 933553-5-7.

PEÑA ORDOÑEZ, Carlos. *Estudio de baterías para vehículos eléctricos* [En línea]. Proyecto fin de carrera electrónica industrial. Madrid. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de tecnología electrónica. 2011. 105 p. [Consultado 17 de julio de 2020] Disponible en https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/11805/PFC_Carlos_Pena_Ordenez.pdf%3Bjsessionid=2DC894EBB5D5CE70EA438751452EBE85?sequence=1

RAYAD KUBAISI, M. Sc. *Adaptive Regenerative Braking in Electric Vehicles*. [En línea]. Tesis doctoral. Karlsruhe, Alemania. Instituto de Tecnología de Karlsruhe (KIT). Facultad de ingeniería Mecánica, 2018. 178 p. [Consultado 5 de noviembre de 2019]. Disponible en <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000080341/6717029>

RODRIGUEZ, Miguel. Maquinas de corriente continua. España: Universidad de Cantabria. 2017. P. 72.

SERWAY, Raymond A. y JEWETT, John W. Física para ciencias e ingeniería. Séptima edición. México D.F.: Cengage Learning Editores, S.A. de C.V, 2008, Volumen 1. ISBN-13: 978-607-481-357-9. ISBN-10: 607-481-357-4.

VILLALBA MANOSALVA, José Sebastián. *Sistema de acople para un resorte de torsión que almacena y recupera energía en un VTH*. [en línea]. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bogotá D.C.: Universidad de los Andes. Facultad de ingeniería. Departamento de ingeniería mecánica, 2016. 86p. [Consultado 15 de octubre de 2020]. Disponible en <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/15191/u754602.pdf?sequence=1>.

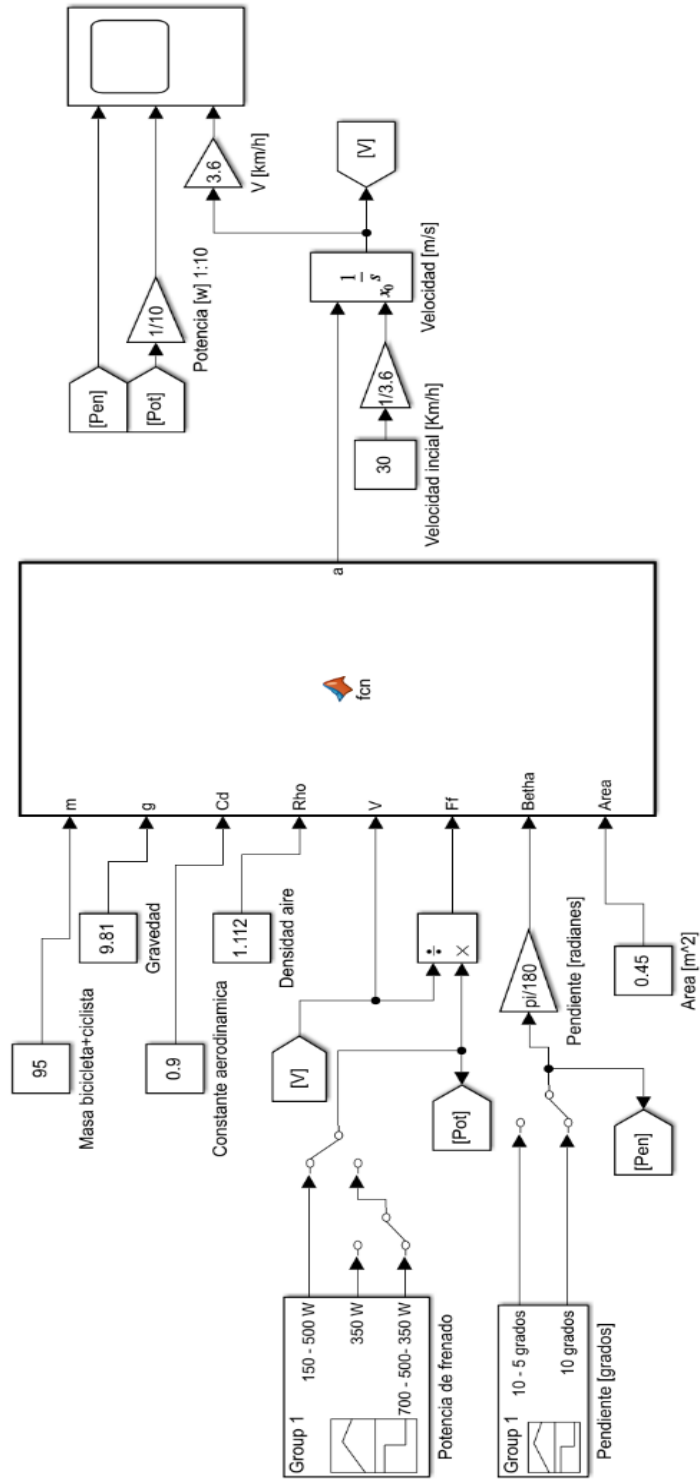
ANEXOS

Anexo A. Datos prueba de frenado.

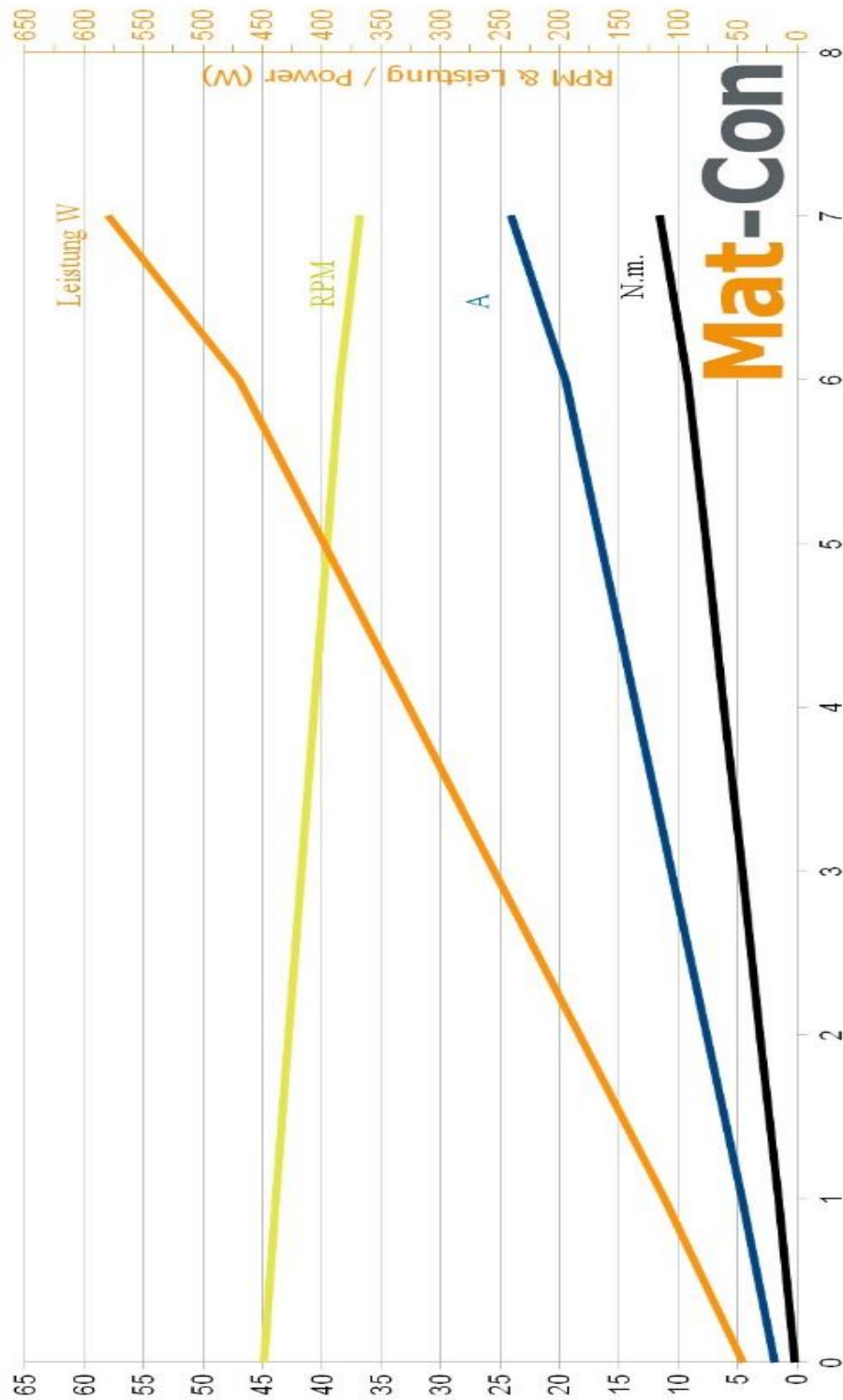
No. Prueba	Vel. Inicial (Km/h)	Vel. Inicial (m/s)	Distancia (m)
1	23,0	6,39	7,2
2	22,7	6,31	7,1
3	22,6	6,28	8,1
4	23,2	6,44	7,5
5	28,2	7,83	8,6
6	27,0	7,50	8,1
7	25,5	7,08	8,2
8	26,1	7,25	8,1
9	22,4	6,22	7,8
10	28,5	7,92	8,2
11	23,5	6,53	7,8
12	28,8	8,00	8,5
13	25,6	7,11	8,0
14	19,4	5,39	6,9
15	24,0	6,67	7,9
16	21,0	5,83	6,5
17	29,8	8,28	8,9
18	25,2	7,00	8,5
19	23,0	6,39	7,5
20	22,6	6,28	8,0
21	21,3	5,92	7,1
22	20,7	5,75	6,9
23	15,2	4,22	5,0

24	12,4	3,44	3,8
25	13,4	3,72	5,0
26	17,8	4,94	6,1
27	19,6	5,44	6,9
28	14,9	4,14	5,4
29	16,1	4,47	7
30	16,0	4,44	6,8

Anexo. B Diagrama de bloque SIMULINK de potencia de frenado



Anexo D. Velocidad, torque, corriente y potencia del motor MY1016Z3



Fuente: <https://www.ebay.es/itm/geared-motor-MY1016Z3-350W-24V-36V-DC-10-8Nm-330rpm-sprocket-1-2-incl-flange-/311997120618>

Anexo E. Datos modelo funcional eléctrico

Circuito son diodo rectificador

Velocidad [Km/h]	Voltaje motor [V]	Corriente batería [A]	Velocidad motor [rpm]	Resistencia batería [ohm]
5.4	10.4	0	1432.391138	infinito
4.8	12.1	0	1273.236567	infinito
5	11.71	0	1326.288091	infinito
5.3	11.5	0	1405.865376	infinito
5.1	11.62	0	1352.813853	infinito
5	10.1	0	1326.288091	infinito
9.5	13.4	0.28	2519.947373	47.85714286
12.6	13.45	0.31	3342.245989	43.38709677
13.7	13.6	0.36	3634.029369	37.77777778
14.6	13.63	0.37	3872.761226	36.83783784
14.8	13.52	0.34	3925.812749	39.76470588
13.8	13.55	0.28	3660.555131	48.39285714
13.1	13.48	0.29	3474.874798	46.48275862
8.6	13.39	0.13	2281.215517	103
12.3	13.46	0.21	3262.668704	64.0952381
7.5	13.1	0.03	1989.432136	436.6666667
6.2	13.1	0.03	1644.597233	436.6666667
6.8	13.1	0.02	1803.751804	655
7.2	13.1	0.05	1909.854851	262
8.3	13.2	0.08	2201.638231	165
9.1	13.3	0.09	2413.844326	147.7777778
9.4	13.3	0.14	2493.421611	95
10.4	13.4	0.16	2758.679229	83.75
11.3	13.5	0.21	2997.411086	64.28571429
11.5	13.5	0.21	3050.462609	64.28571429
12.3	13.6	0.2	3262.668704	68
14.8	13.9	0.35	3925.812749	39.71428571
14.7	13.9	0.34	3899.286988	40.88235294
15.1	13.9	0.39	4005.390035	35.64102564
16.1	14	0.44	4270.647653	31.81818182
17.5	14.1	0.42	4642.008318	33.57142857
18.3	14.2	0.47	4854.214413	30.21276596
17.3	14.2	0.42	4588.956795	33.80952381
16.8	14.1	0.44	4456.327986	32.04545455
17.6	14.2	0.47	4668.53408	30.21276596

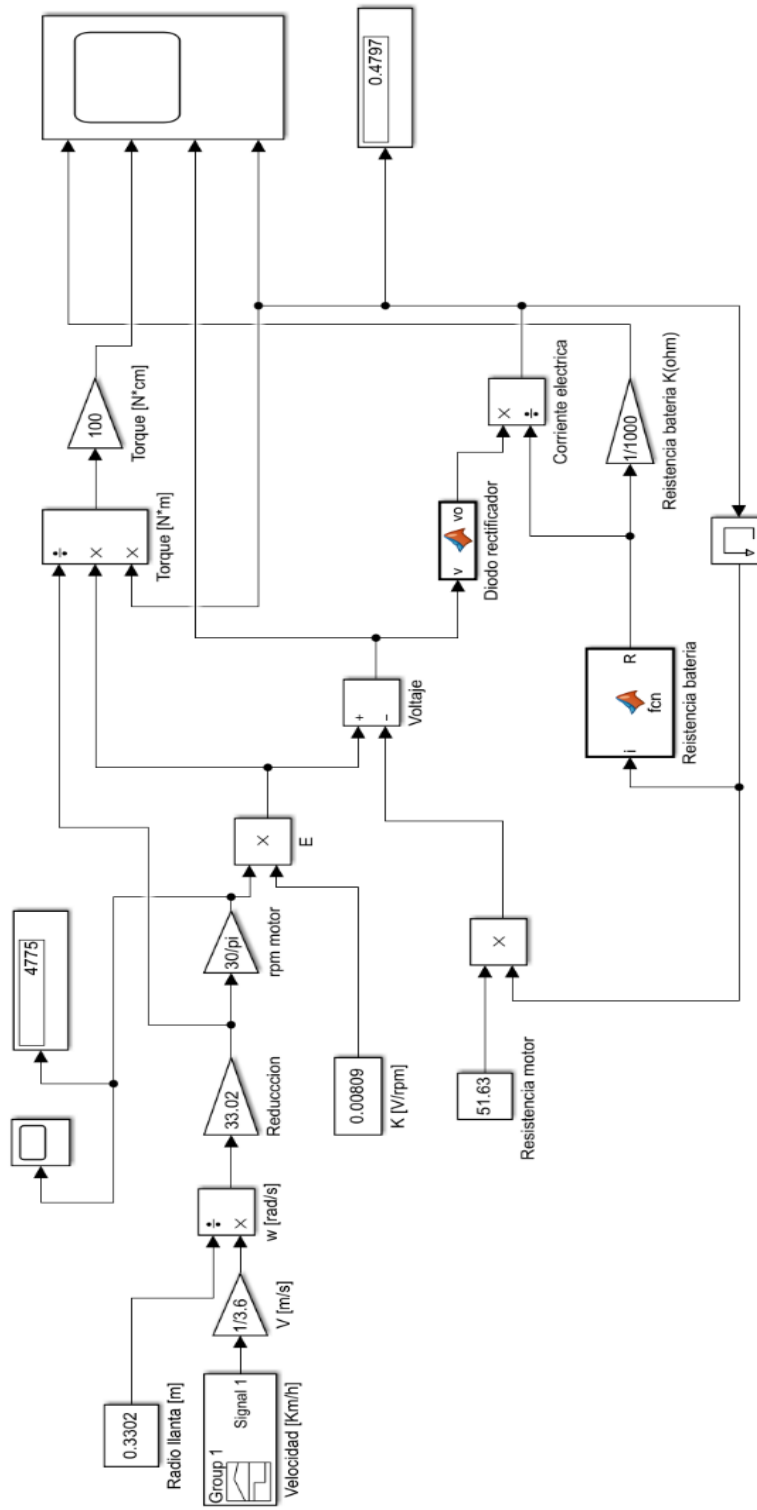
6.3	13.15	0.0328	1671.122995	400.9146341
7.5	13.28	0.0425	1989.432136	312.4705882
7.8	13.32	0.0648	2069.009422	205.5555556
8	13.29	0.0495	2122.060946	268.4848485
9.1	13.7	0.1077	2413.844326	127.2051996
10.1	13.66	0.1447	2679.101944	94.40221147
7.1	13.02	0.07	1883.329089	186
12	13.5	0.25	3183.091418	54

Circuito con limitador de corriente

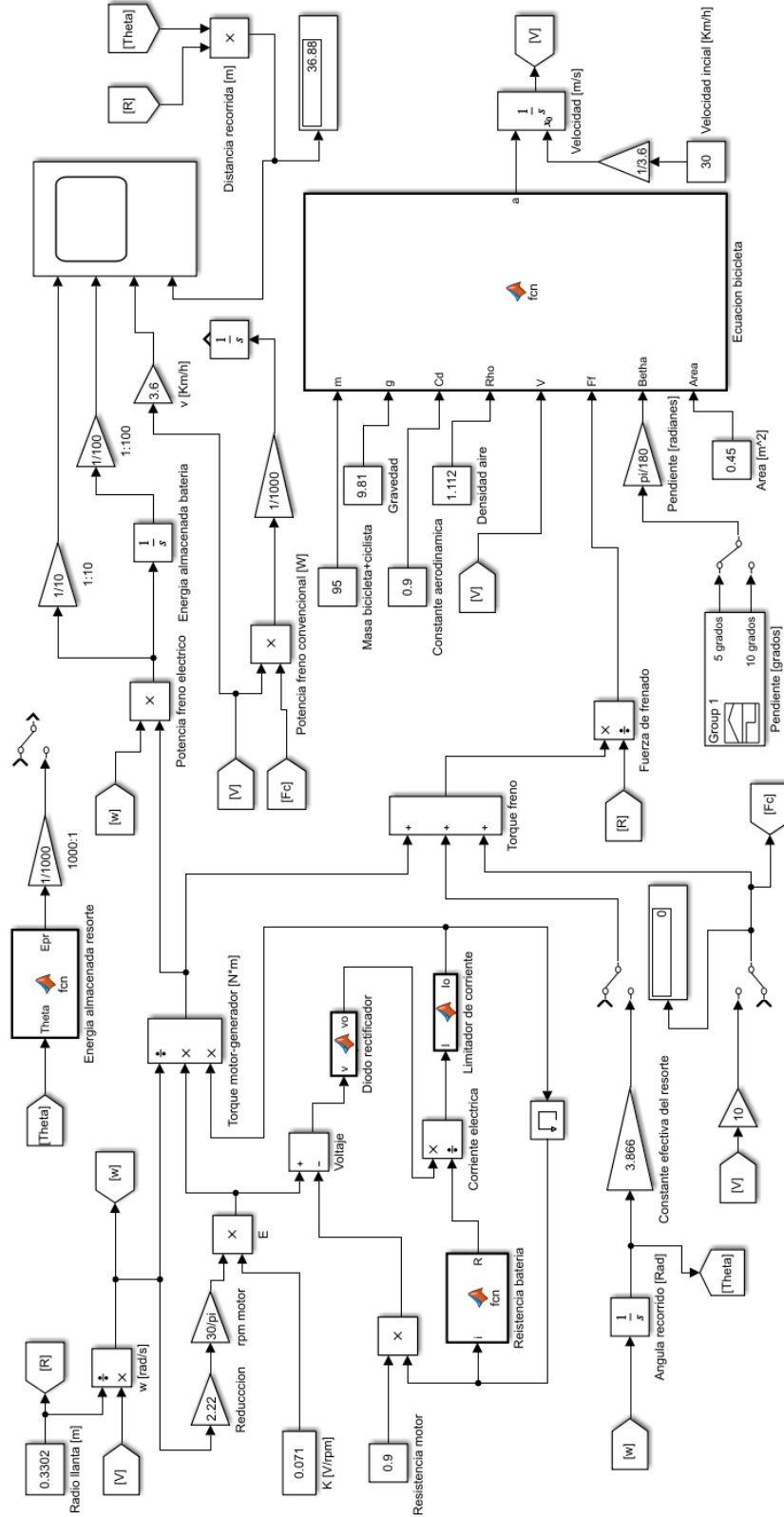
Velocidad [Km/h]	Voltaje motor [V]	Corriente batería [A]	Velocidad motor [rpm]	Resistencia batería [ohm]
10.1	19.95	0.12	2679.101944	112.168845
12.8	25.3	0.12	3395.297513	112.168845
15.1	29.3	0.1	4005.390035	134.063794
15.1	23.2	0.12	4005.390035	112.168845
17.1	29	0.12	4535.905271	112.168845
17.5	27	0.12	4642.008318	112.168845
17	27.3	0.1	4509.379509	134.063794
17.5	27.5	0.1	4642.008318	134.063794
17.2	29.3	0.11	4562.431033	122.131997
17.2	29.2	0.1	4562.431033	134.063794
16.2	25.5	0.12	4297.173415	112.168845
21.7	47.4	0.1	5756.090315	134.063794
26.4	42.7	0.09	7002.80112	148.614893
23.1	43.3	0.09	6127.45098	148.614893
25.1	46.5	0.09	6657.966217	148.614893
26.7	47	0.09	7082.378406	148.614893
26	47.9	0.09	6896.698073	148.614893
6.3	14.2	0.001	1671.122995	12114.6677
5.3	10.4	0	1405.865376	infinito
5.1	11	0	1352.813853	infinito
4.9	10.9	0	1299.762329	infinito
7.7	15.4	0.009	2042.48366	1412.74029
8.1	15.6	0.017	2148.586707	758.459614
8.2	15.6	0.0216	2175.112469	600.089099
10.2	16.8	0.0734	2705.627706	181.409806
10.8	18	0.1086	2864.782277	123.671588
12.3	19.6	0.1257	3262.668704	107.19181

12.9	23.5	0.1255	3421.823275	107.358873
15.3	26	0.1239	4058.441558	108.714574
16.5	30.4	0.0931	4376.7507	143.773458
17.9	32.9	0.0909	4748.111366	147.175672
18.3	33.4	0.0988	4854.214413	135.656065
20.2	35.9	0.093	5358.203888	143.92465
24.5	48.3	0.0957	6498.811646	139.952168
26	49.8	0.096	6896.698073	139.524425
27.8	53.1	0.0963	7374.161786	139.099317
33.8	66.1	0.0945	8965.707495	141.689999

Anexo F. Diagrama de bloques SIMULINK de modelo funcional.



Anexo G. Modelo del sistema en conjunto Simulink.



Anexo H. Planos sistema de frenado regenerativo



Universidad
Industrial de
Santander



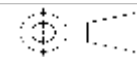
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10/10/20

ESCALA: 1:8

UNIDADES: mm

A4



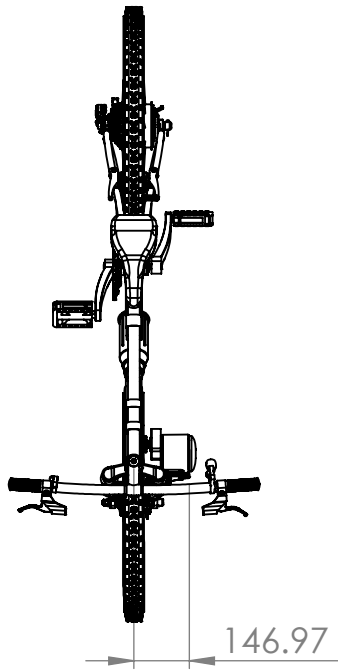
TITULO: VISTA ISOMETRICA SISTEMA DE
FRENADO REGENERATIVO

AUTORES: IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA

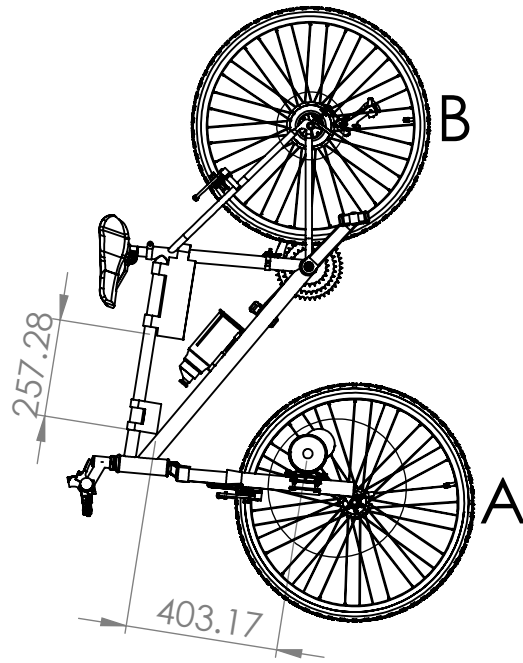
REVISIA: ING. RICARDO JAIMES

PLANO 1

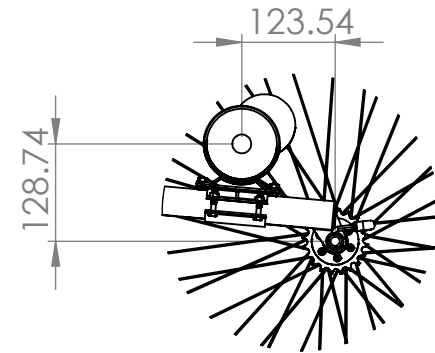
HOJA 1/49



VISTA SUPERIOR

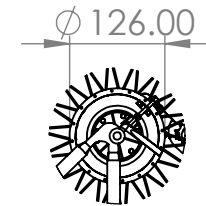


VISTA LATERAL DERECHA



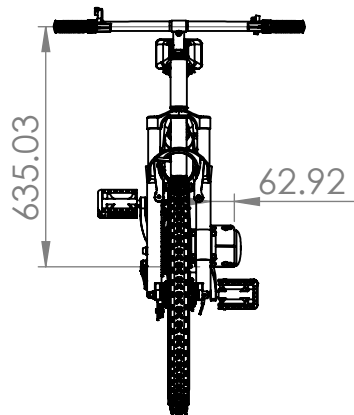
DETALLE A

ESCALA 1 : 10



DETALLE B

ESCALA 1 : 10



VISTA FRONTAL



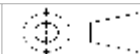
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10/10/20

ESCALA: 1:20

UNIDADES: mm

A4



TITULO: VISTAS PRINCIPALES SISTEMA DE FRENADO REGENERATIVO

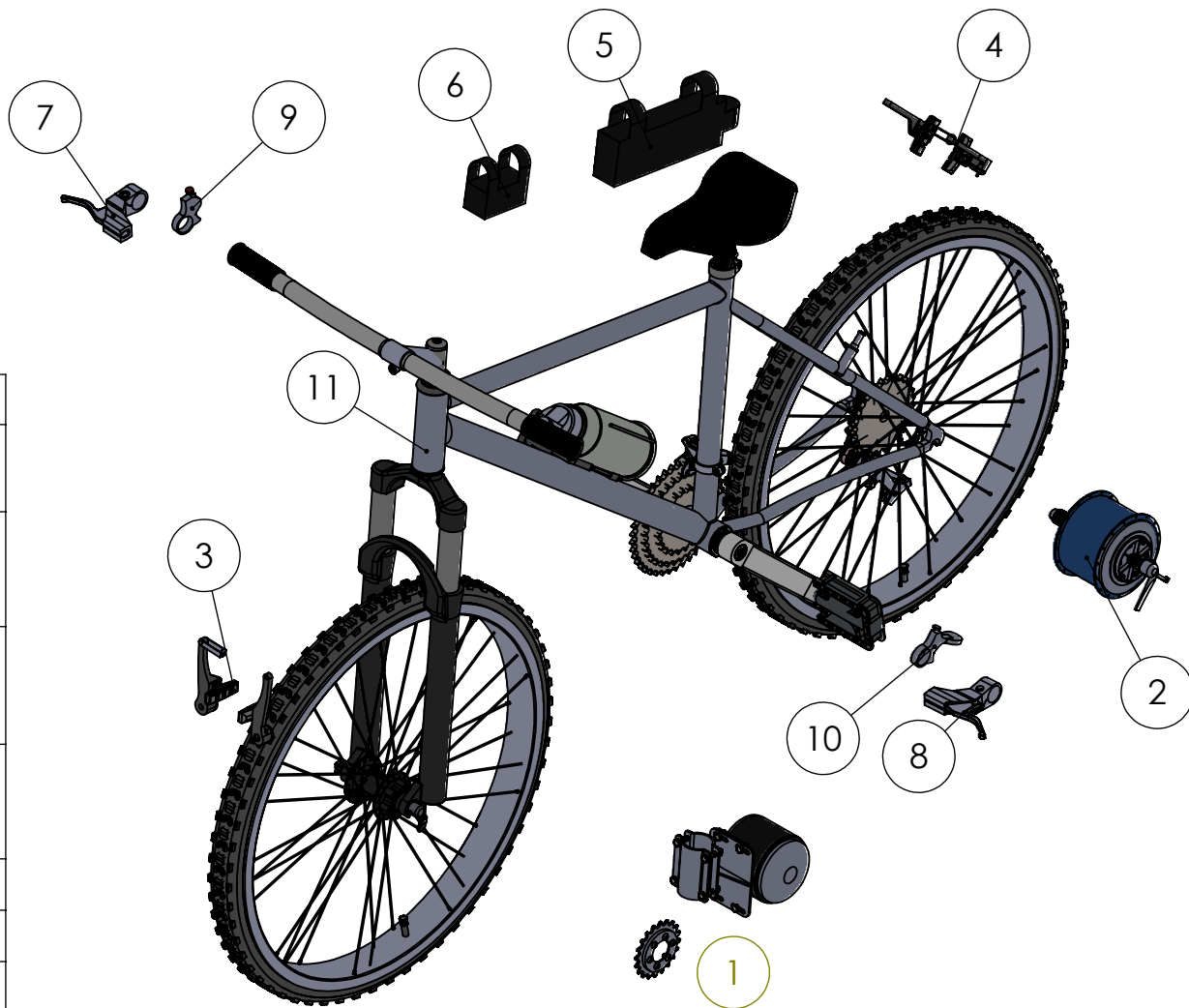
AUTORES: IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA

REVISA: ING. RICARDO JAIMES

PLANO 1.A

HOJA 2/49

Nº	NOMBRE	CANT.	OBSERVACIONES
1	SUBSISTEMA FRENO ELÉCTRICO	1	-
2	SUBSISTEMA FRENO ELEMENTOS ELASTICOS	1	-
3	FRENO CONVENCIONAL DELANTERO	1	TIPO V-BRAKE
4	FRENO CONVENCIONAL TRASERO	1	TIPO V-BRAKE
5	BATERÍA	1	24 V 14 AH
6	CONTROLADOR	1	-
7	MANETA DE FRENO DERECHA	1	CON PULSADOR
8	MANETA DE FRENO IZQUIERDA	1	CON PULSADOR
9	INTERRUPTOR MOTOR	1	-
10	PALANCA DE BLOQUEO REMOTO	1	-
11	BICICLETA	1	RIN 26"



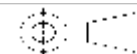
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10/10/20

ESCALA: 1:10

UNIDADES: mm

A4



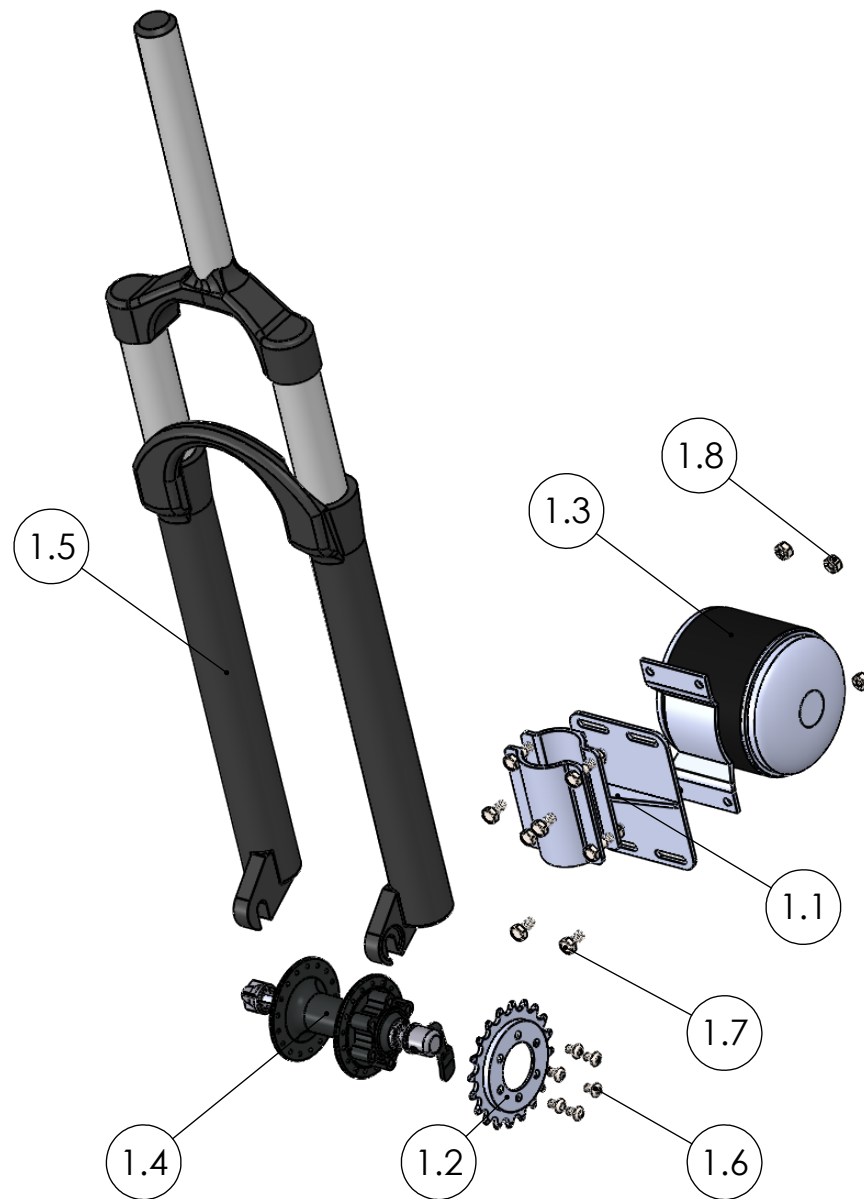
TITULO: VISTA EXPLOSIONADA SISTEMA DE FRENADO REGENERATIVO

AUTORES: IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA

REVISÁ: ING. RICARDO JAIMES

PLANO 1.B.

HOJA 3/49



Nº	NOMBRE	CANT.	OBSERVACIONES
1.1	ACOPLE MOTOR - GENERADOR	1	ACERO AISI 1020
1.2	PIÑÓN	1	ACERO AISI 1020
1.3	MOTOR GENERADOR	1	MY1016Z3 24V
1.4	MANZANA DELANTERA	1	CON ACOPLE PARA DISCO
1.5	HORQUILLA	1	RIN 26"
1.6	TORNILLO PIÑÓN	1	ANSI METRICO B.18.3.4 M5X0.8X8
1.7	TORNILLO SOPORTE - MOTOR	4	ANSI METRICO HEXAGONAL M6X10X12
1.8	ROSCA SOPORTE - MOTOR	4	ANSI METRICO HEXAGONAL TIPO 1 M6X1
1.9	CADENA PIÑON - MOTOR - GENERADOR	1	PASO 1/2" ISO 41 (ELEMENTO NO MOSTRADO)



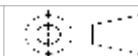
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10/10/20

ESCALA: 1:5

UNIDADES: mm

A4



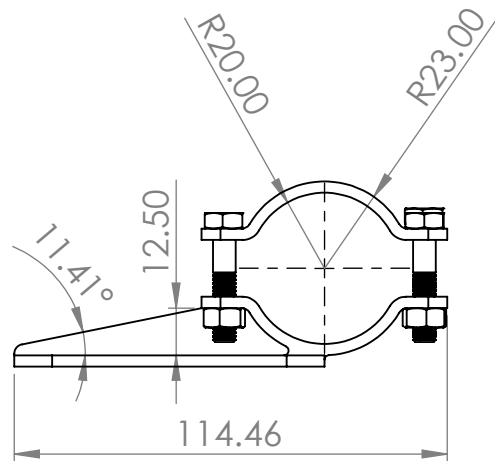
TITULO:
VISTA EXPLOSIONADA
SUBSISTEMA FRENO ELÉCTRICO

AUTORES:
IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA

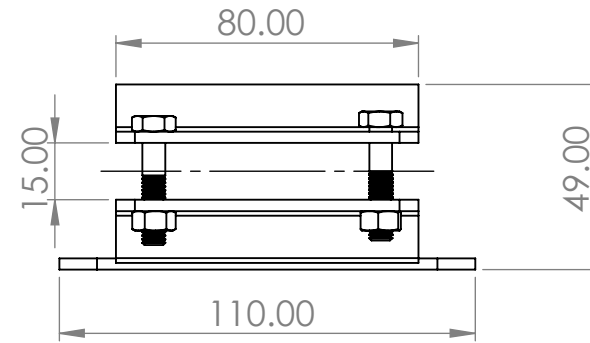
REVISÁ:
ING. RICARDO JAIMES

PLANO 1.1.B

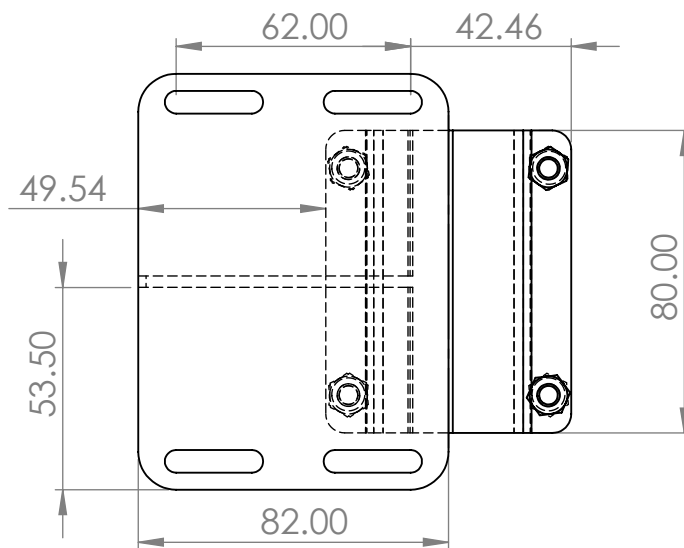
HOJA 4/49



VISTA SUPERIOR

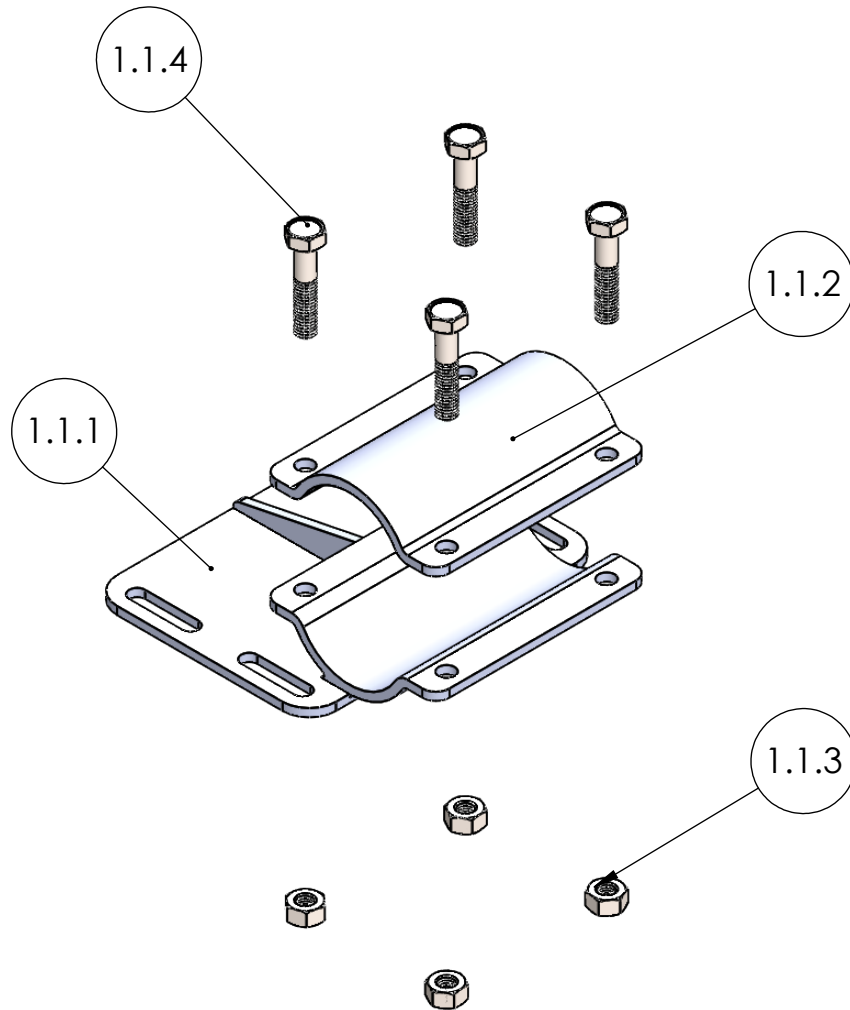


VISTA LATERAL DERECHA



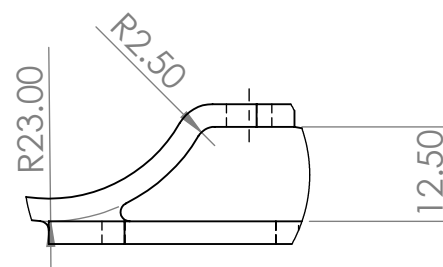
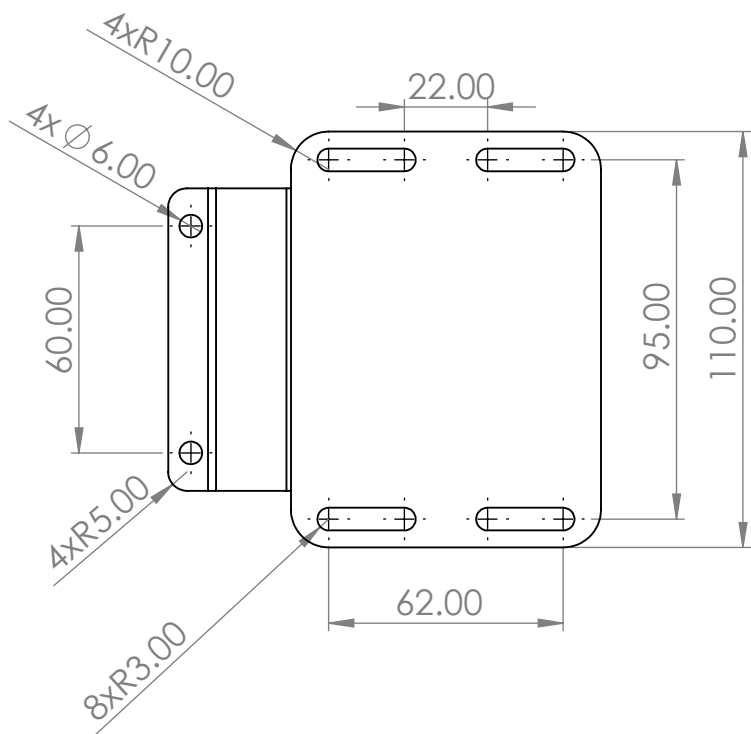
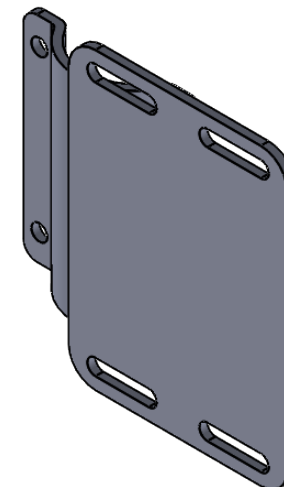
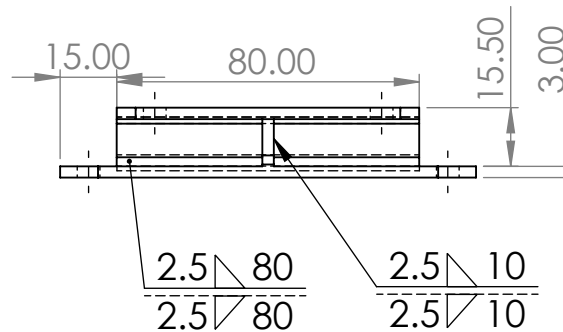
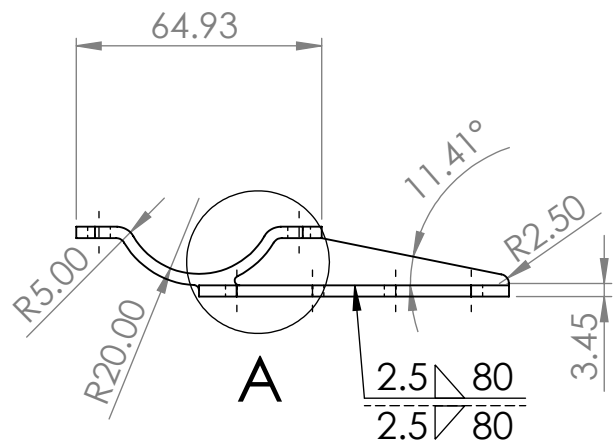
VISTA FRONTAL

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		
FECHA: 10/10/20		TITULO: VISTAS PRINCIPALES ACOPLE MOTOR - GENERADOR		
ESCALA: 1:2		AUTORES: IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA		
UNIDADES: mm		REVISIA: ING. RICARDO JAIMES		
A4		PLANO 1.1.1.A	HOJA 5/49	



N°	NOMBRE	CANT.	OBSERVACIONES
1.1.1	SOPORTE MOTOR - GENERADOR	1	ACERO AISI 1020
1.1.2	AGARRE HORQUILLA	1	ACERO AISI 1020
1.1.3	ROSCA AGARRE HORQUILLA	4	ANSI METRICO HEXAGONAL TIPO 1 M6X1
1.1.4	TORNILLO AGARRE HORQUILLA	4	ANSI METRICO HEXAGONAL M6X1X30

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10/10/20		TITULO: VISTA EXPLOSIONADA ACOPLER MOTOR - GENERADOR	
ESCALA: 1:2			
UNIDADES: mm		AUTORES: IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA	
A4		REVISA: ING. RICARDO JAIMES	PLANO 1.1.1.B HOJA 6/49



DETALLE A

ESCALA 1 : 1



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10/10/20

TITULO:

PIEZA 1.1.1. SOPORTE MOTOR - GENERADOR

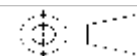
ESCALA: 1:2

UNIDADES: mm

AUTORES:

IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA

A4

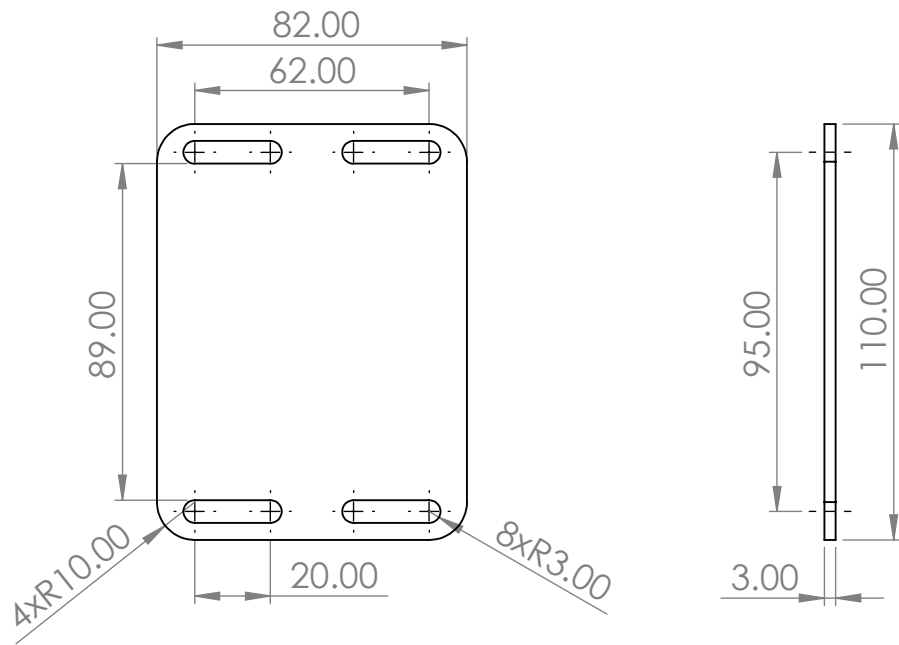


REVISÁ:

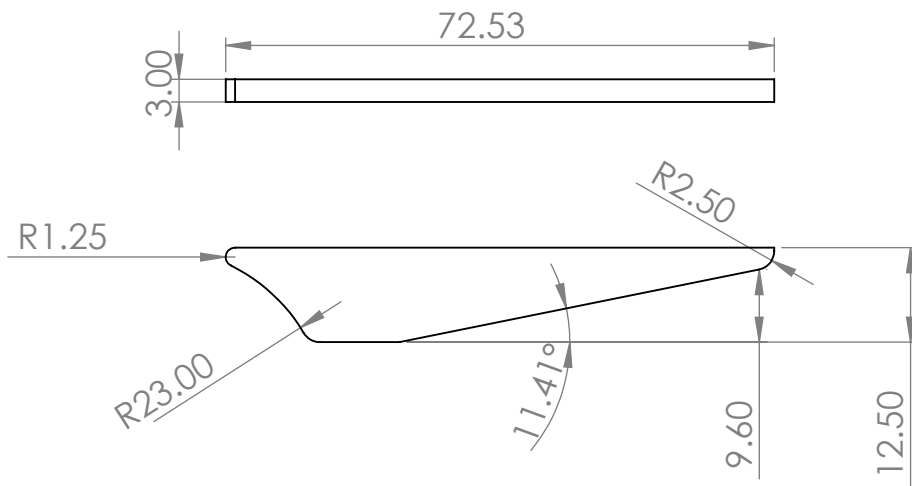
ING. RICARDO JAIMES

PLANO 1.1.1.1

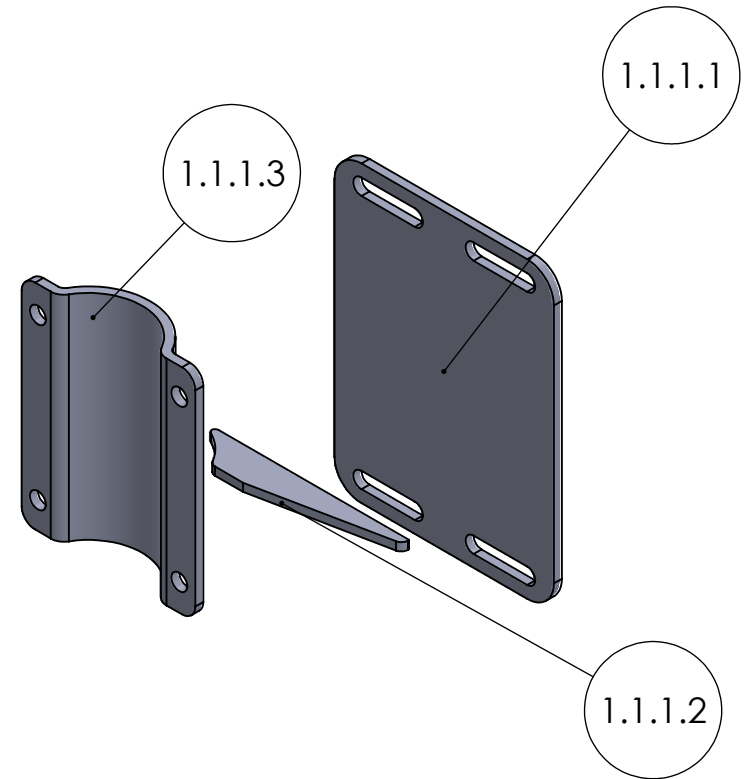
HOJA 7/49



PIEZA 1.1.1.1

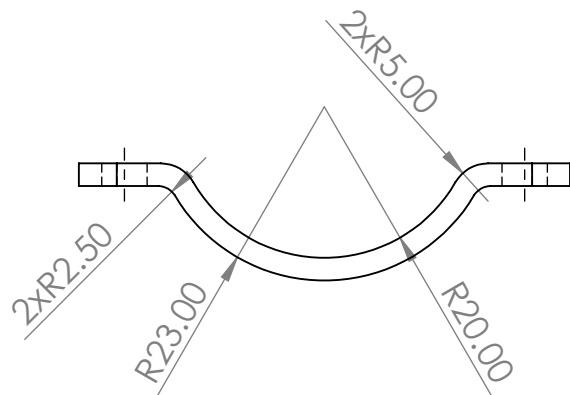
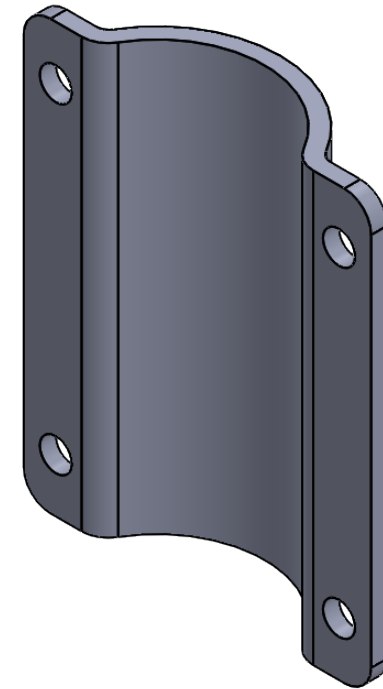
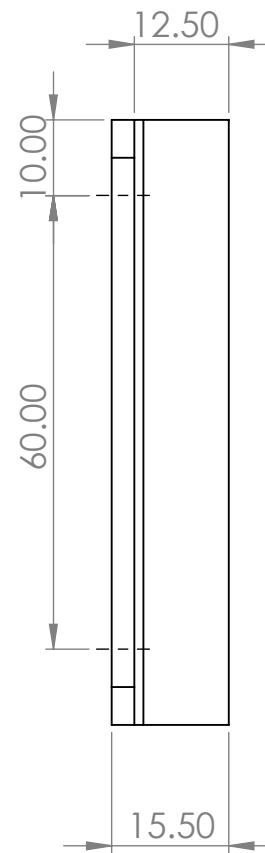
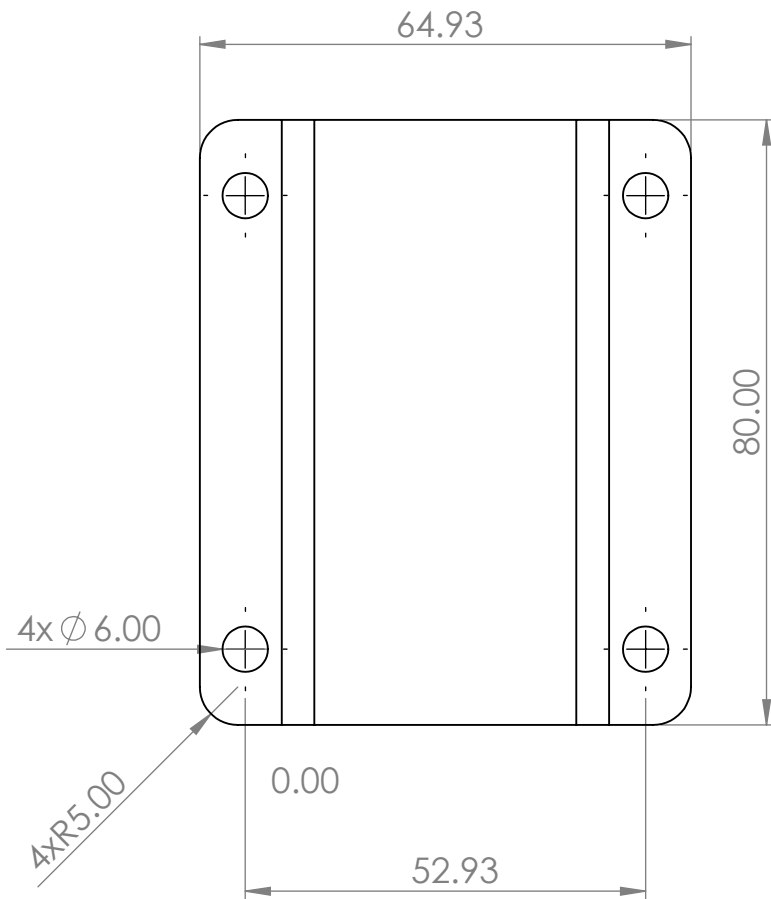


PIEZA 1.1.1.2 ESCALA 1:1



NOTA: LAS MEDIDAS DE LA PIEZA 1.1.1.3. SON EQUIVALENTES A LAS DE LA PIEZA 1.1.2 LA CUAL SE MUESTRA EN LA SIGUIENTE HOJA

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		
FECHA: 10/10/20		TITULO: PIEZA 1.1.1.1. SOPORTE MOTOR - GENERADOR		
ESCALA: 1:2		AUTORES: IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA		
UNIDADES: mm		REVISA: ING. RICARDO JAIMES		
A4		PLANO 1.1.1.1.C	HOJA 8/49	



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10/10/20

TITULO:

PIEZA 1.1.2. AGARRE HORQUILLA

ESCALA: 1:1

AUTORES:

IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA

UNIDADES: mm

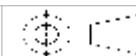
REVISÁ:

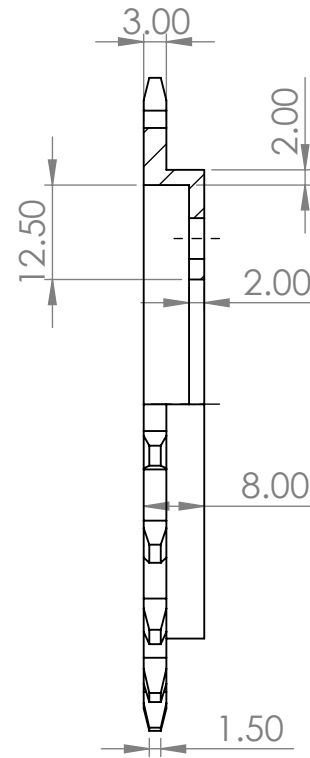
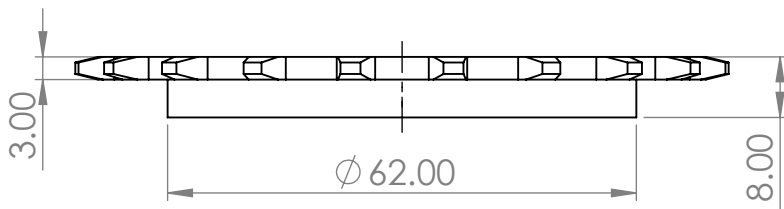
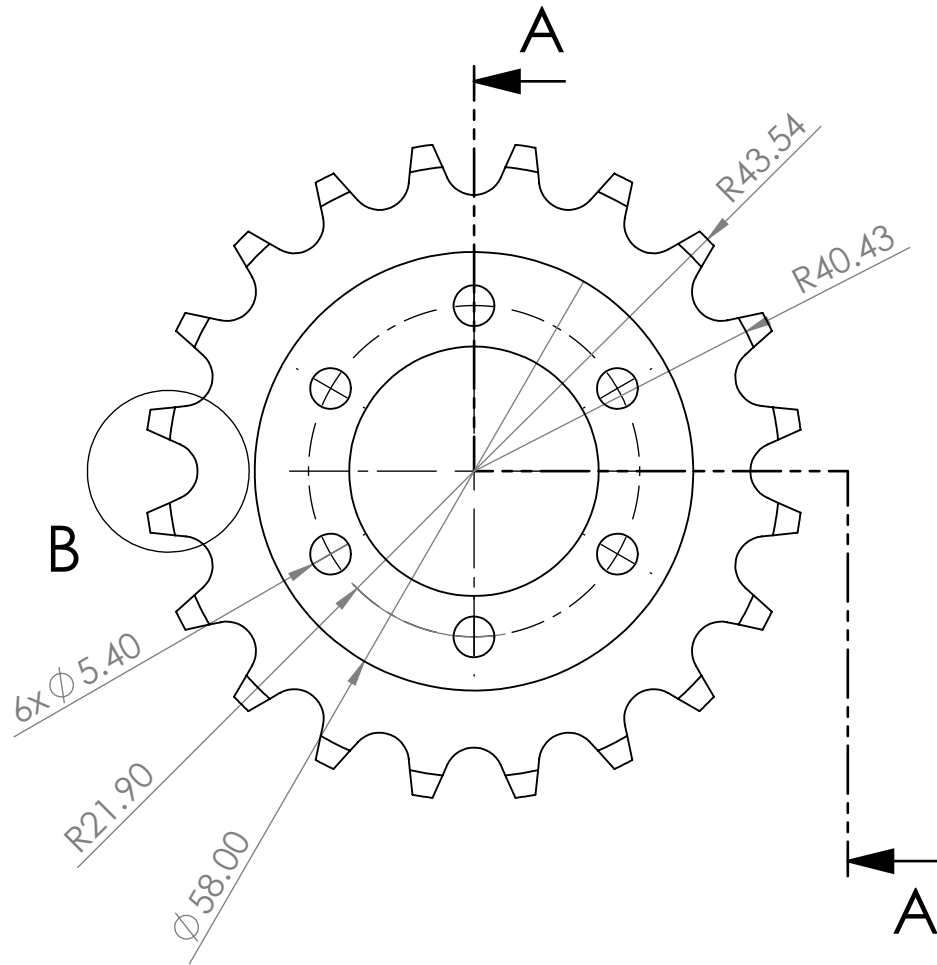
ING. RICARDO JAIMES

PLANO 1.1.1.2

HOJA 9/49

A4

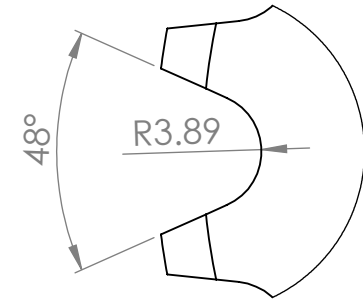




SECCIÓN A-A
ESCALA 1:1

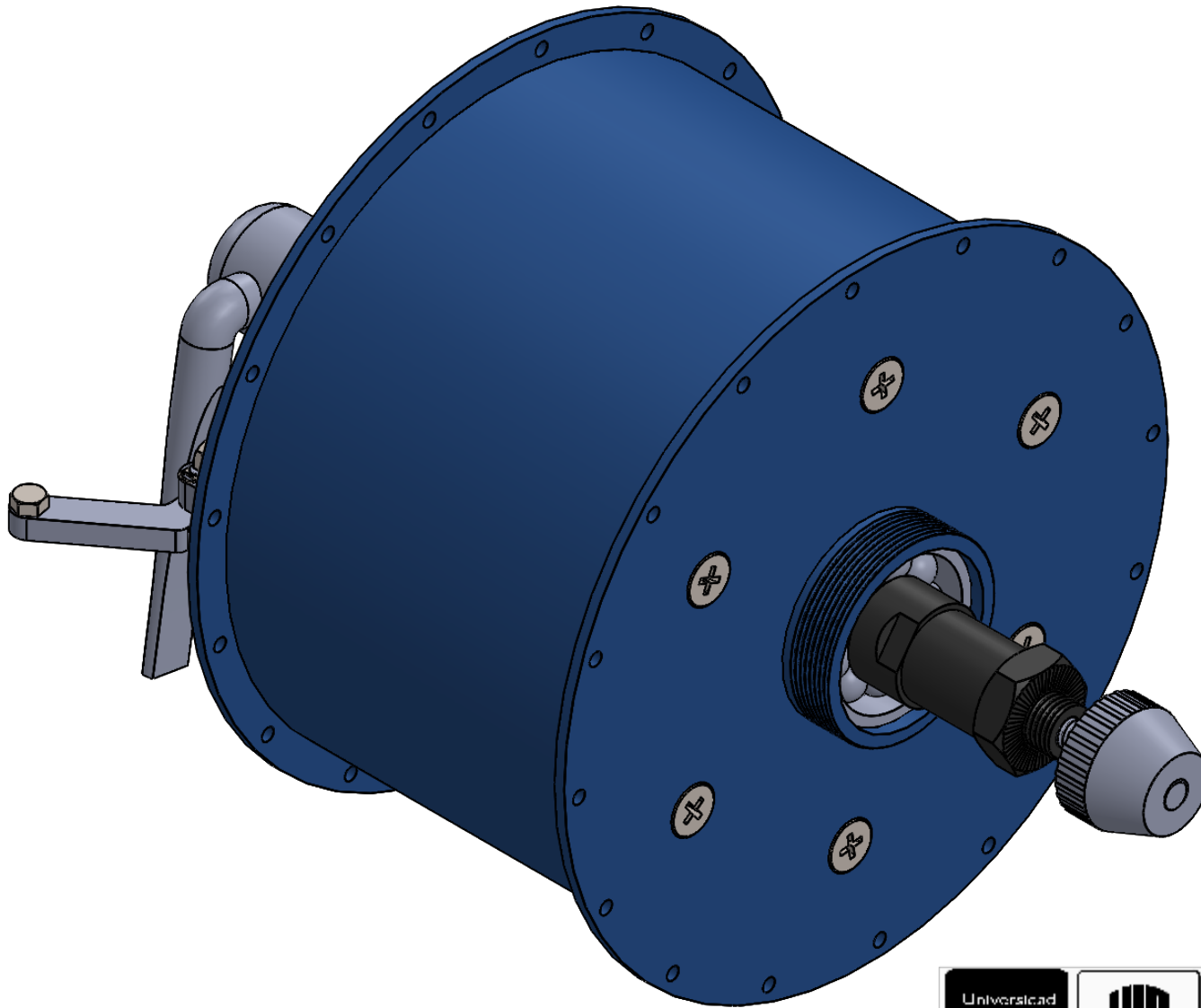


ESCALA 1:2

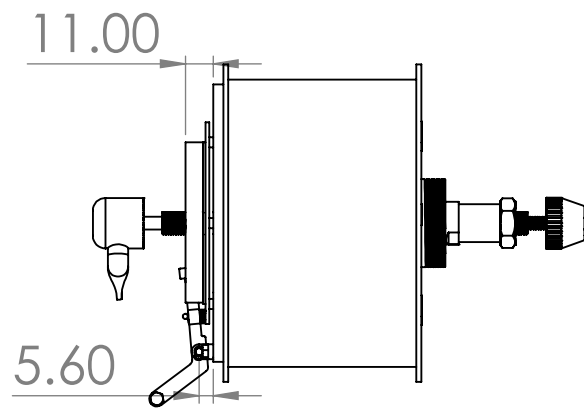


DETALLE B
ESCALA 2:1

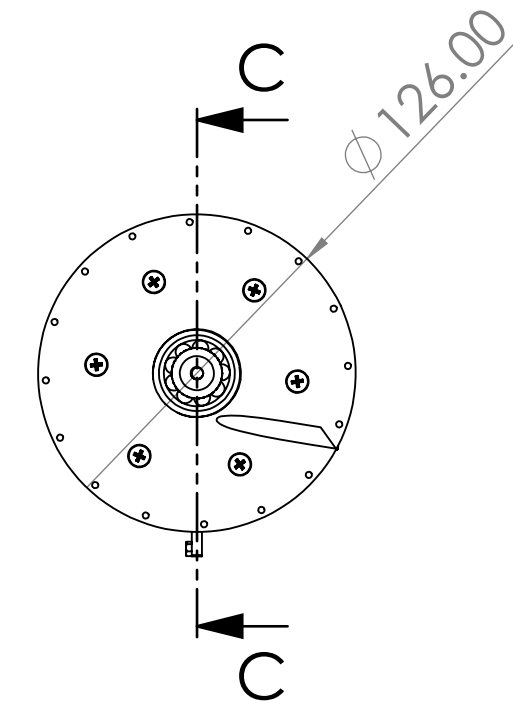
 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		
FECHA: 10/10/20 ESCALA: 1:1 UNIDADES: mm		TITULO: PIEZA 1.2. PIÑÓN		
A4		AUTORES: IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA		
		REVISÁ: ING. RICARDO JAIMES	PLANO 1.1.2	HOJA 10/49



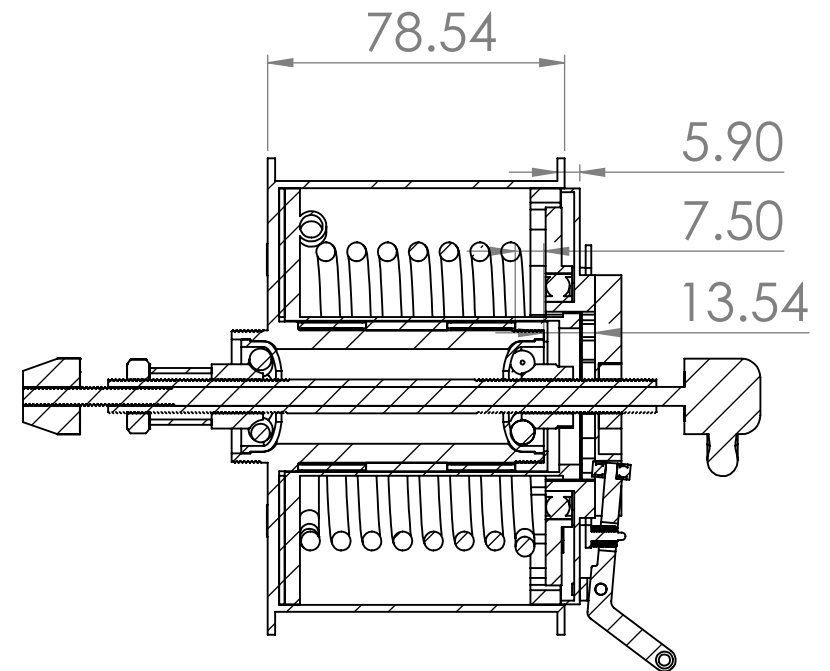
 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		
FECHA: 10/10/20		TITULO:		
ESCALA: 1:1		VISTA ISOMETRICA SUBSISTEMA FRENO DE ELEMENTOS ELASTICOS		
UNIDADES: mm		AUTORES: IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA		
A4		REVISA: ING. RICARDO JAIMES	PLANO 1.2	HOJA 11/49



VISTA SUPERIOR

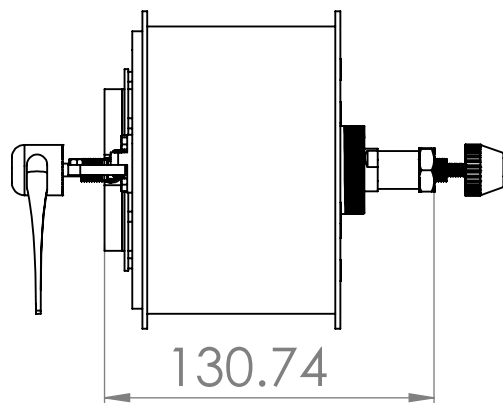


VISTA LATERAL DERECHA



SECCIÓN C-C

ESCALA 1 : 2



VISTA FRONTAL



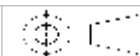
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10/10/20

ESCALA: 1:3

UNIDADES: mm

A4



TITULO:

VISTAS PRINCIPALES SUBSISTEMA
FRENO ELEMENTOS ELASTICOS

AUTORES:

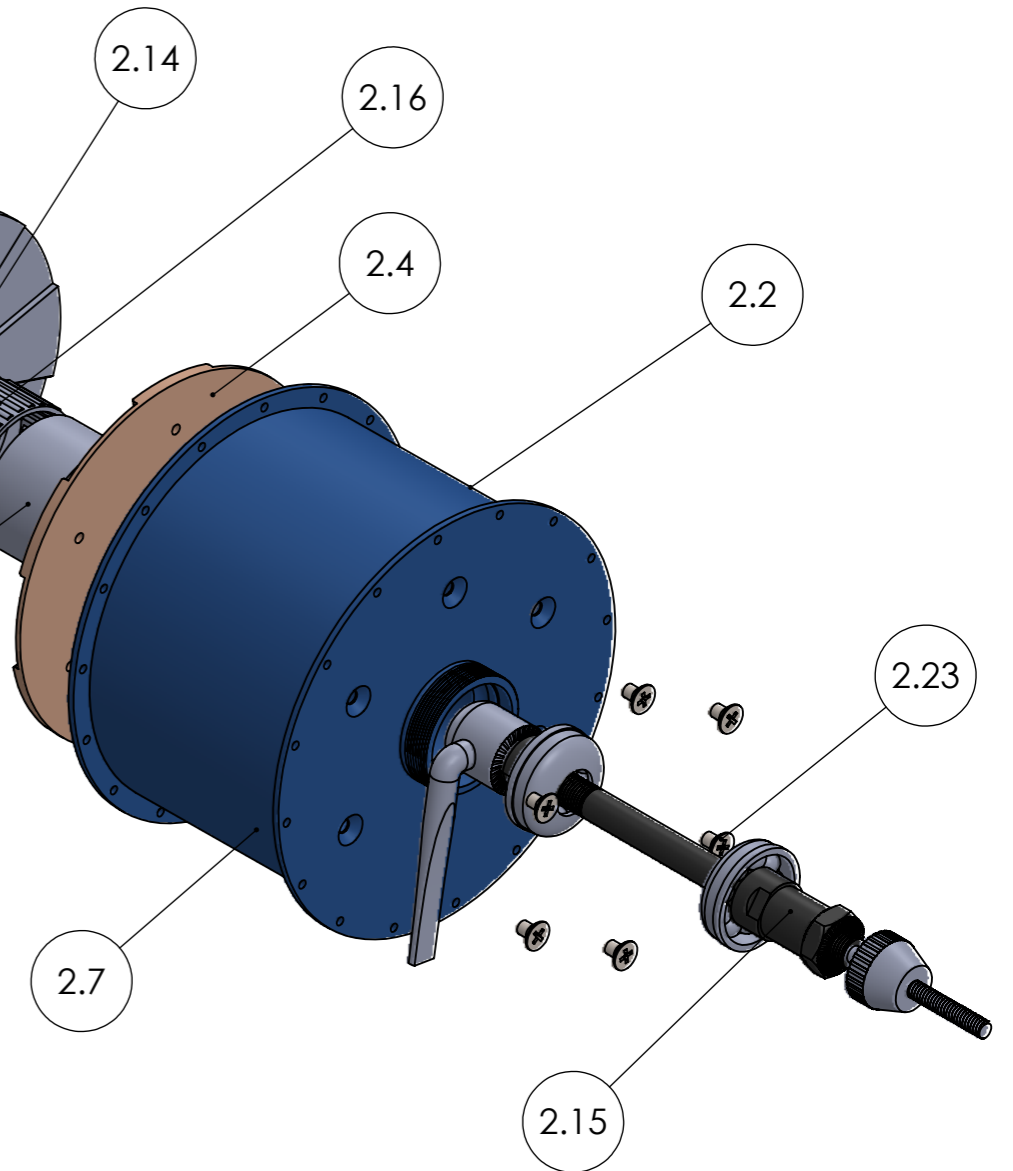
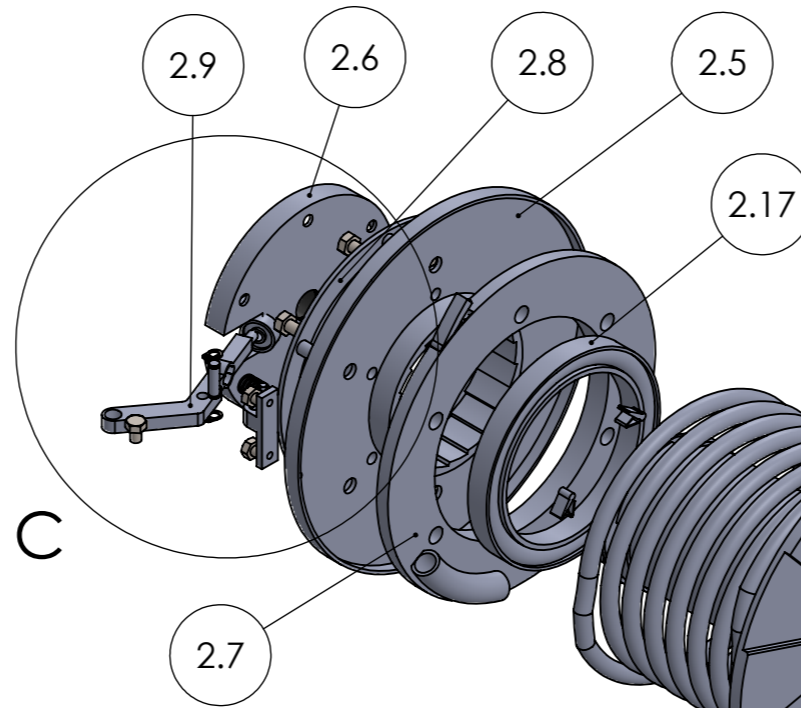
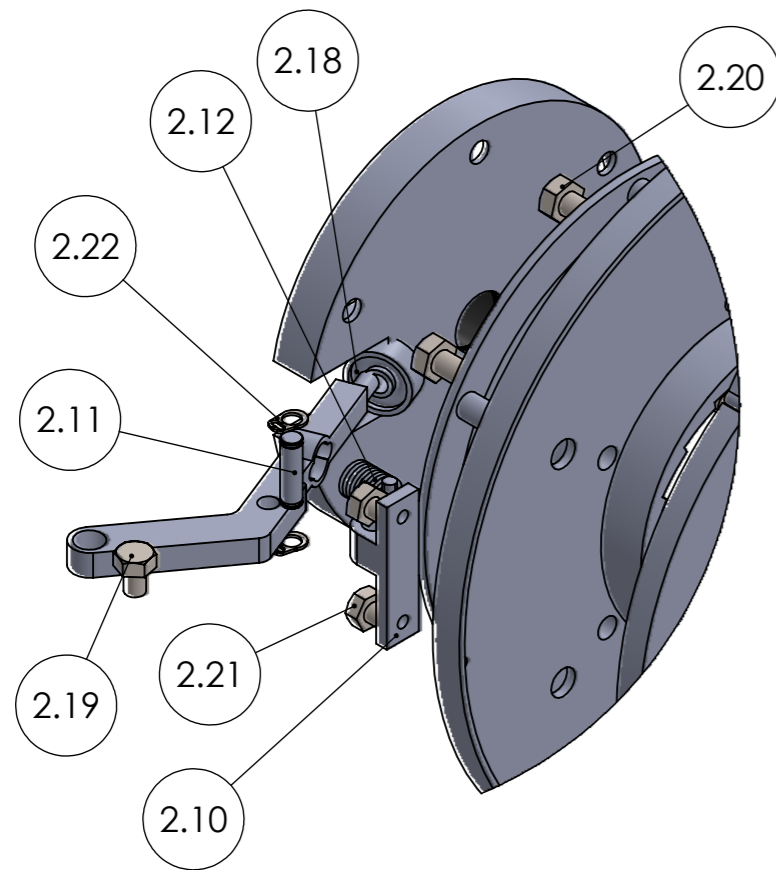
IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA

REVISÁ:

ING. RICARDO JAIMES

PLANO 1.2.A

HOJA 12/49



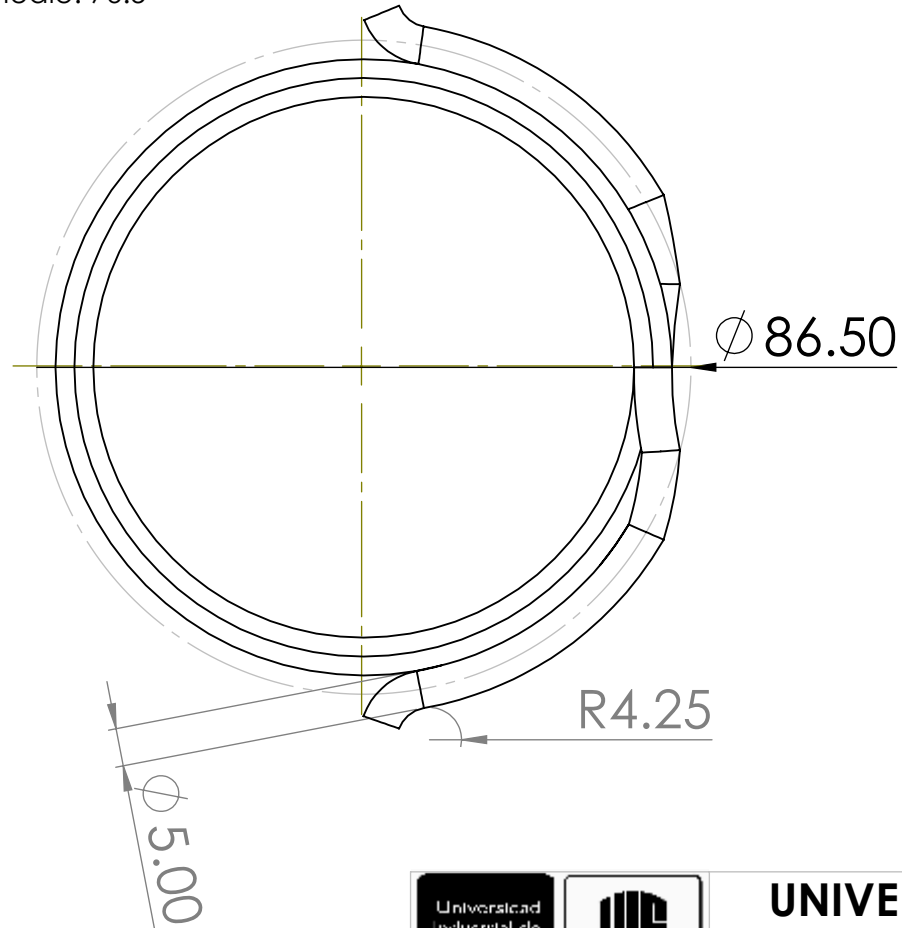
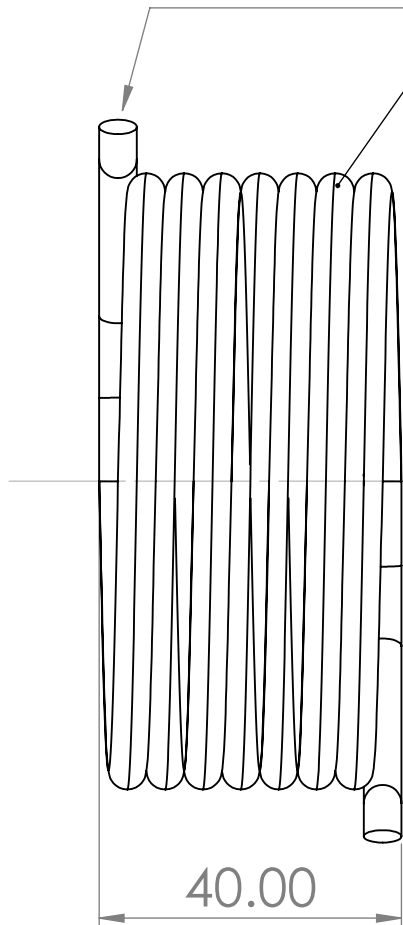
DETALLE C
ESCALA 1 : 1

Nº	NOMBRE	CANT.	OBSERVACIONES	Nº	NOMBRE	CANT.	OBSERVACIONES
2.1	RESORTE	1	ACERO AISI 4340 TEMPLADO	2.13	FIJADOR RODMIENTO INTERNO	1	ACERO AISI 1020
2.2	MANZANA	1	ACERO AISI 1020	2.14	FIJADOR RODAMIENTO ROSCA	1	ACERO AISI 1020
2.3	EJE DEL RESORTE (MANDRIL)	1	ACERO AISI 1020	2.15	RODAMIENTO MANDRIL	2	CORONA DE AGUJAS SKF K35x40x27 TN
2.4	ACOPLE MANDRIL - MANZANA	1	BRONCE	2.16	RODAMIENTO PLATO DEL RESORTE	1	RODAMIENTO DE BOLAS SKF REF: 61810
2.5	PLATO FIJO	1	ACERO AISI 1020	2.17	RODAMIENTO DE EMPUJE	1	RODAMIENTO DE BOLAS SKF REF: 623
2.6	PLATO SUJETADOR	1	ACERO AISI 1020	2.18	TORNILLO DE LA GUALLA	1	ANSI HEXAGONAL M3x0.5x4
2.7	PLATO RESORTE - TRINQUETE	1	ACERO AISI 1020	2.19	TORNILLO PLATO FIJADOR	6	ANSI HEXAGONAL M3.5x0.6x6
2.8	RETENEDOR	1	ACERO AISI 1020	2.20	TORNILLO SOPORTE PALANCA	2	ANSI HEXAGONAL M2x0.4x4
2.9	PALANCA FRENO	1	ACERO AISI 1020	2.22	ANILLO RETENCION	2	DIN 471 - 3x0.4
2.10	SOPORTE PALANCA	1	ACERO AISI 1020	2.23	TORNILLO ACOPLA - MANZANA	6	ANSI AVELLANADO M4x0.7x6
2.11	EJE ACTUADOR	1	ACERO AISI 1020				
2.12	RESORTE EMPUJE	1	ACERO AISI 1020				

 	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		
FECHA: 10/10/20	TITULO: VISTA EXPLOSIONADA SUBSISTEMA FRENO ELEMENTOS ELASTICOS		
ESCALA: 1:2	AUTORES: IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA		
UNIDADES: mm	REVISIA: ING. RICARDO JAIMES		
A3		PLANO 1.2.B	HOJA 13/49

R VERDADERO 2.50

7 Espiras
Diámetro medio: 76.5



ESCALA 1:2



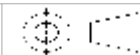
**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE
SANTANDER**

FECHA: 10/10/20

ESCALA: 1:1

UNIDADES: mm

A4



TITULO:

PIEZA 2.1. RESORTE HELICOIDAL

AUTORES:

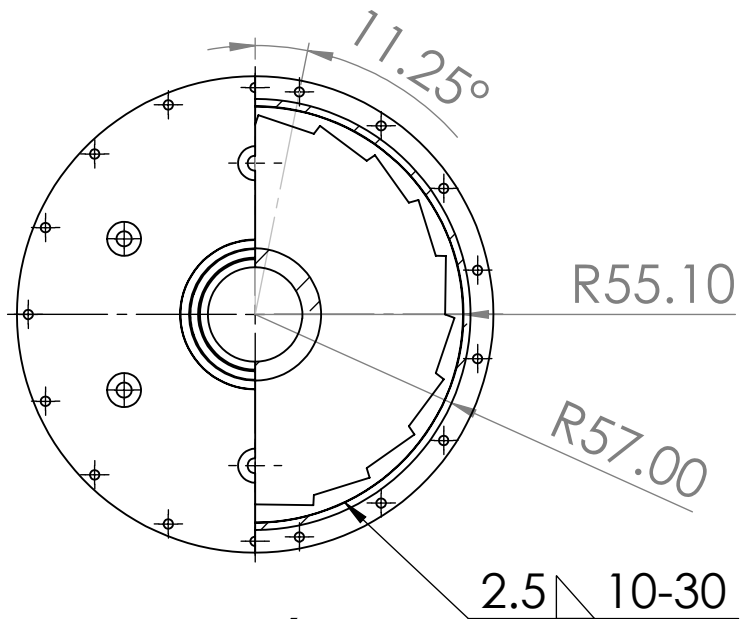
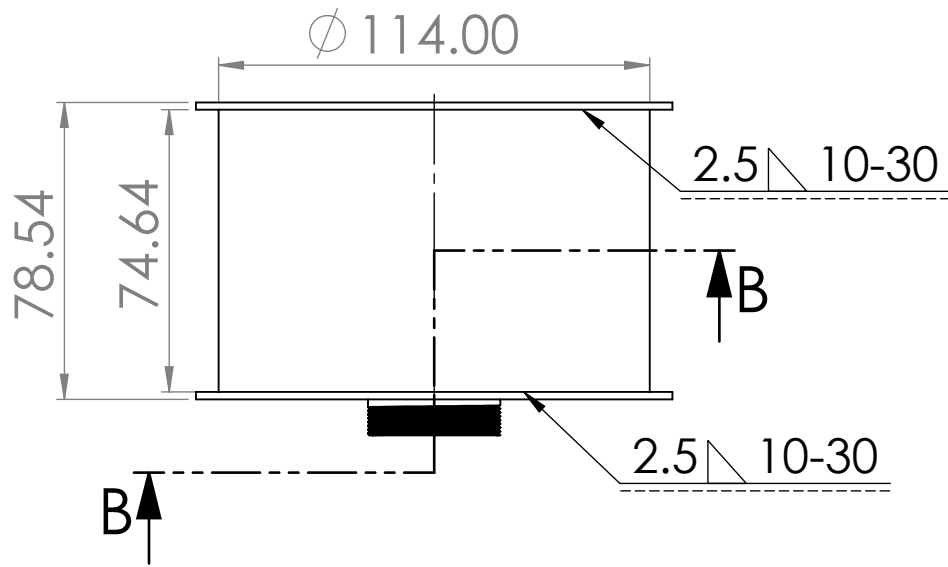
IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA

REVISÁ:

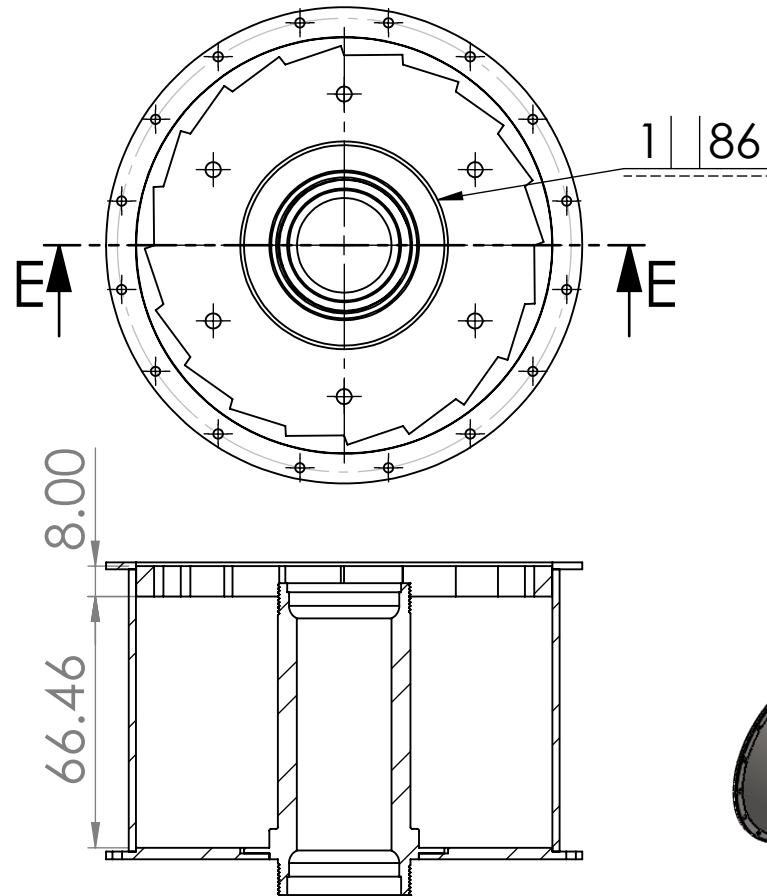
ING. RICARDO JAIMES

PLANO 1.2.1

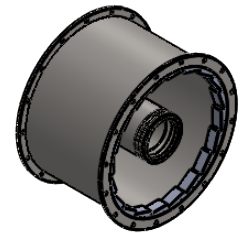
HOJA 14/49



SECCIÓN B-B
ESCALA 1 : 2

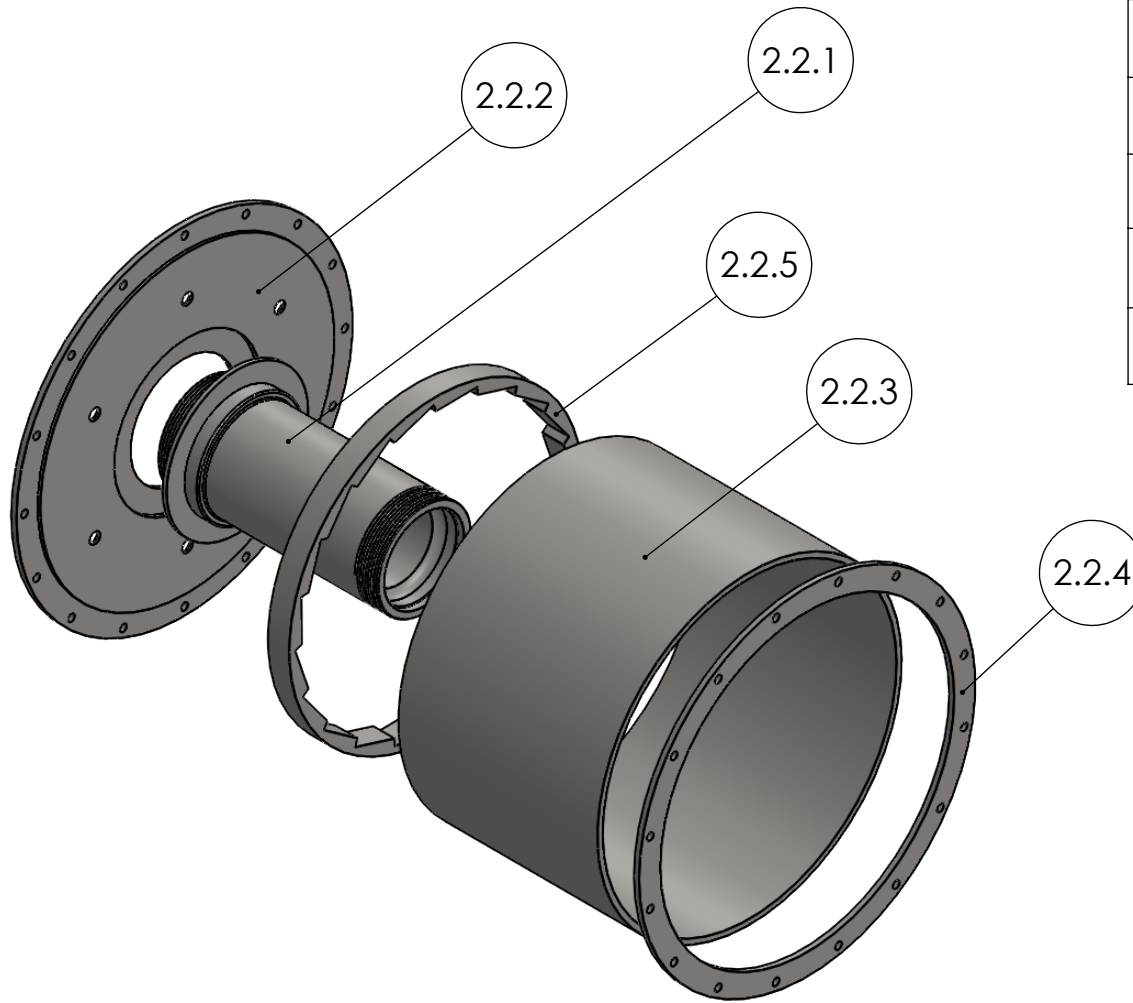


SECCIÓN E-E
ESCALA 1 : 2



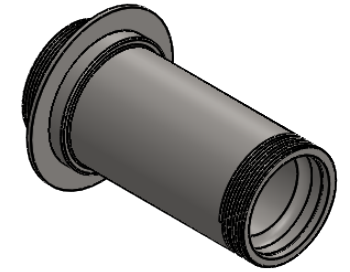
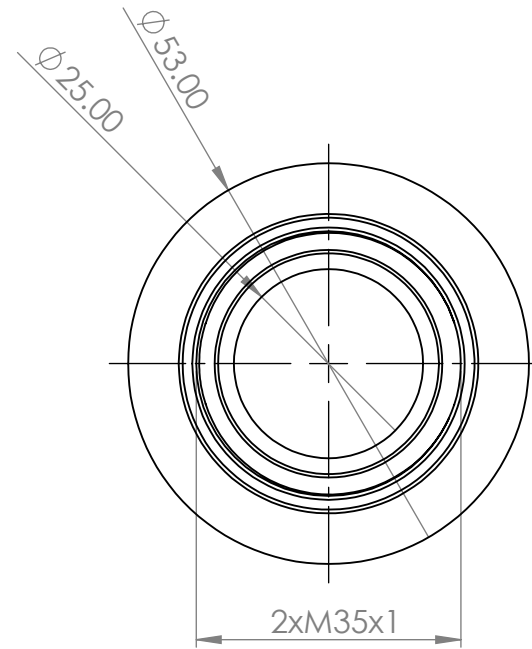
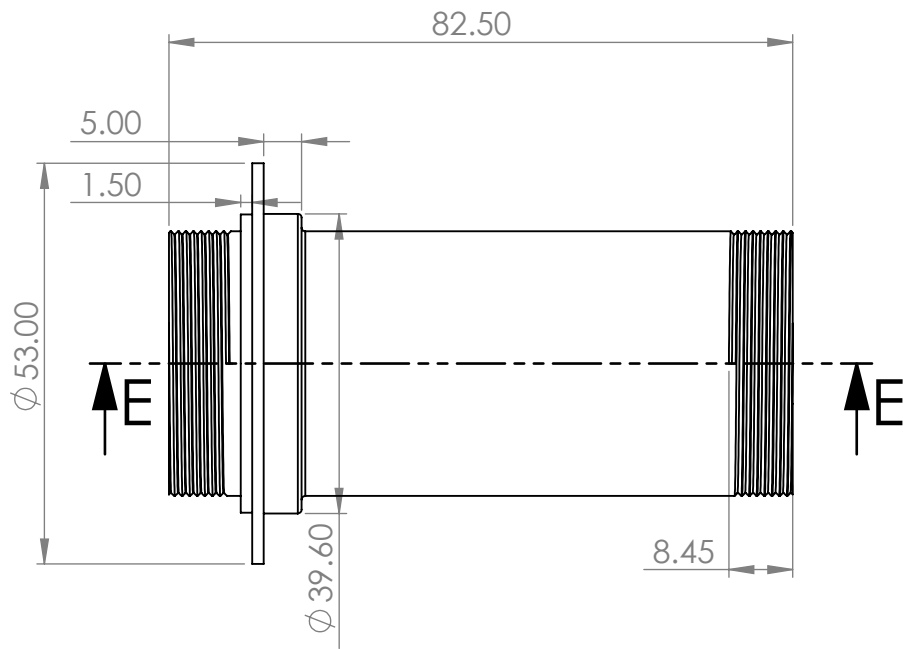
ESCALA 1:5

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		
FECHA: 10/10/20		TITULO:		
ESCALA: 1:2		PIEZA 1.2.2. MANZANA		
UNIDADES: mm		AUTORES: IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA		
A4		REVISÁ: ING. RICARDO JAIMES	PLANO 1.2.2	HOJA 15/49

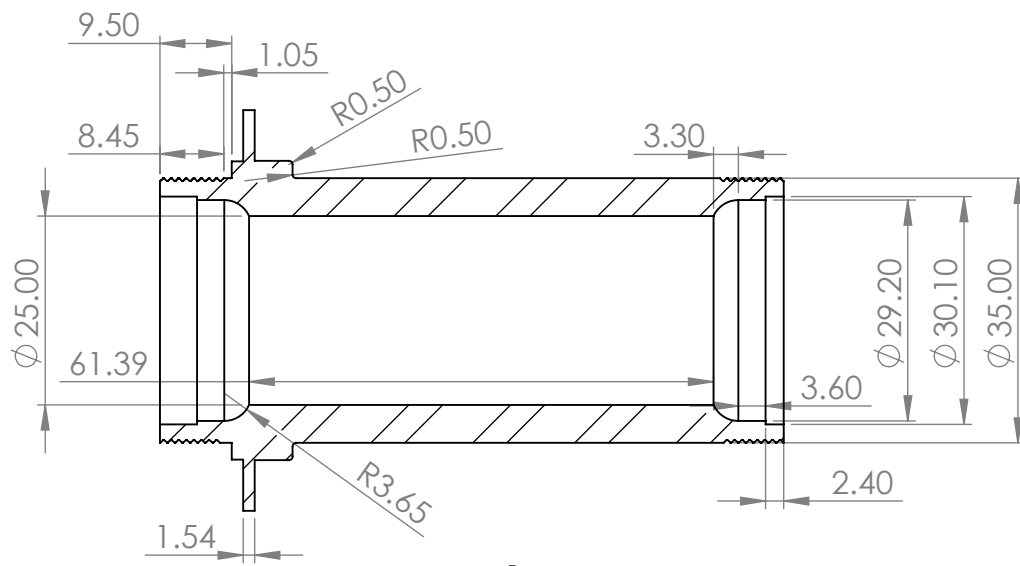


N°	NOMBRE	CANT.	OBSERVACIONES
2.2.1	CENTRO MANZANA	1	ACERO AISI 1020
2.2.2	PLATO IZQUIERDO MANZANA	1	ACERO AISI 1020
2.2.3	CILINDRO MANZANA	1	ACERO AISI 1020
2.2.4	ANILLO IZQUIERDO MANZANA	1	ACERO AISI 1020
2.2.5	TRINQUETE MANZANA	1	ACERO AISI 1020

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		
FECHA: 10/10/20		TITULO:		
ESCALA: 1:2		VISTA EXPLOSIONADA MANZANA		
UNIDADES: mm		AUTORES: IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA		
A4		REVISÁ:	ING. RICARDO JAIMES	PLANO 1.2.2.B HOJA 16/49



ESCALA 1:2



SECCIÓN E-E



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10/10/20

TITULO:

PIEZA 2.2.1. CENTRO MANZANA

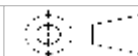
ESCALA: 1:1

UNIDADES: mm

AUTORES:

IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA

A4

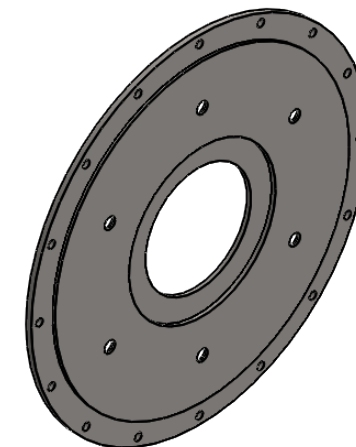
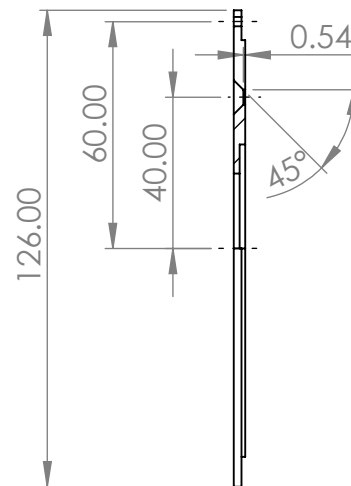
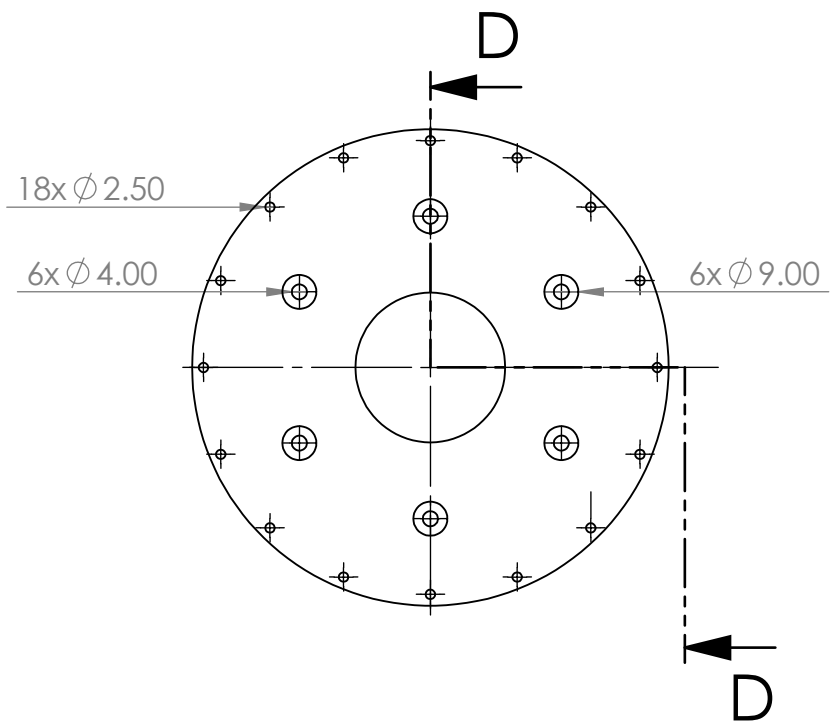


REVISA:

ING. RICARDO JAIMES

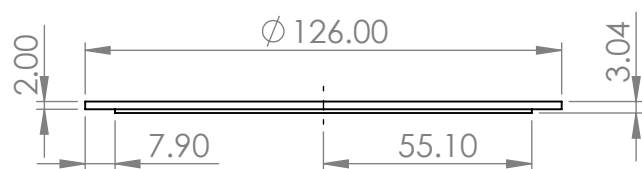
PLANO 1.2.2.1

HOJA 17/49



SECCIÓN_{D-D}

ESCALA 1 : 2



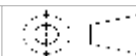
**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE
SANTANDER**

FECHA: 10/10/20

ESCALA: 1:2

UNIDADES: mm

A4



TITULO:

PIEZA 2.2.2. PLATO IZQUIERDO
MANZANA

AUTORES:

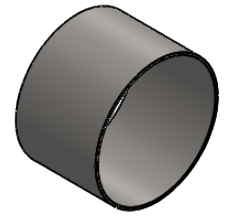
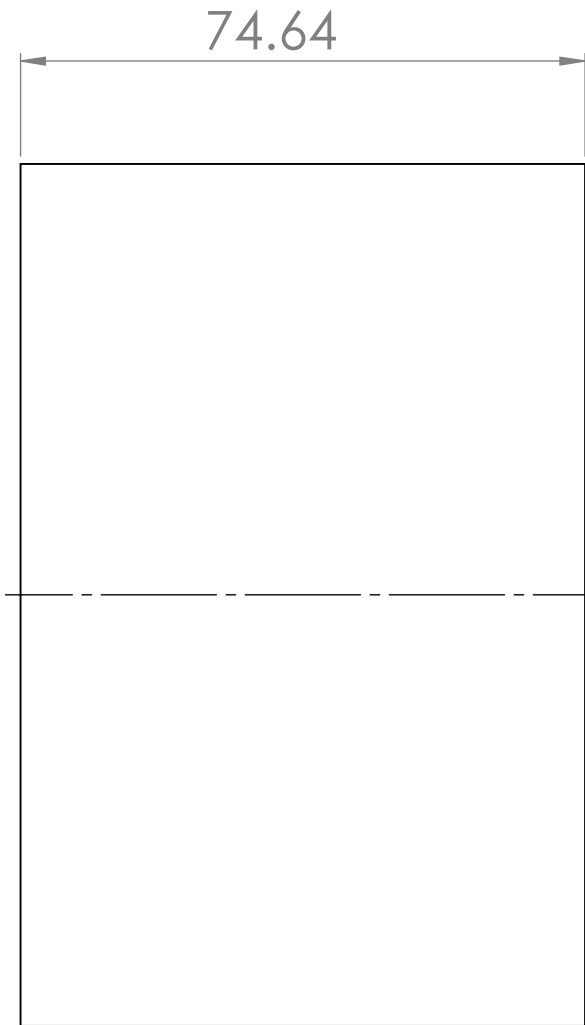
IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA

REVISA:

ING. RICARDO JAIMES

PLANO 1.2.2.2

HOJA 18/49



ESCALA 1:5



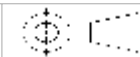
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10/10/20

ESCALA: 1:1

UNIDADES: mm

A4



TITULO:

PIEZA 2.2.3 CILINDRO MANZANA

AUTORES:

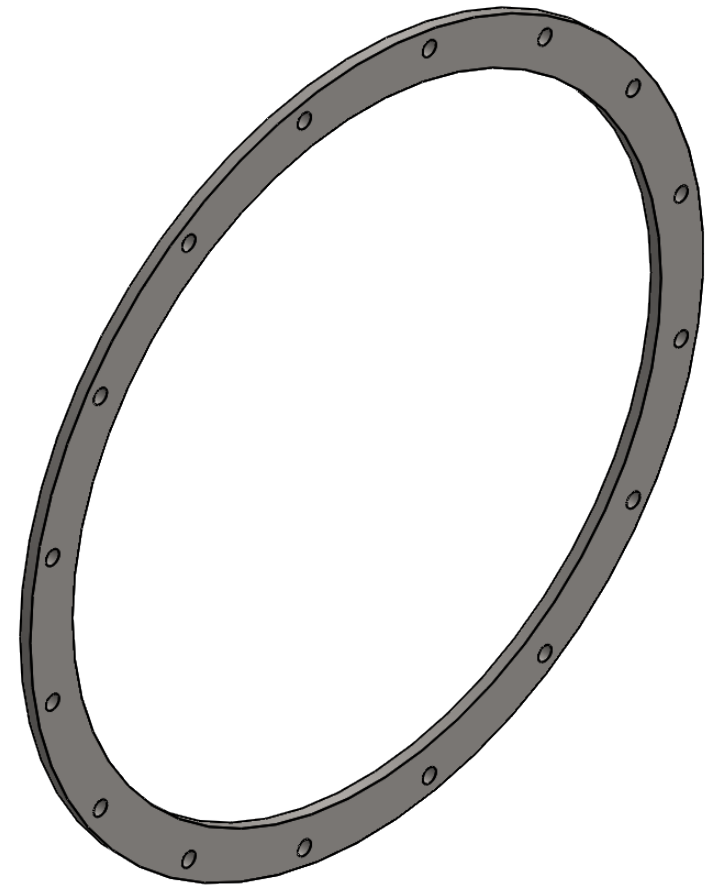
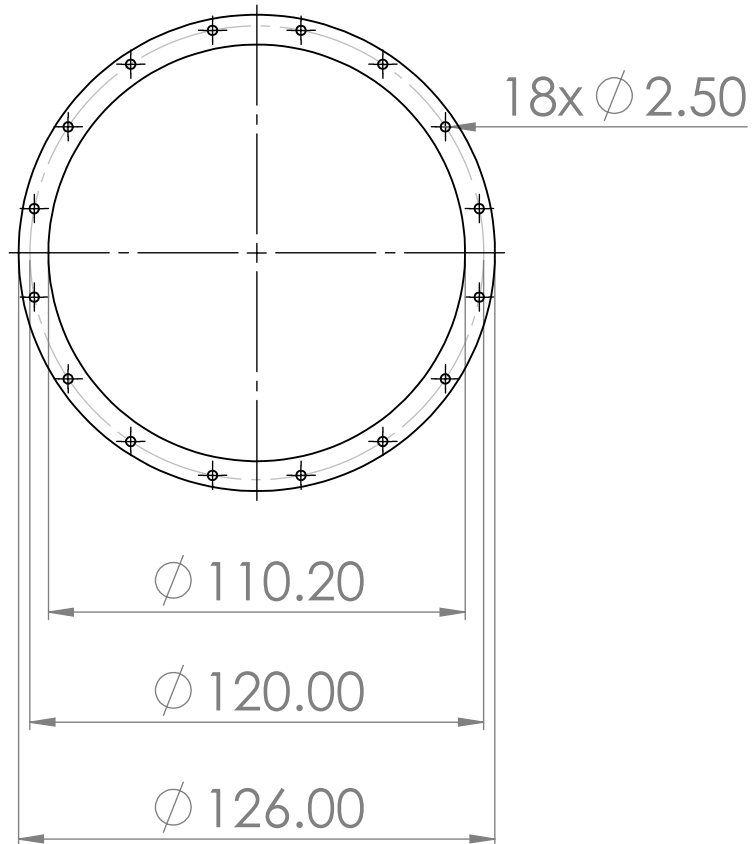
IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA

REVISA:

ING. RICARDO JAIMES

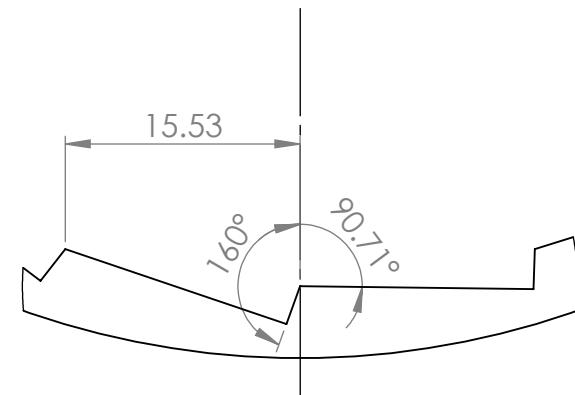
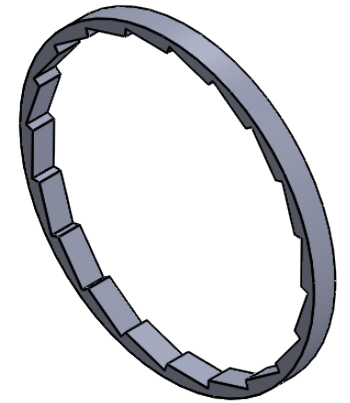
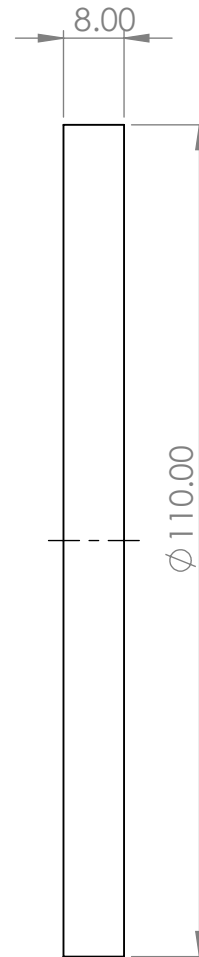
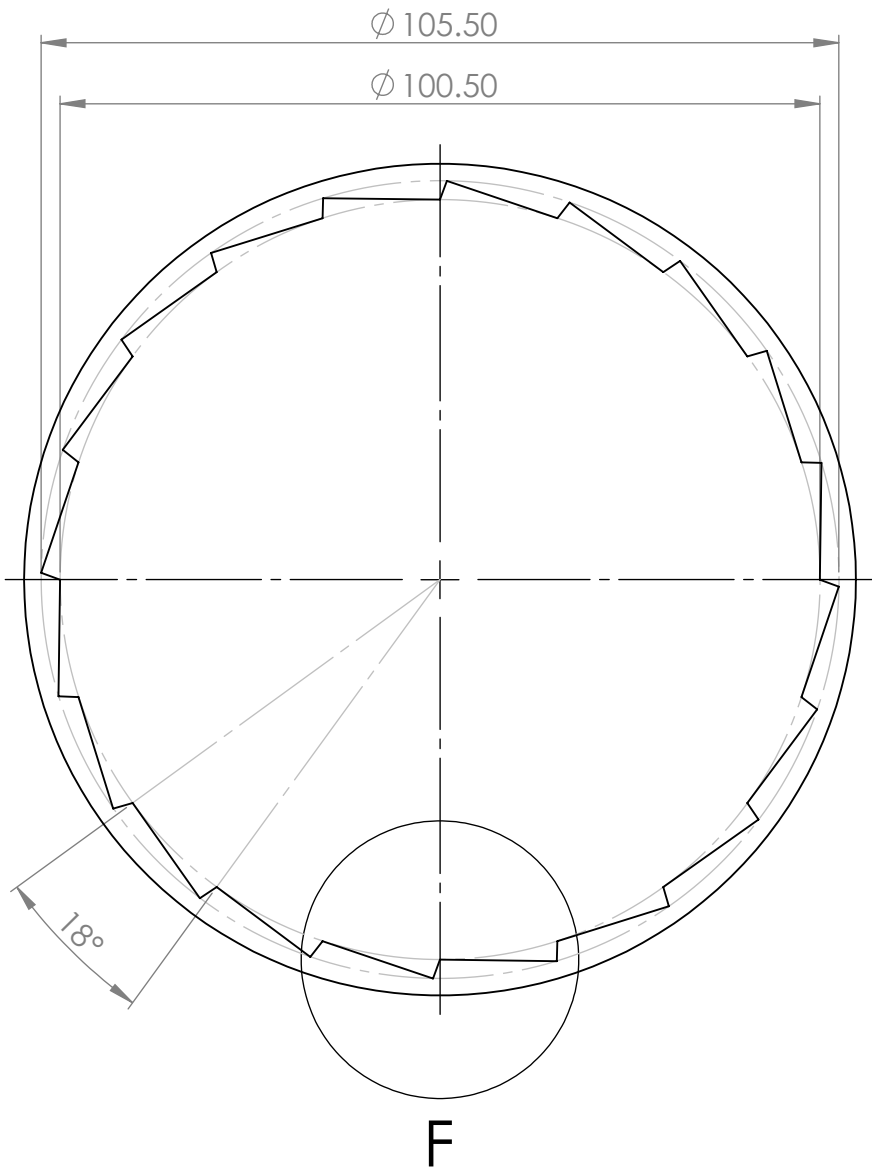
PLANO 1.2.2.3

HOJA 19/49



ESCALA 1:1

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		
FECHA: 10/10/20		TITULO: PIEZA 2.2.4. ANILLO IZQUIERDO MANZANA		
ESCALA: 1:2		AUTORES: IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA		
UNIDADES: mm		REVISA: ING. RICARDO JAIMES		
A4		PLANO 1.2.2.4	HOJA 20/49	



DETALLE F

ESCALA 2 : 1



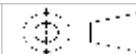
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10/10/20

ESCALA: 1:1

UNIDADES: mm

A4



TITULO:

PIEZA 2.2.5. TRINQUETE MANZANA

AUTORES:

IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA

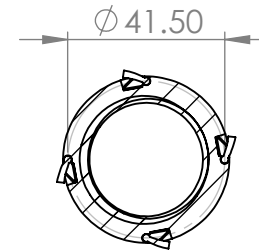
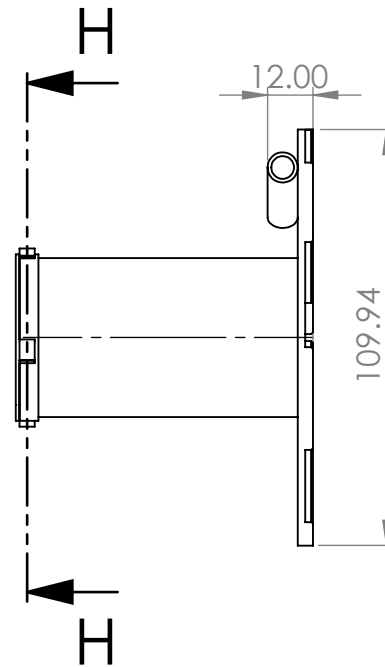
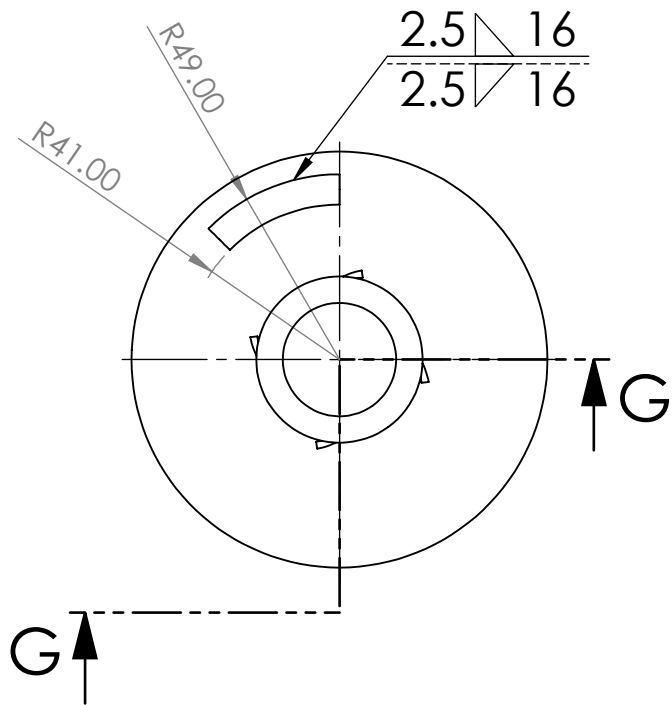
REVISA:

ING. RICARDO JAIMES

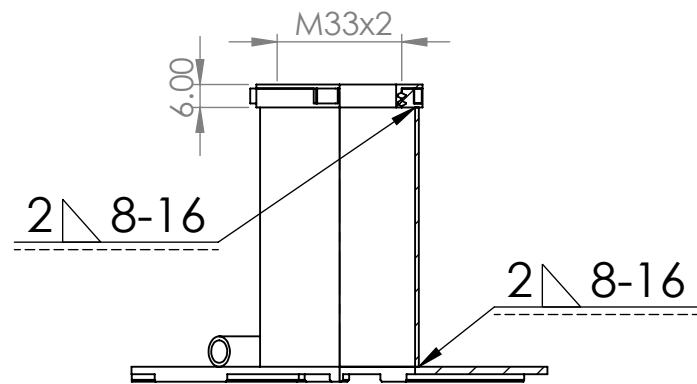
PLANO 1.2.2.5

HOJA 21/49

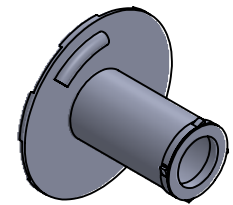
NOTA: EL ELEMENTO MOSTRADO TIENE 20 DIENTES



SECCIÓN H-H



SECCIÓN G-G



ESCALA 1:4



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10/10/20

TITULO:

PIEZA 2.3. EJE DEL RESORTE (MANDRIL)

ESCALA: 1:2

AUTORES:

IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA

UNIDADES: mm

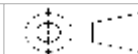
REVISÁ:

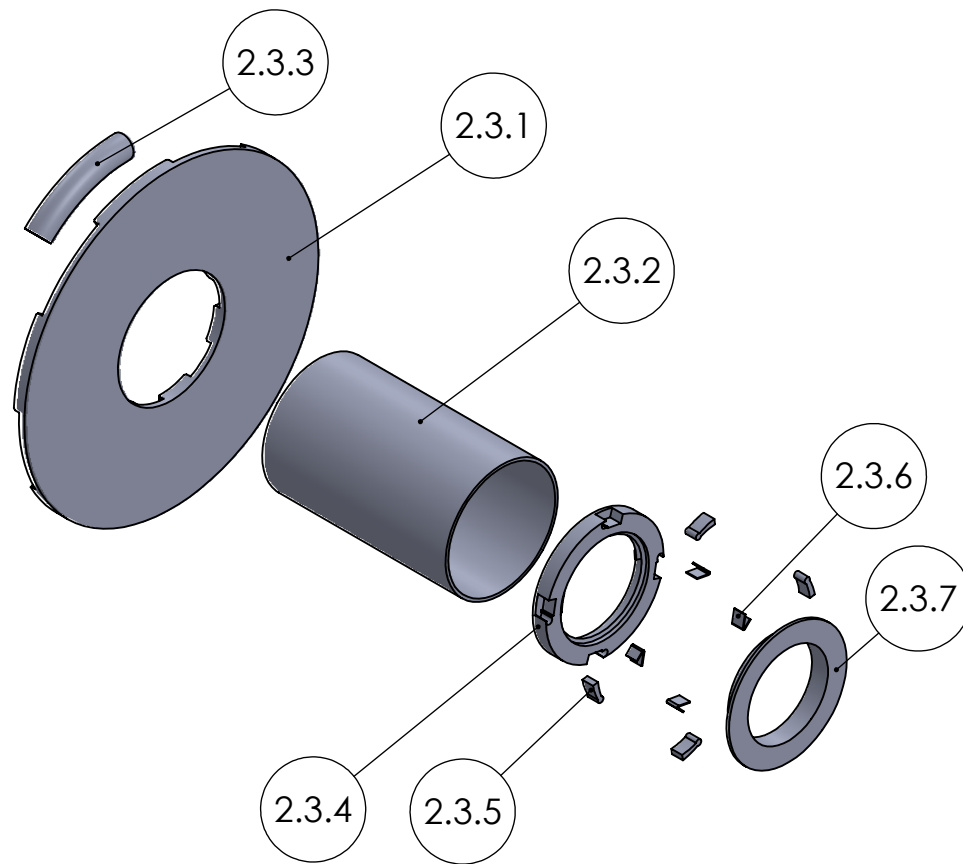
ING. RICARDO JAIMES

PLANO 1.2.3

HOJA 22/49

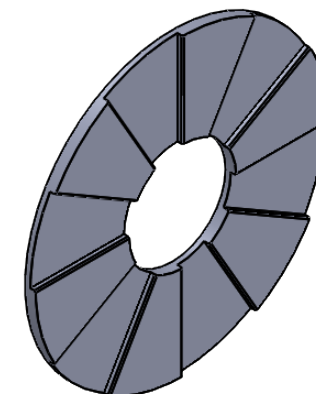
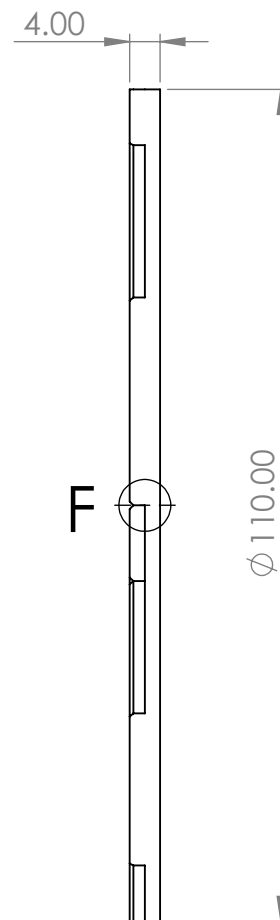
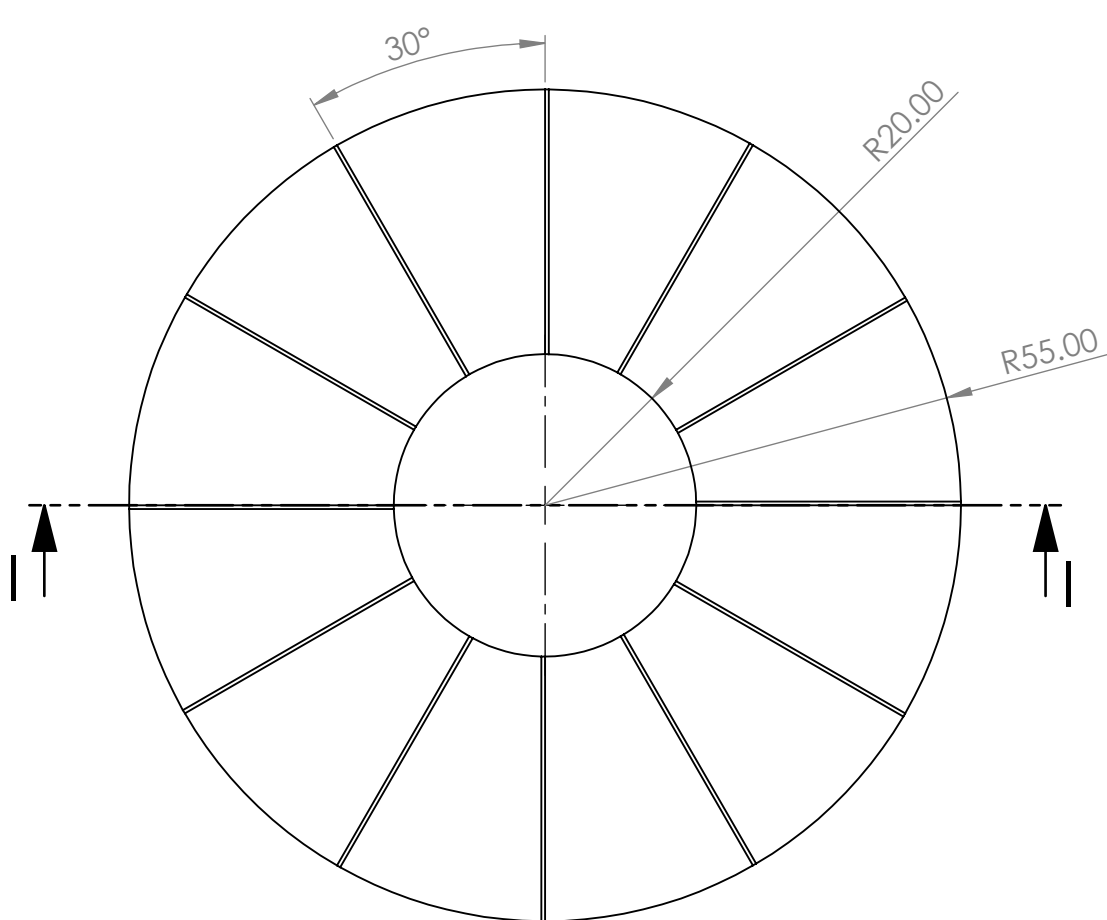
A4



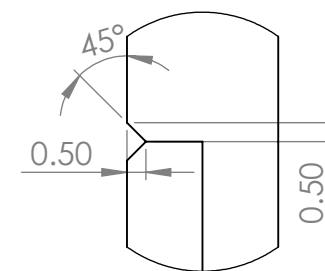


N°	NOMBRE	CANT.	OBSERVACIONES
2.3.1	PLATO DE ACOUPLE	1	ACERO AISI 1020
2.3.2	CILINDRO MANDRIL	1	ACERO AISI 1020
2.3.3	AGARRE DEL RESORTE	1	ACERO AISI 1020
2.3.4	CUBO TRINQUETE	1	ACERO AISI 1020
2.3.5	UÑETA TRINQUETE	4	ACERO AISI 1020
2.3.6	RESORTE TRINQUETE	4	ACERO AISI 1020
2.3.7	TAPA TRINQUETE	1	ACERO AISI 1020

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10/10/20		TITULO: VISTA EXPLOSIONADA EJE DEL RESORTE (MANDRIL)	
ESCALA: 1:2		AUTORES: IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA	
UNIDADES: mm		REVISA: ING. RICARDO JAIMES	
A4		PLANO 1.2.3.B	HOJA 23/49

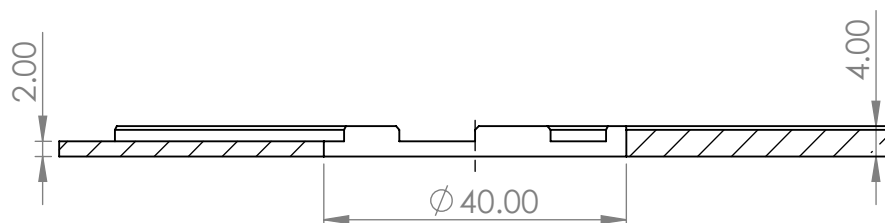


ESCALA 1:2



DETALLE F

ESCALA 5:1



SECCIÓN I-I



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10/10/20

TITULO:

PIEZA 2.3.1. PLATO DE ACOPLA MANDRIL

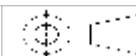
ESCALA: 1:1

UNIDADES: mm

AUTORES:

IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA

A4

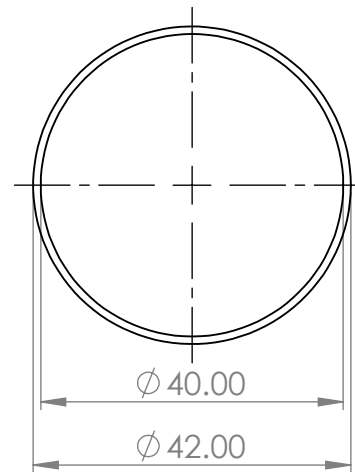
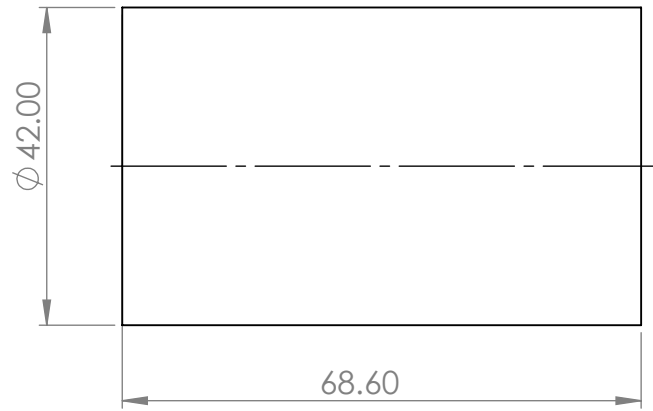
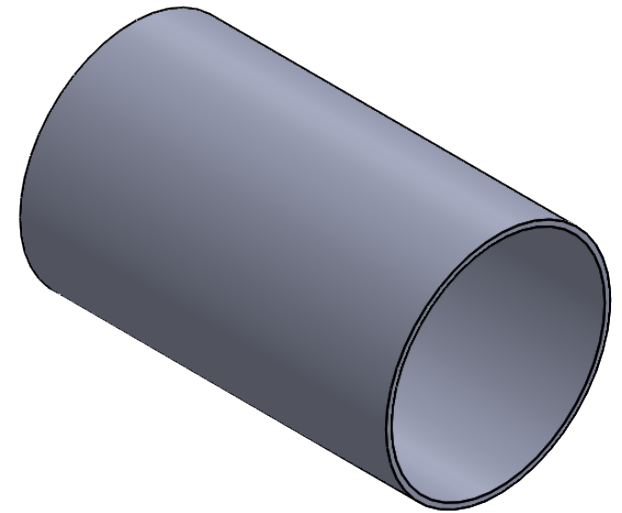


REVISA:

ING. RICARDO JAIMES

PLANO 1.2.3.1

HOJA 24/49



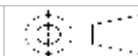
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10/10/20

ESCALA: 1:1

UNIDADES: mm

A4



TITULO:

PIEZA 2.3.2. CILINDRO MANDRIL

AUTORES:

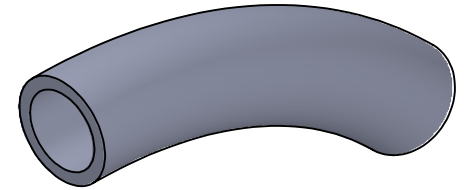
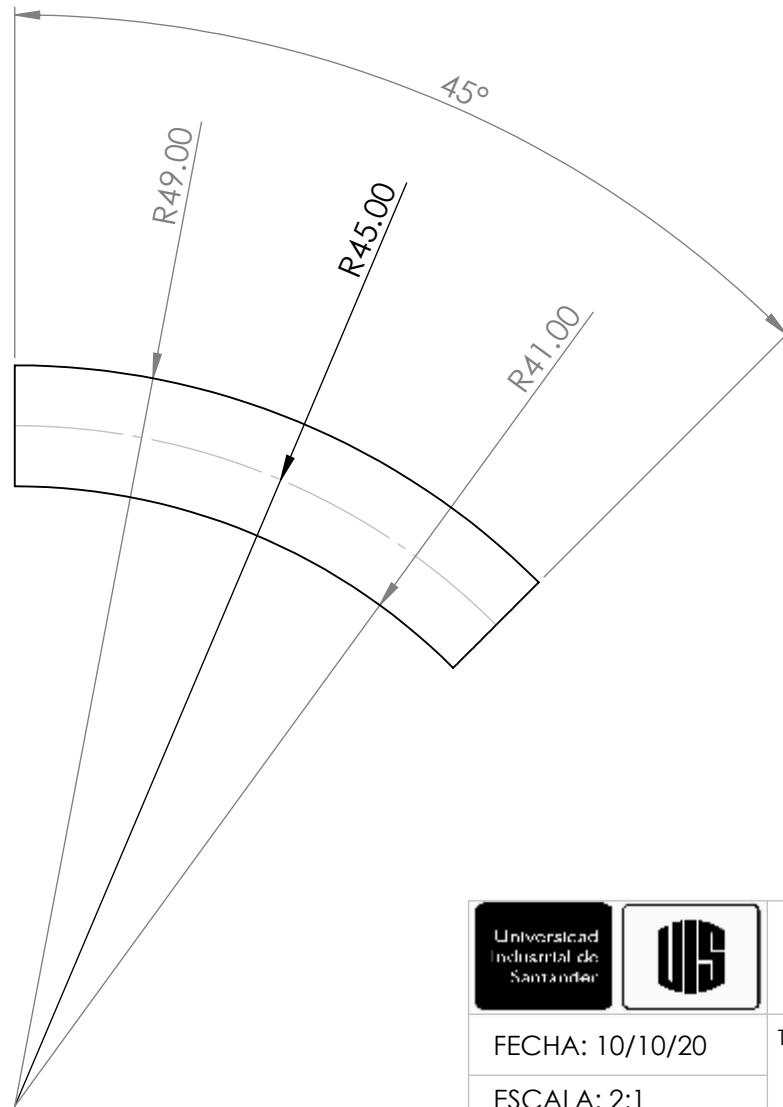
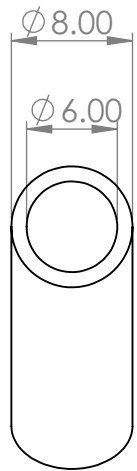
IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA

REVISÁ:

ING. RICARDO JAIMES

PLANO 1.2.3.2

HOJA 25/49



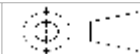
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10/10/20

ESCALA: 2:1

UNIDADES: mm

A4



TITULO:

PIEZA 2.3.3. AGARRE DEL RESORTE

AUTORES:

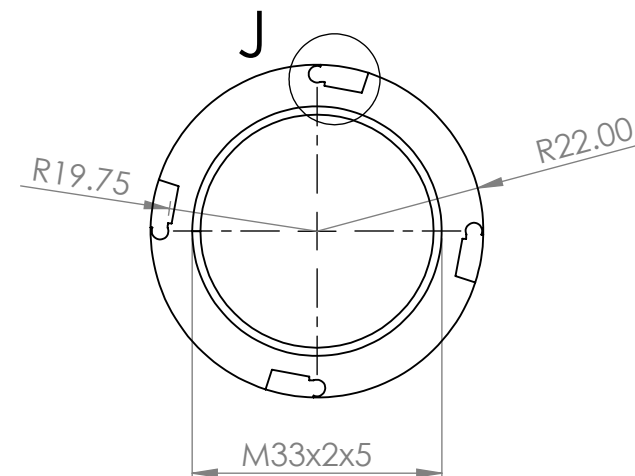
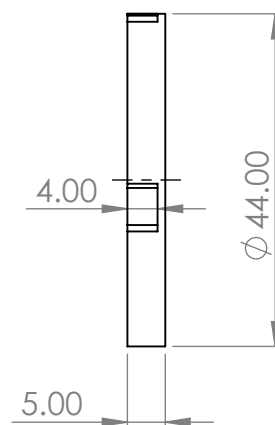
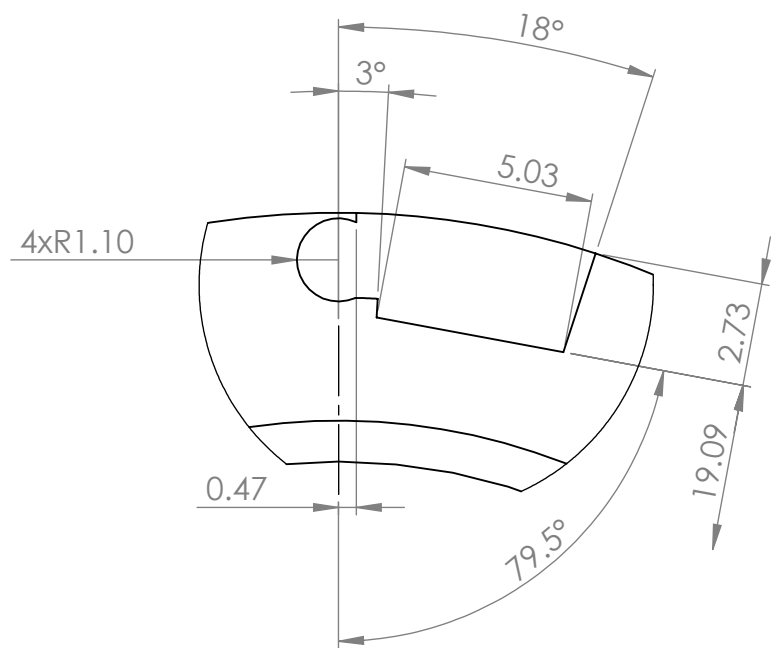
IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA

REVISÁ:

ING. RICARDO JAIMES

PLANO 1.2.3.3

HOJA 26/49



DETALLE J

ESCALA 5 : 1



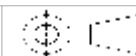
**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE
SANTANDER**

FECHA: 10/10/20

ESCALA: 1:1

UNIDADES: mm

A4



TITULO:

PIEZA 2.3.4. CUBO TRINQUETE MANDRIL

AUTORES:

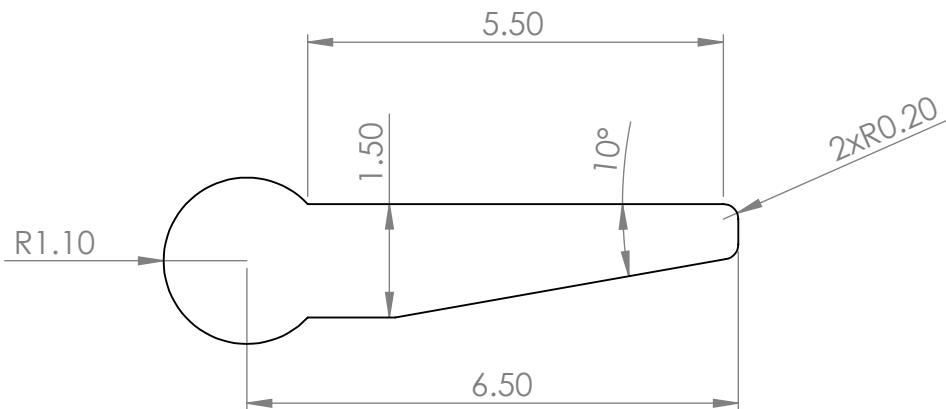
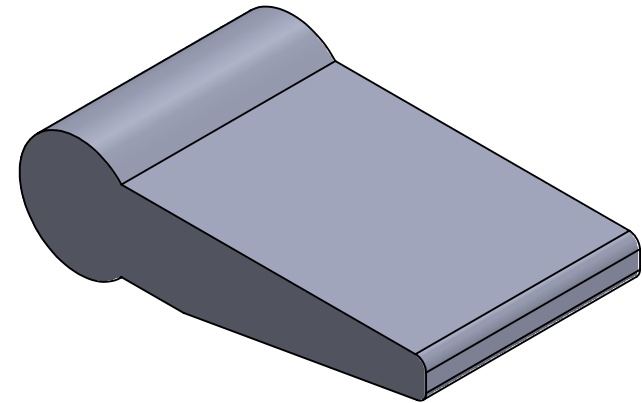
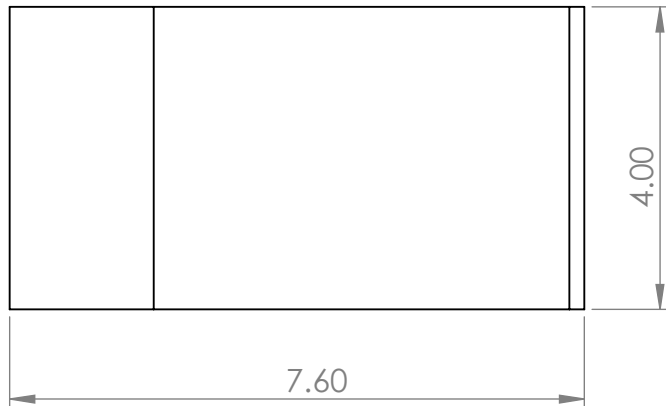
IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA

REVISA:

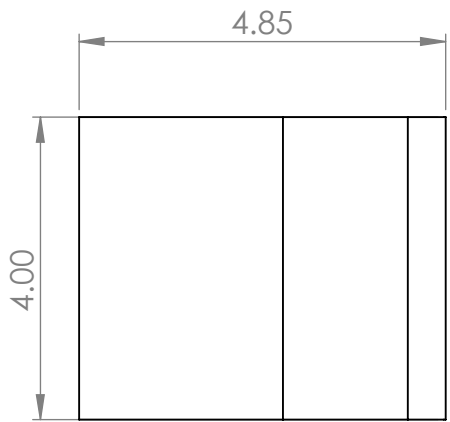
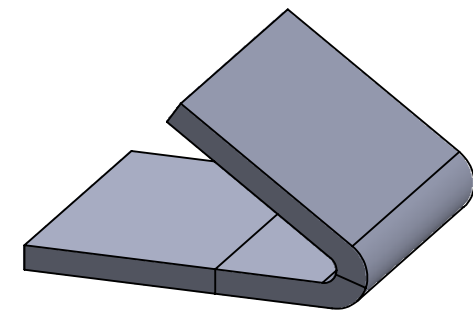
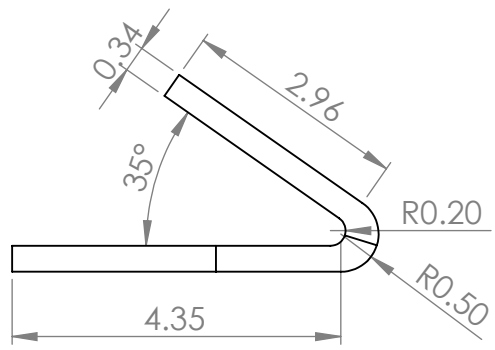
ING. RICARDO JAIMES

PLANO 1.2.3.4

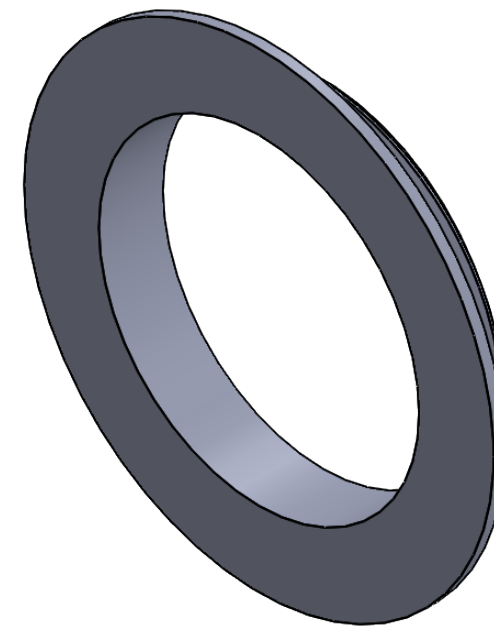
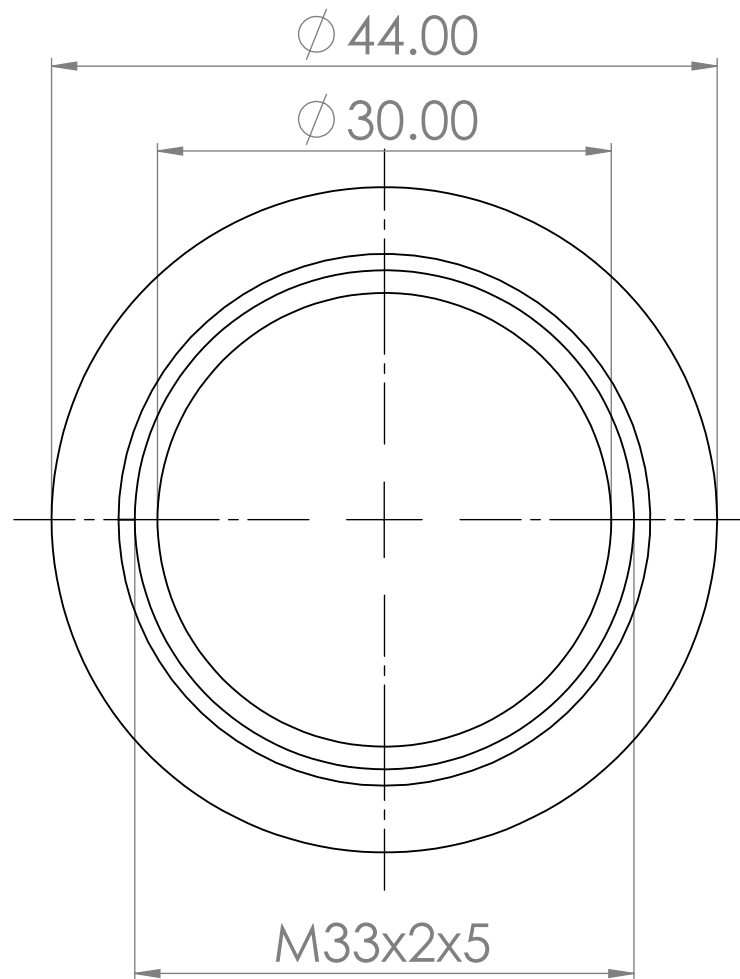
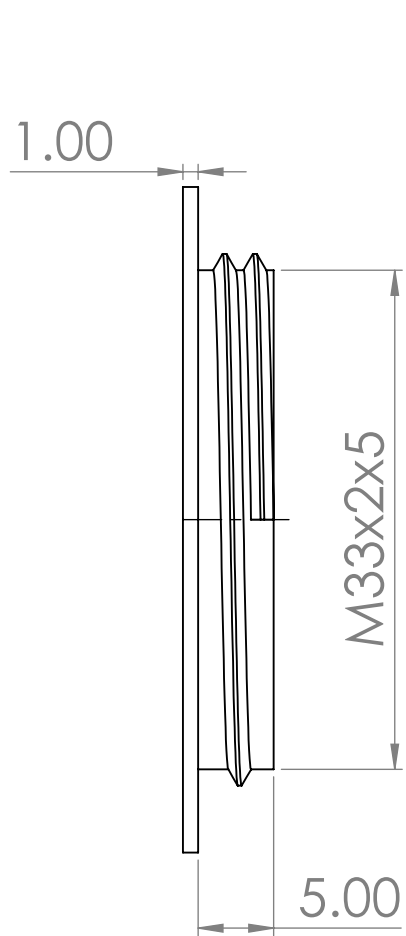
HOJA 27/49



 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		
FECHA: 10/10/20		TITULO:		
ESCALA: 10:1		PIEZA 2.3.5. UÑETA TRINQUETE MANDRIL		
UNIDADES: mm		AUTORES: IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA		
A4		REVISA: ING. RICARDO JAIMES	PLANO 1.2.3.5	HOJA 28/49



 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		
FECHA: 10/10/20		TITULO:		
ESCALA: 10:1		PIEZA 2.3.6. RESORTE TRINQUETE MANDRIL		
UNIDADES: mm		AUTORES: IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA		
A4		REVIS: ING. RICARDO JAIMES	PLANO 1.2.3.6	HOJA 29/49



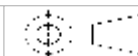
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10/10/20

ESCALA: 2:1

UNIDADES: mm

A4



TITULO:

PIEZA 2.3.7. TAPA TRINQUETE MANDRIL

AUTORES:

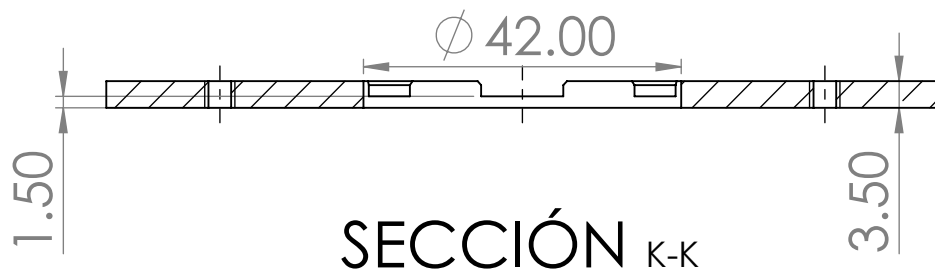
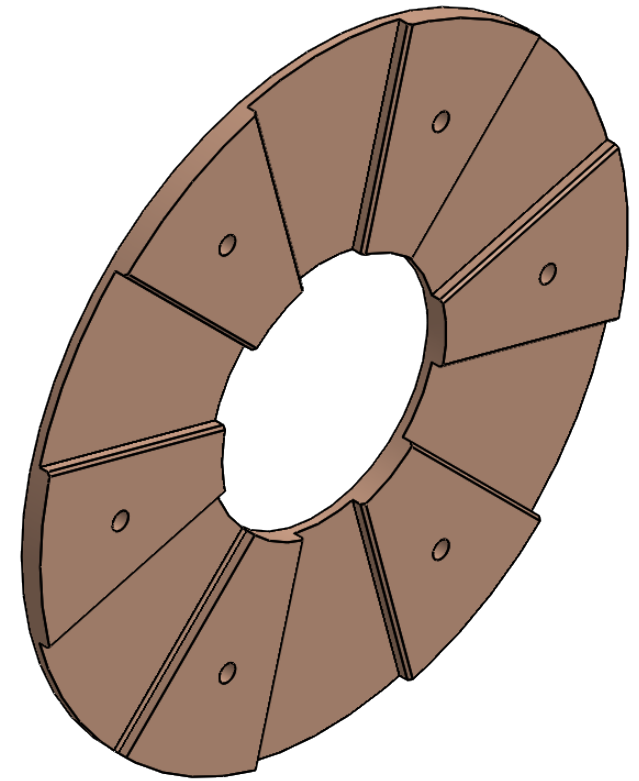
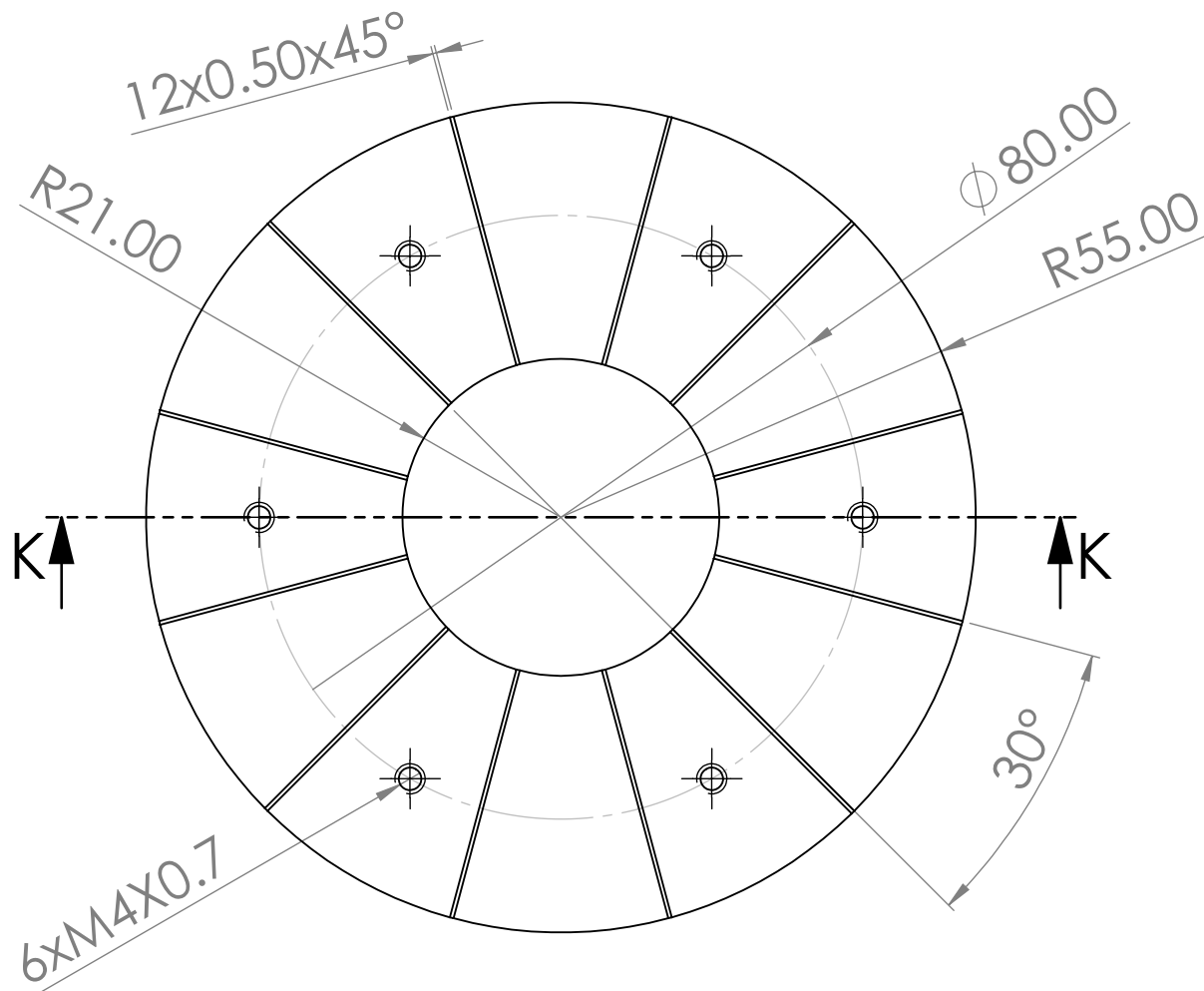
IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA

REVISA:

ING. RICARDO JAIMES

PLANO 1.2.3.7

HOJA 30/49



SECCIÓN K-K



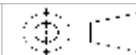
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10/10/20

ESCALA: 1:1

UNIDADES: mm

A4



TITULO:

PIEZA 2.4. ACOPLA MANDRIL-MANZANA

AUTORES:

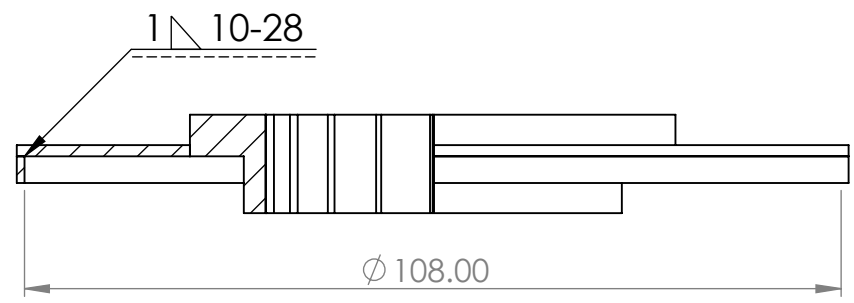
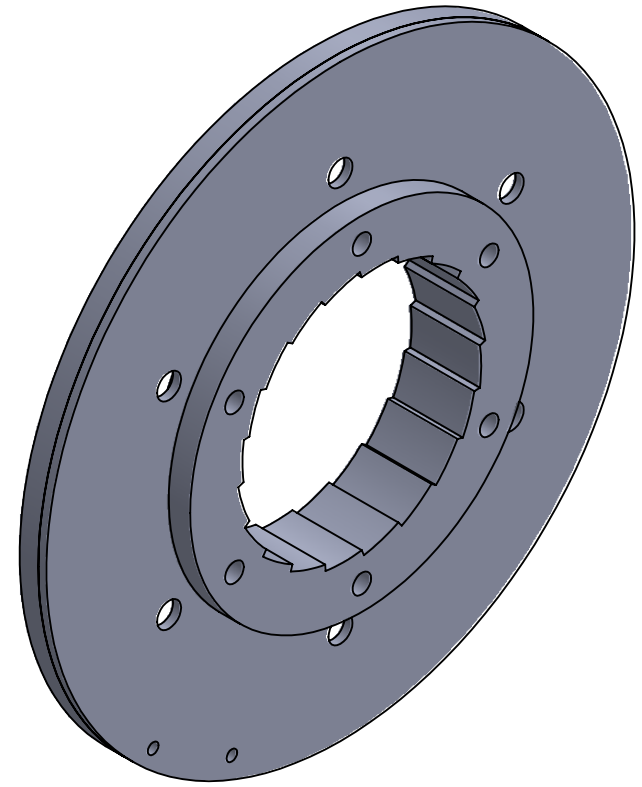
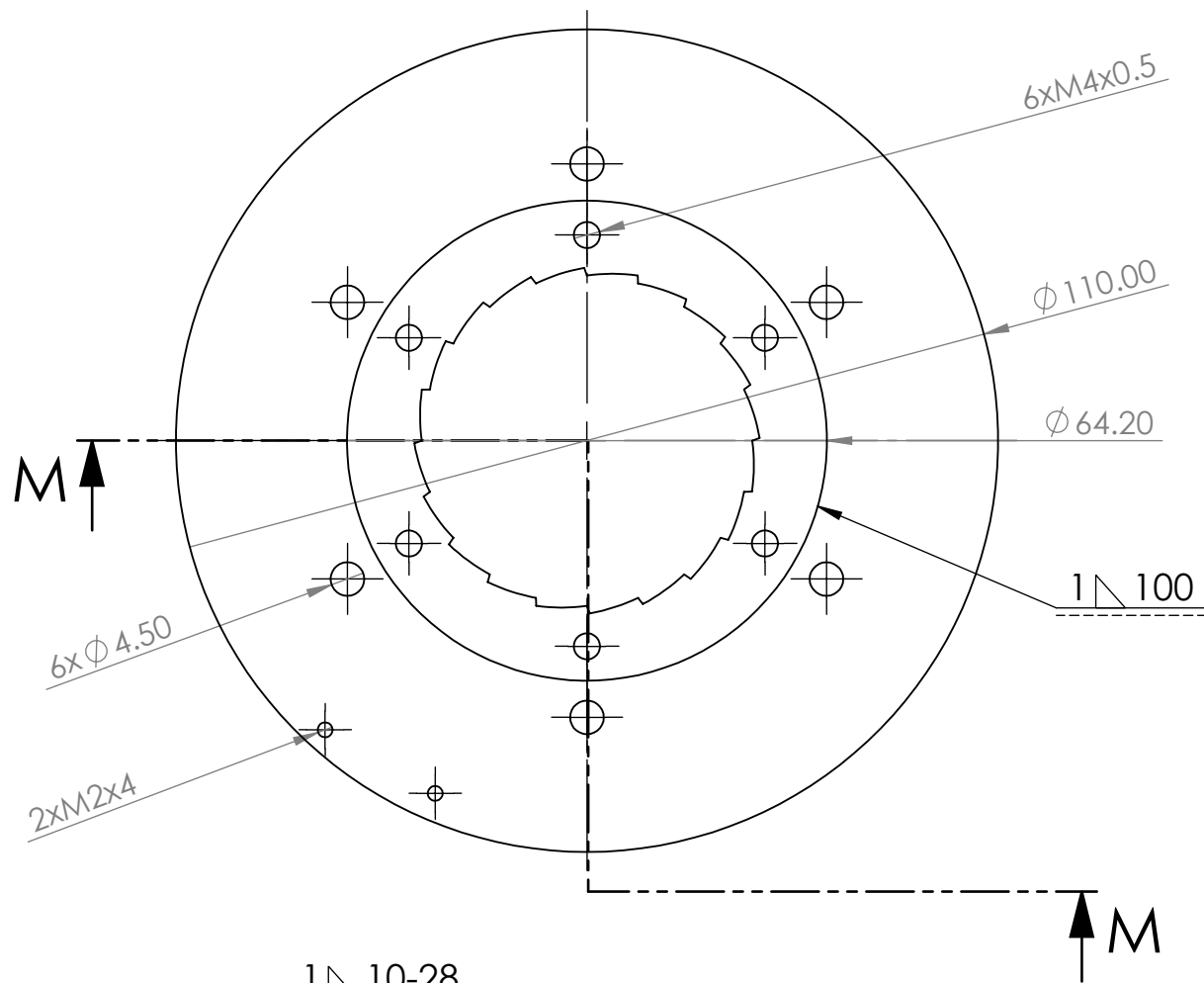
IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA

REVISA:

ING. RICARDO JAIMES

PLANO 1.2.4

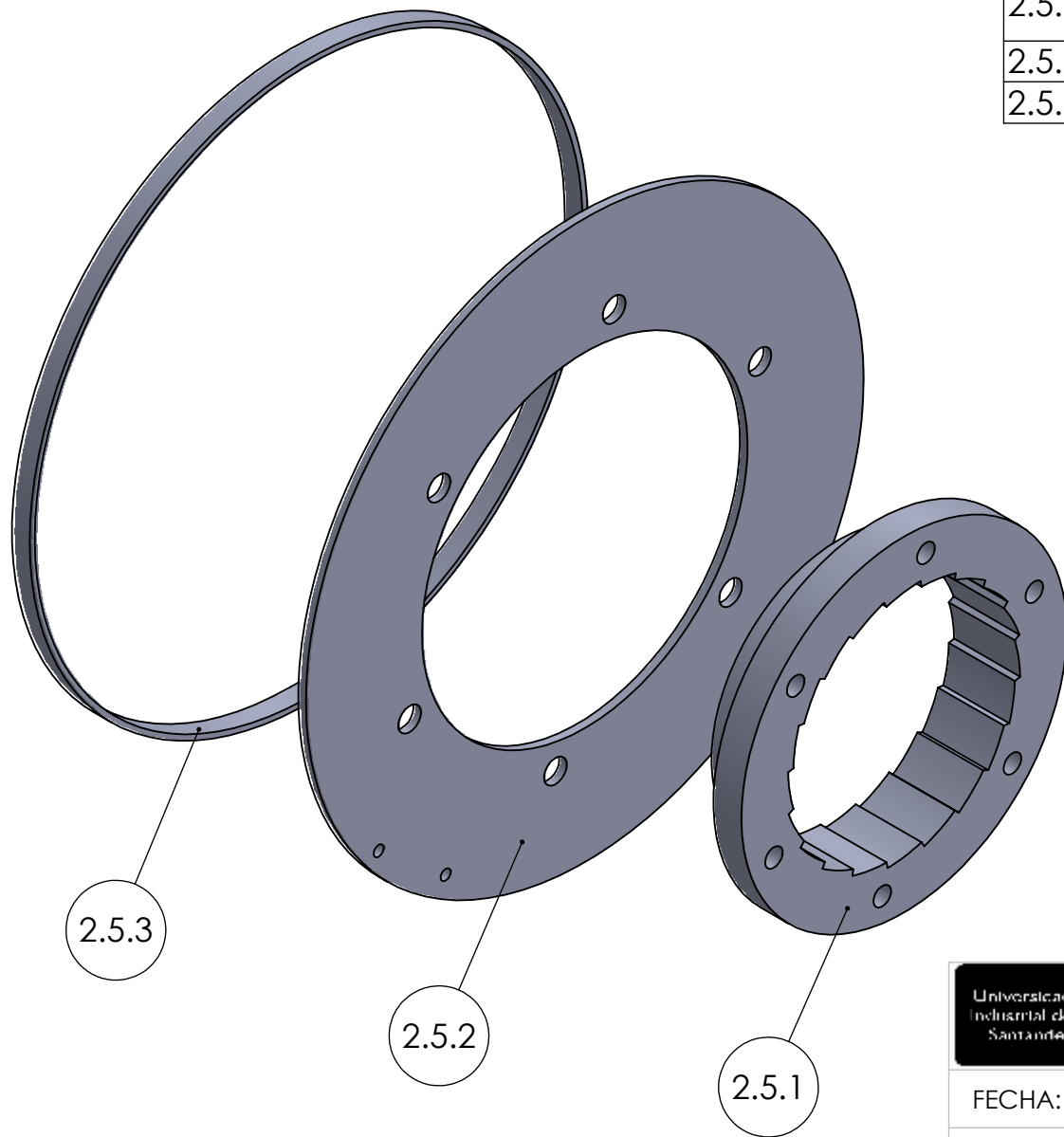
HOJA 31/49



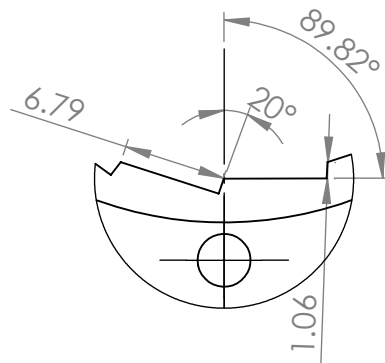
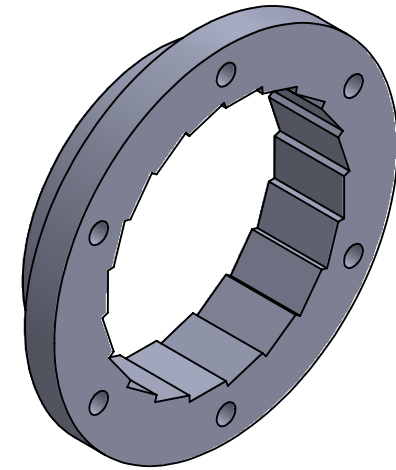
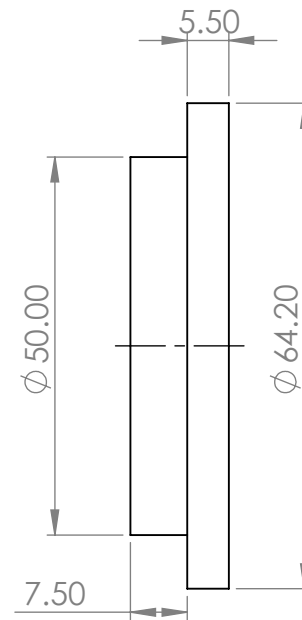
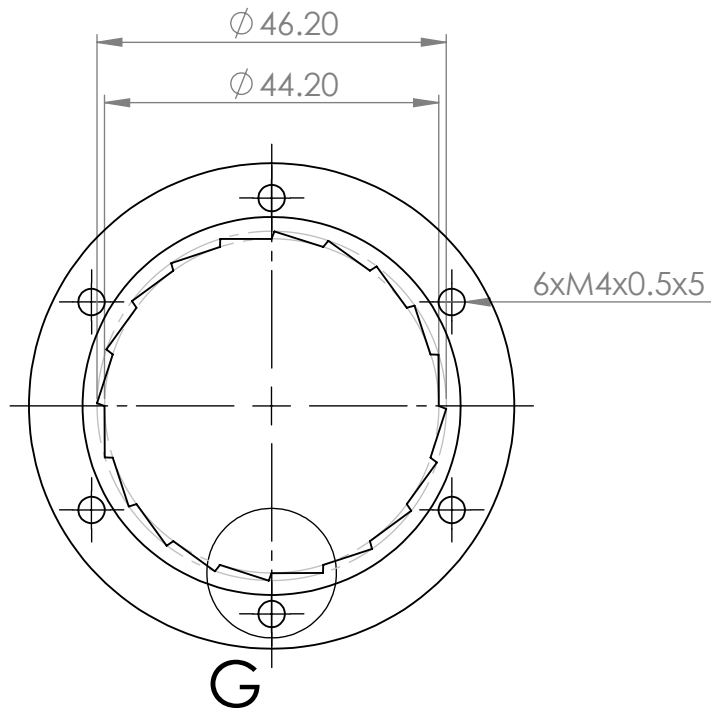
SECCIÓN M-M

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		
FECHA: 10/10/20 ESCALA: 1:1 UNIDADES: mm		TITULO: PIEZA 2.5. PLATO FIJO		
A4		AUTORES: IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA REVISIA: ING. RICARDO JAIMES		
		PLANO 1.2.5	HOJA 32/49	

N°	NOMBRE	CANT.	OBSERVACIONES
2.5.1	TRINQUETE PLATO FIJO	1	ACERO AISI 1020
2.5.2	LAMINA PLATO FIJO	1	ACERO AISI 1020
2.5.3	ANILLO PLATO FIJO	1	ACERO AISI 1020



 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10/10/20		TITULO:	
ESCALA: 1:1		VISTA EXPLOSIONADA PLATO FIJO	
UNIDADES: mm		AUTORES: IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA	
A4		REVISA: ING. RICARDO JAIMES	PLANO 1.2.5.B HOJA 33/49



DETALLE G

ESCALA 2:1



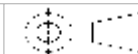
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10/10/20

ESCALA: 1:1

UNIDADES: mm

A4



TITULO:

PIEZA 2.5.1. TRINQUETE PLATO FIJO

AUTORES:

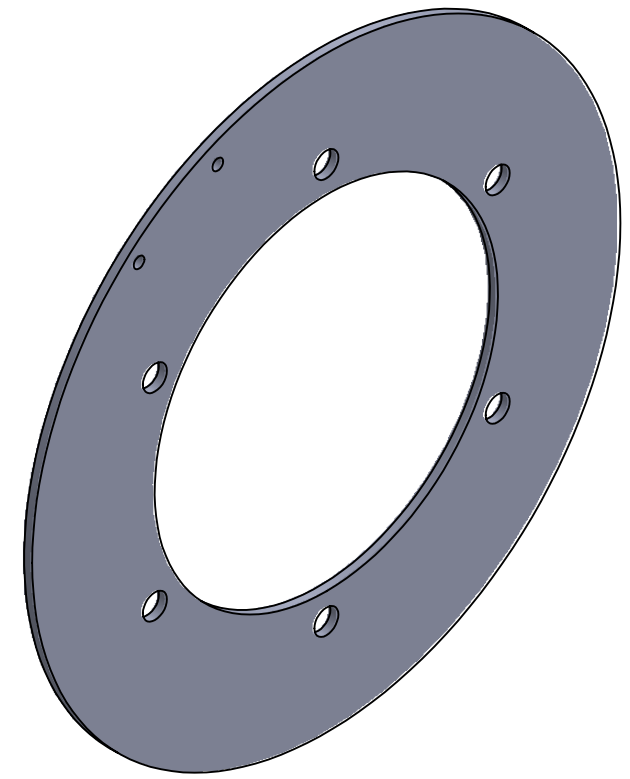
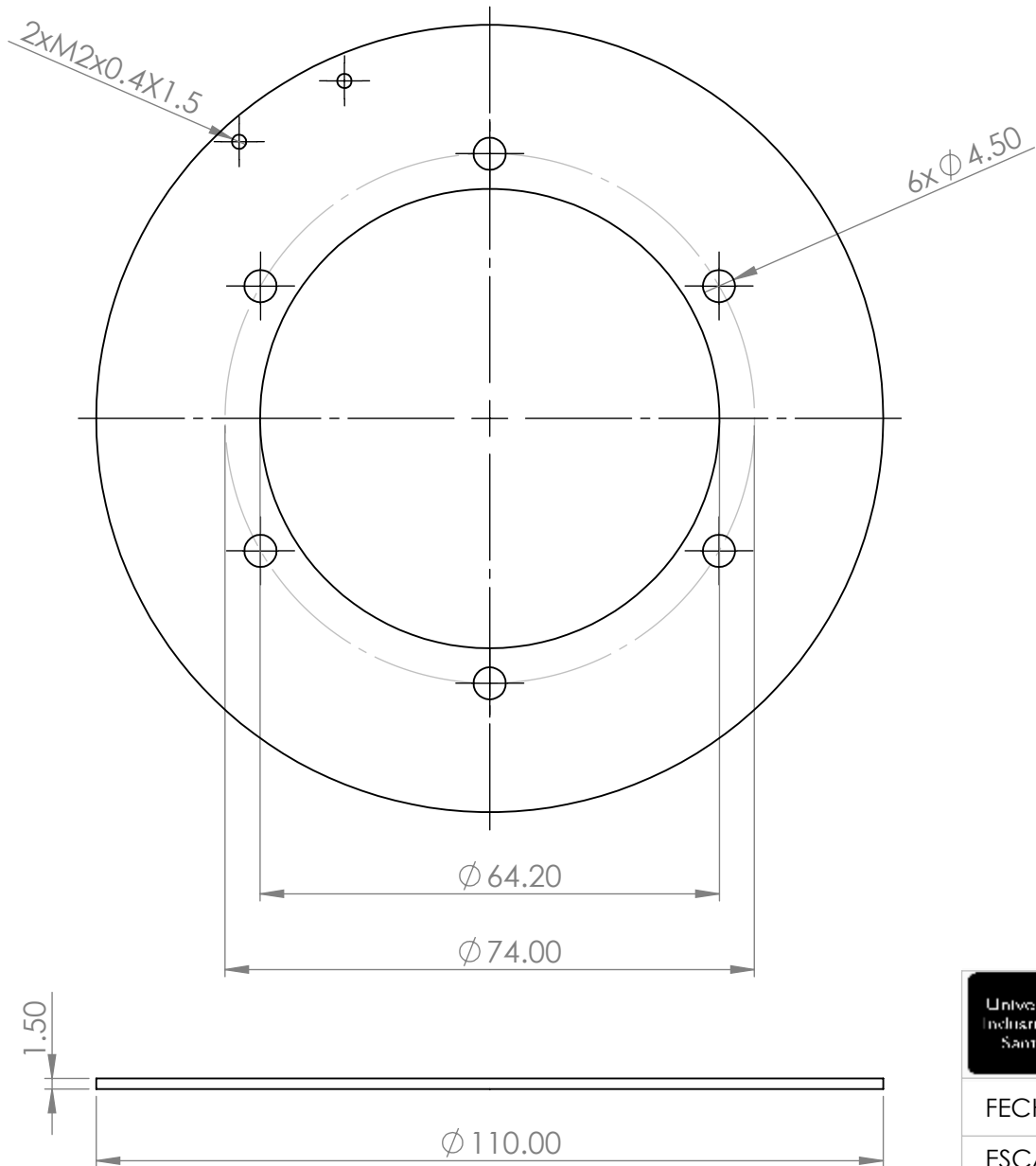
IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA

REVISA:

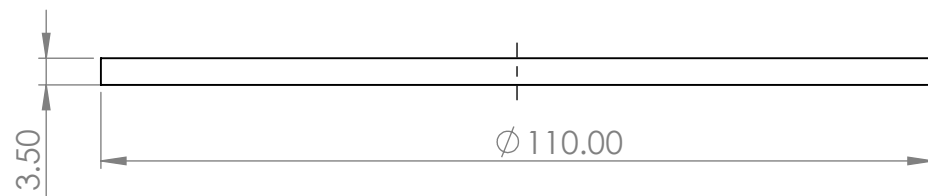
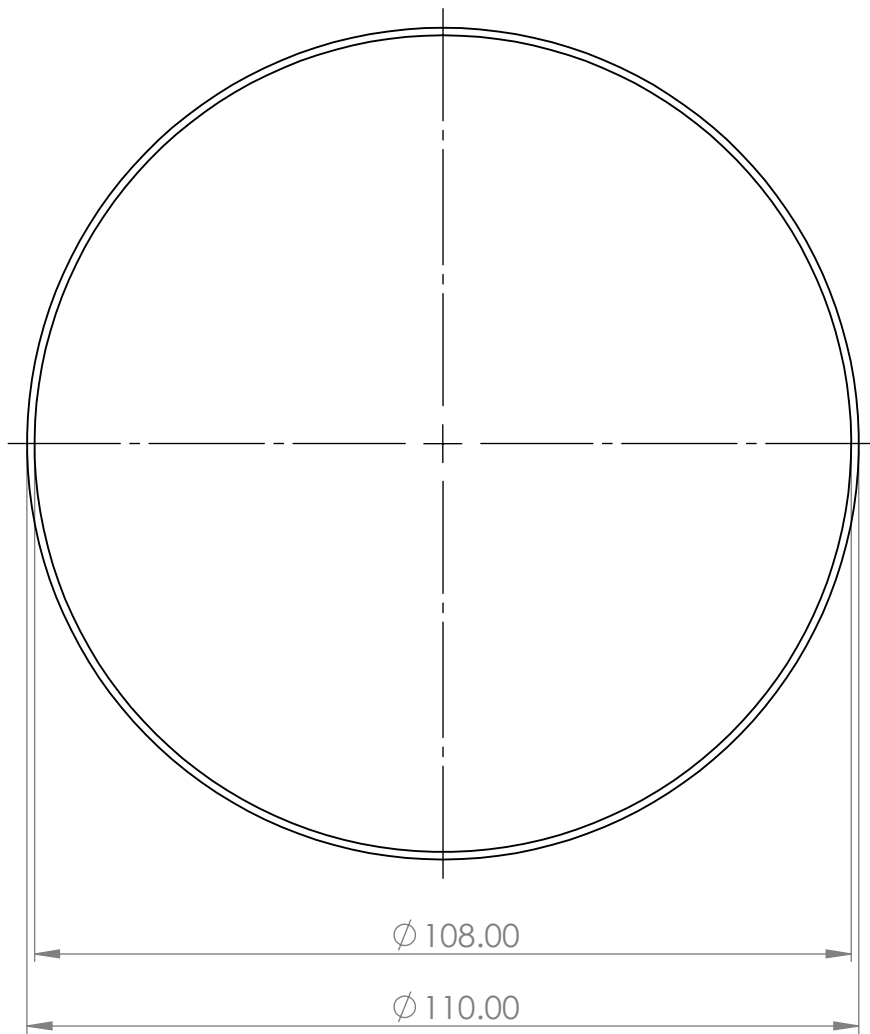
ING. RICARDO JAIMES

PLANO 1.2.5.1

HOJA 34/49



 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10/10/20		TITULO: PIEZA 2.5.2. LAMINA PLATO FIJO	
ESCALA: 1:1		AUTORES: IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA	
UNIDADES: mm		REVISAR: ING. RICARDO JAIMES	
A4		PLANO 1.2.5.2	HOJA 35/49



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10/10/20

TITULO:

PIEZA 2.5.3. ANILLO PLATO FIJO

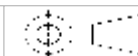
ESCALA: 1:1

UNIDADES: mm

AUTORES:

IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA

A4

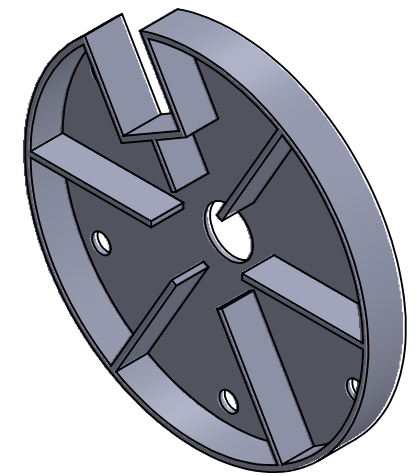
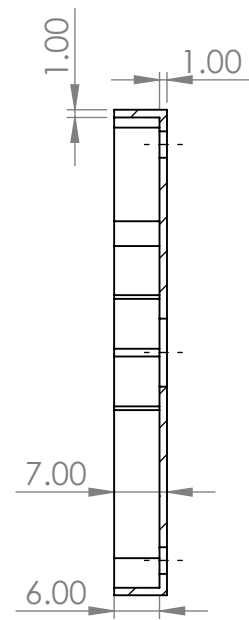
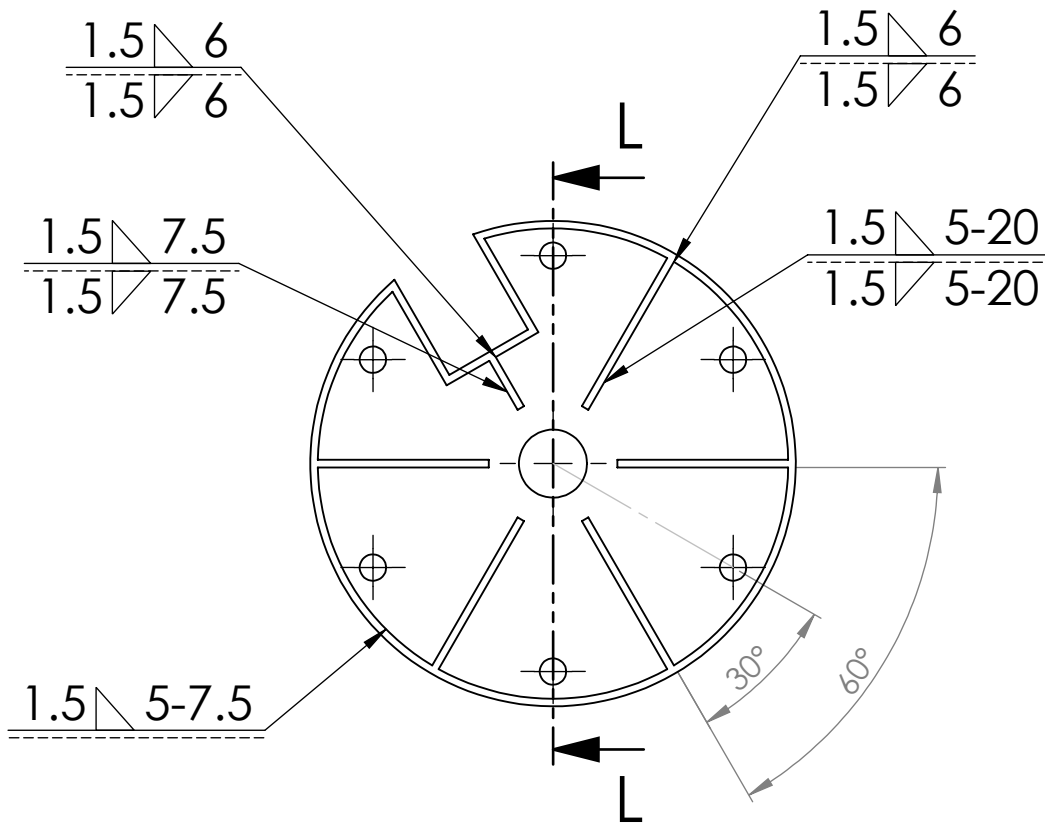


REVISÁ:

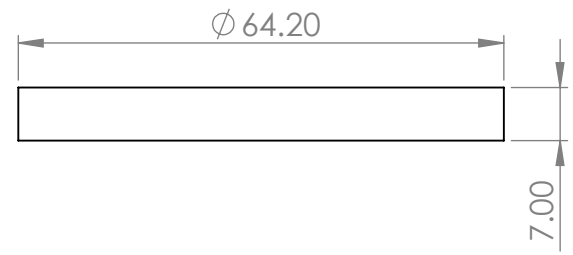
ING. RICARDO JAIMES

PLANO 1.2.5.3

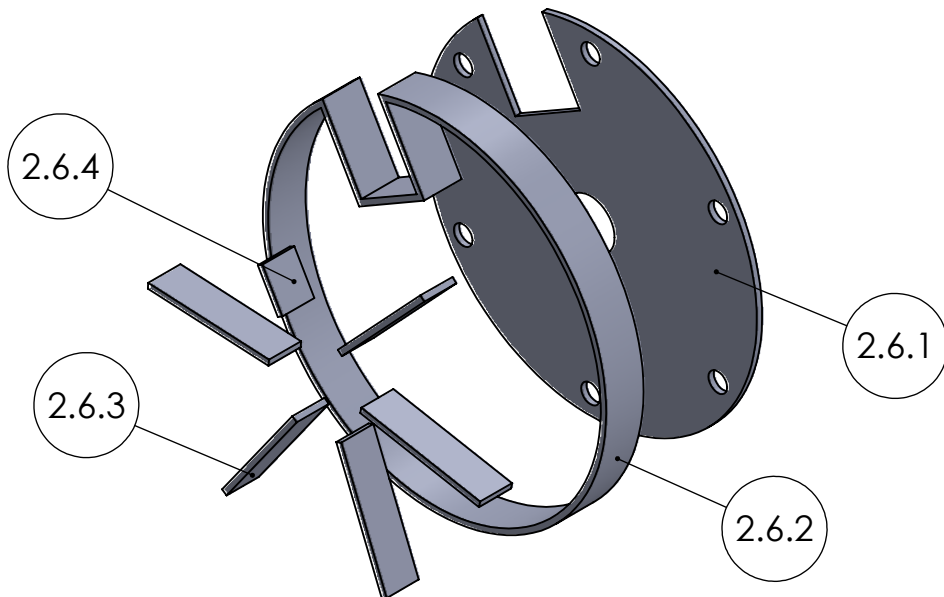
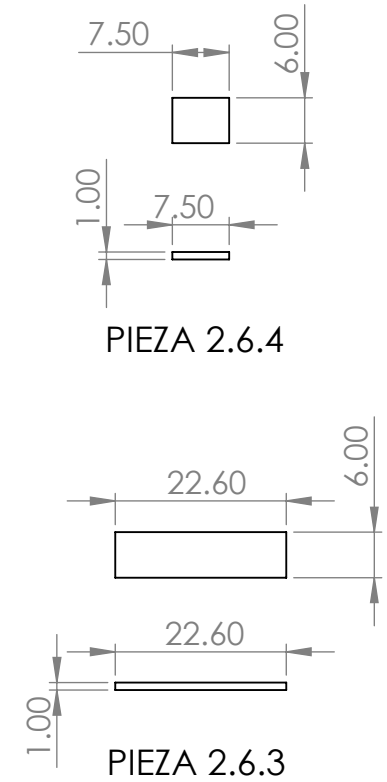
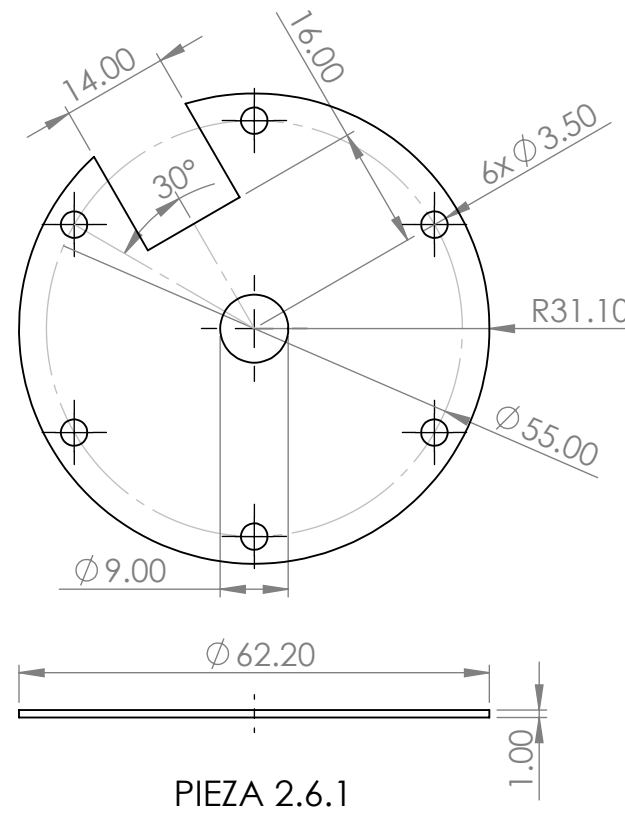
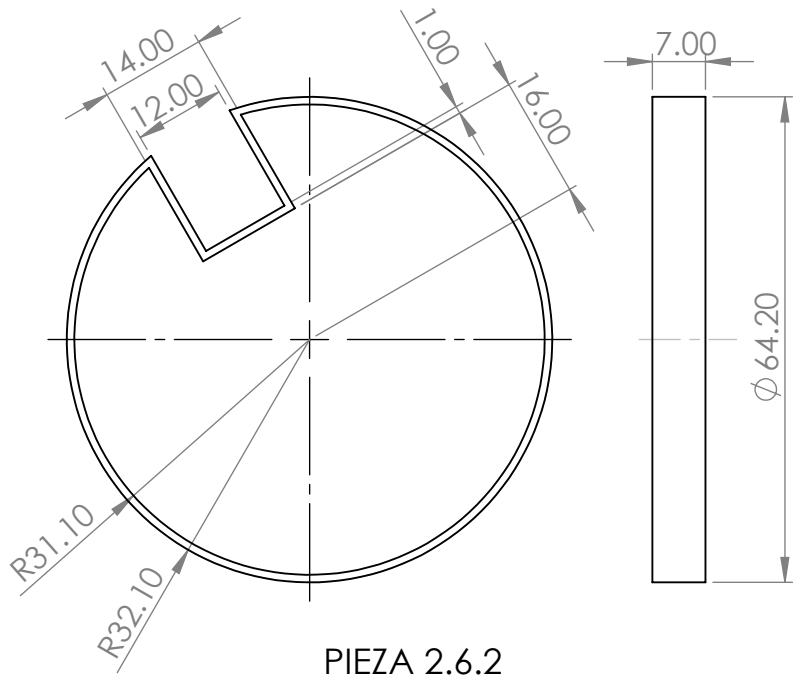
HOJA 36/49



SECCIÓN L-L

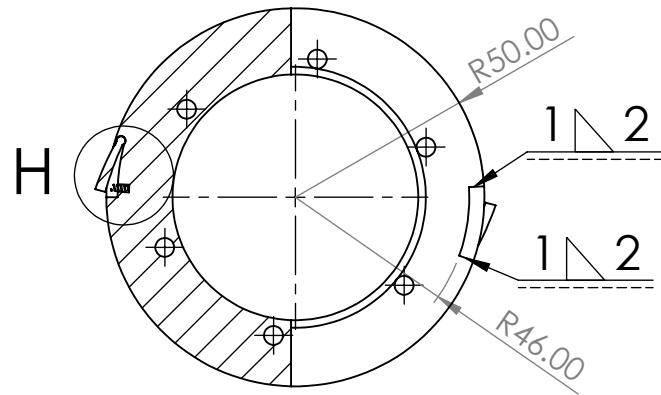


 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		
FECHA: 10/10/20 ESCALA: 1:1 UNIDADES: mm		TITULO: PIEZA 2.5.6. PLATO SUJETADOR		
A4		AUTORES: IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA REVISAR: ING. RICARDO JAIMES		
		PLANO 1.2.6	HOJA 37/49	

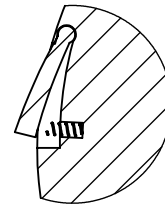
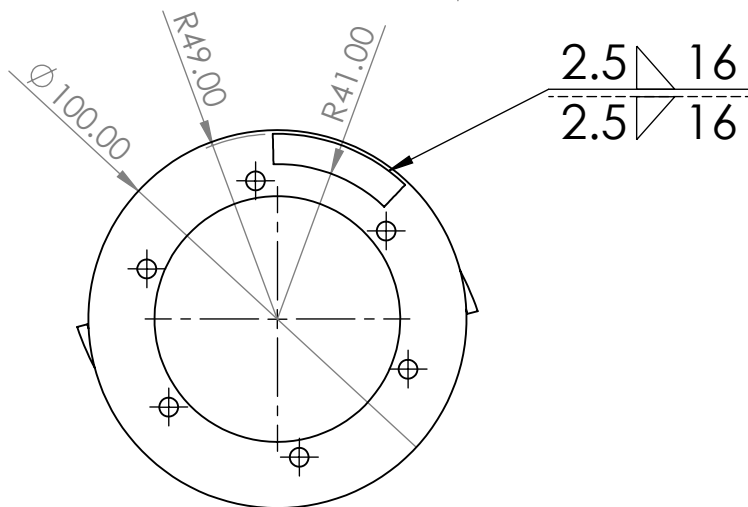
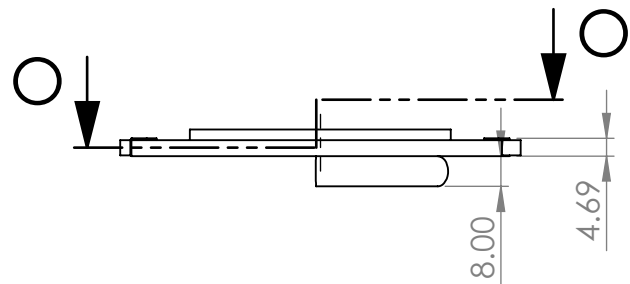


NOTA: TODAS LAS LAMINAS SON DE ACERO AISI 1020 Y TIENE UN ESPESOR DE 1MM (CALIBRE 19)

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		
FECHA: 10/10/20		TITULO:		
ESCALA: 1:1		PIEZA 2.5.6. PLATO SUJETADOR		
UNIDADES: mm		AUTORES: IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA		
A4		REVISIA: ING. RICARDO JAIMES	PLANO 1.2.6.C	HOJA 38/49

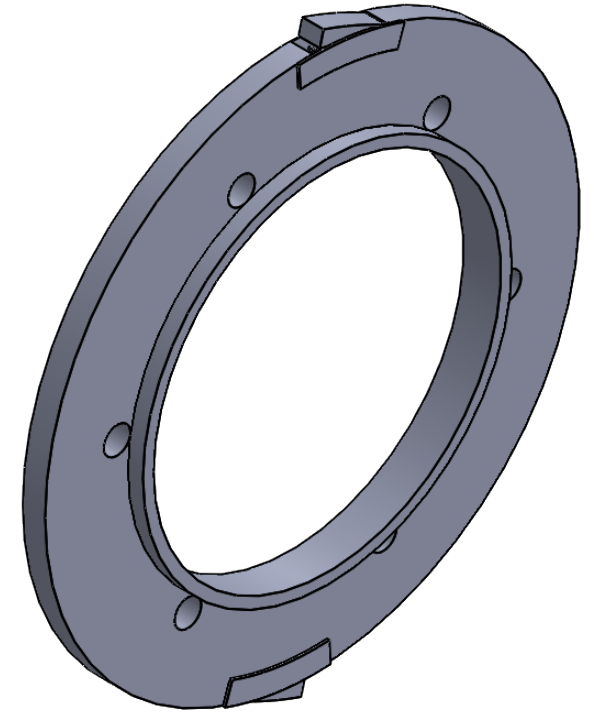


SECCIÓN O-O



DETALLE H

ESCALA 1:1



ESCALA 1:1



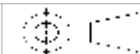
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10/10/20

ESCALA: 1:2

UNIDADES: mm

A4



TITULO:

PIEZA 2.5.7. PLATO RESORTE-TRINQUETE

AUTORES:

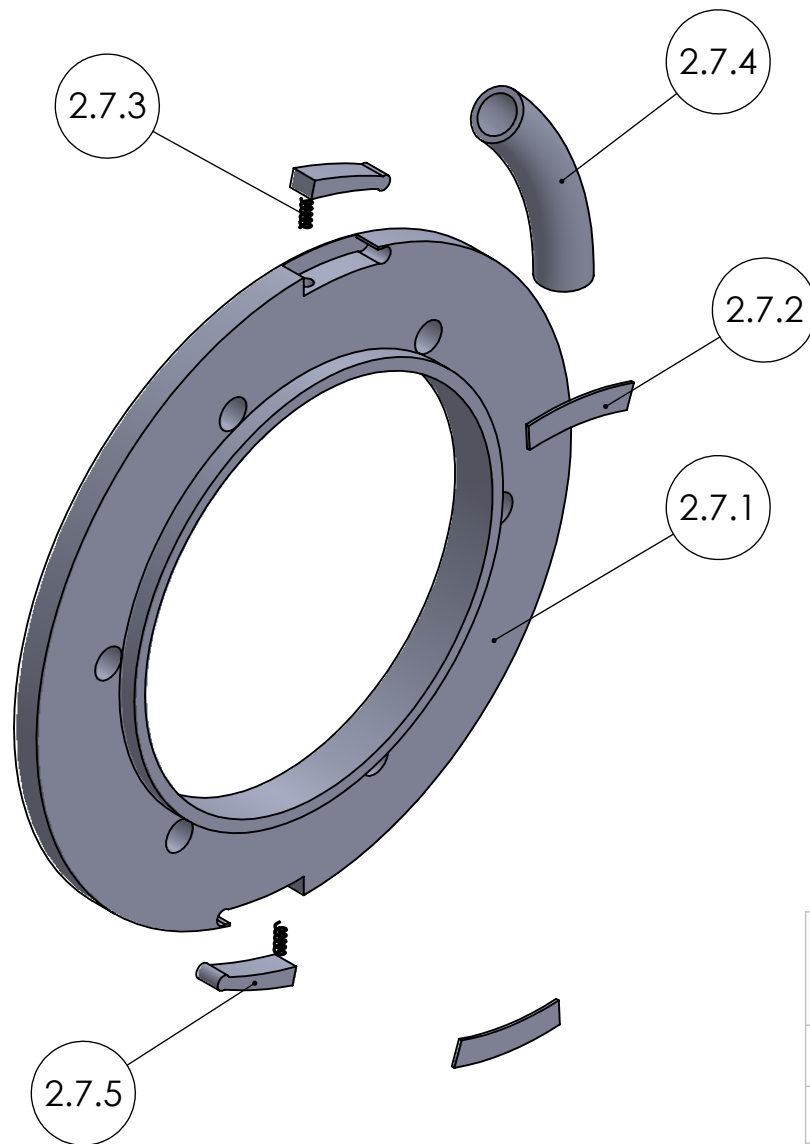
IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA

REVISA:

ING. RICARDO JAIMES

PLANO 1.2.7

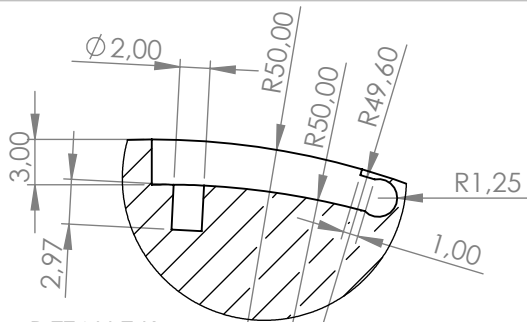
HOJA 39/49



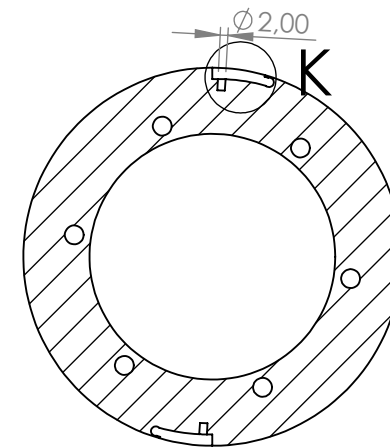
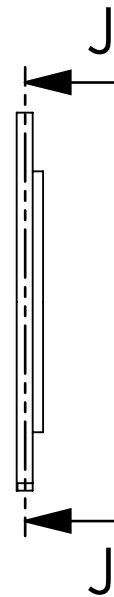
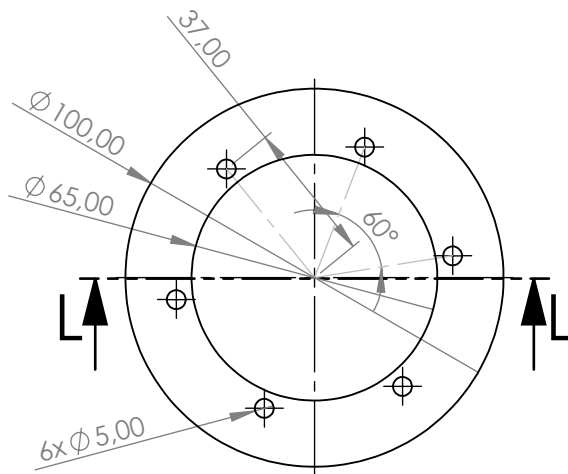
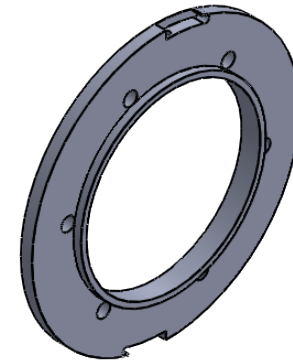
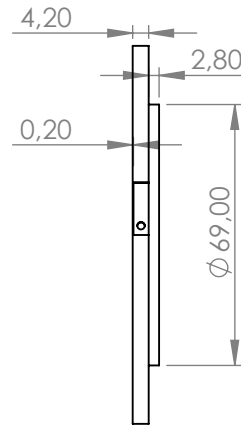
N°	NOMBRE	CANT.	OBSERVACIONES
2.7.1	PLATO TRINQUETE	1	ACERO AISI 1020
2.7.2	TAPA TRINQUETE	2	ACERO AISI 1020
2.7.3	RESORTE TRINQUETE	2	ACERO AISI 1020
2.7.4	ACOPLE RESORTE	1	ACERO AISI 1020
2.7.5	UÑETA TRINQUETE	2	ACERO AISI 1020

NOTA: LA PIEZA 2.7.4 TIENE MEDIDAS EQUIVALENTES A LAS DE LA PIEZA 2.3.3

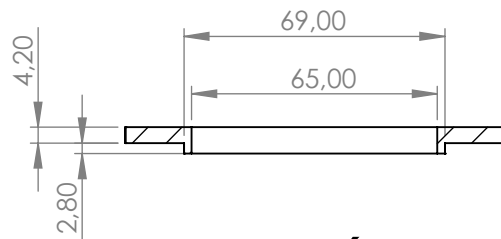
		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10/10/20 ESCALA: 1:1 UNIDADES: mm		TITULO: PIEZA 2.5.7. PLATO RESORTE-TRINQUETE	
A4		AUTORES: IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA	
		REVISAR: ING. RICARDO JAIMES	PLANO 1.2.7.B HOJA 40/49



DETALLE K
ESCALA 2 : 1



SECCIÓN J-J



SECCIÓN L-L



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10/10/20

TITULO:

PIEZA 2.7.1. PLATO TRINQUETE

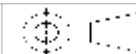
ESCALA: 1:2

UNIDADES: mm

AUTORES:

IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA

A4

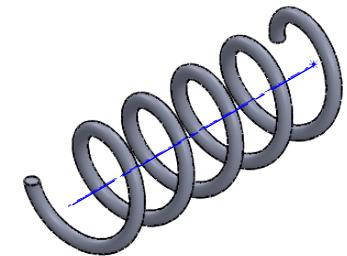
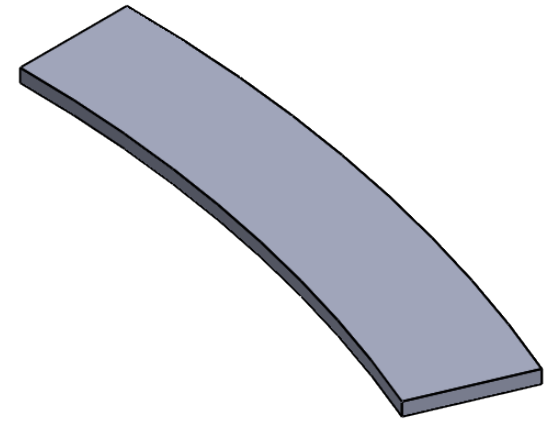
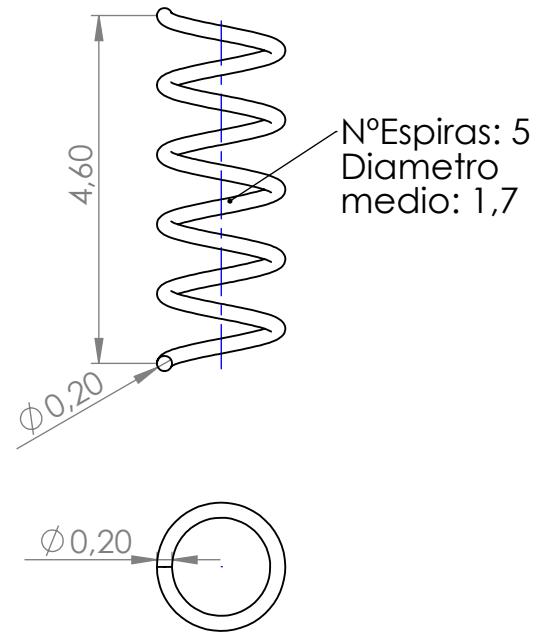
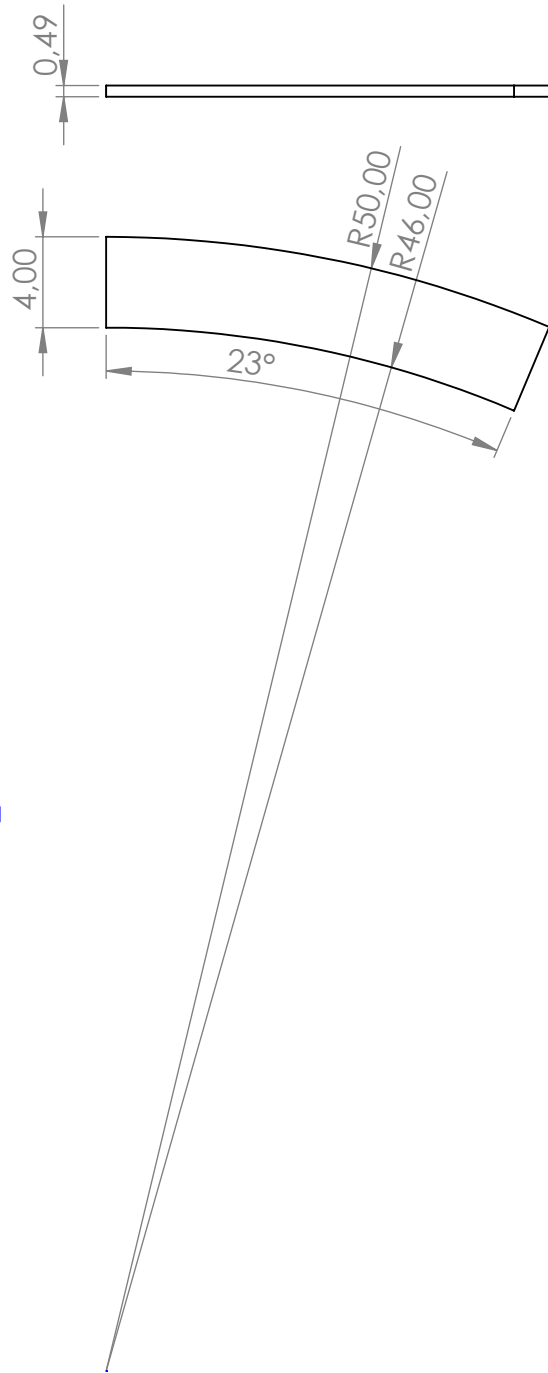


REVISÁ:

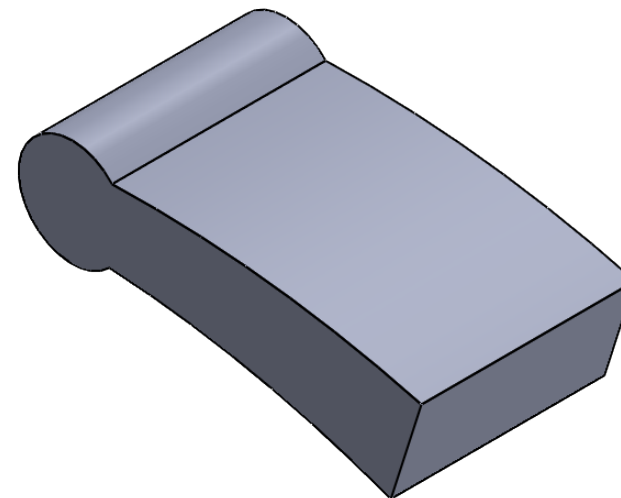
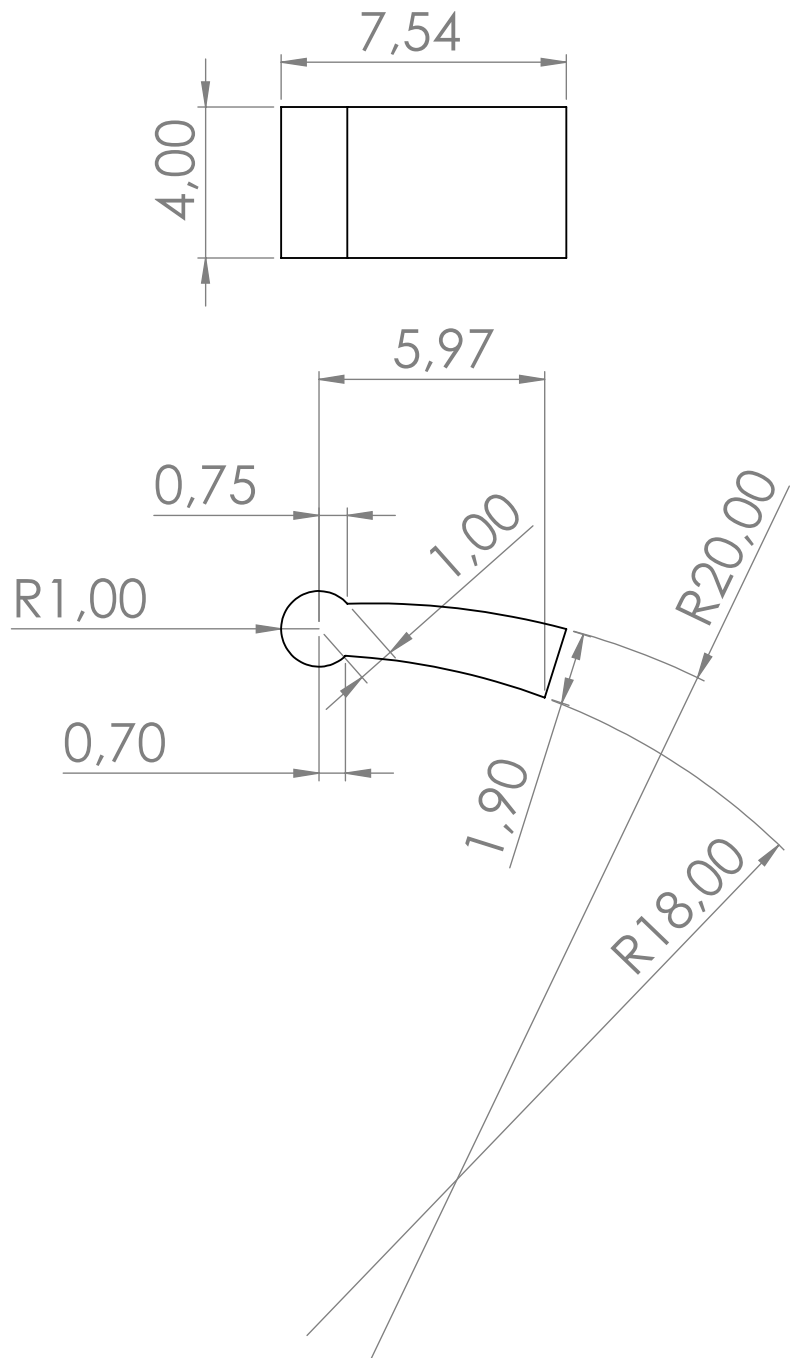
ING. RICARDO JAIMES

PLANO 1.2.7.1

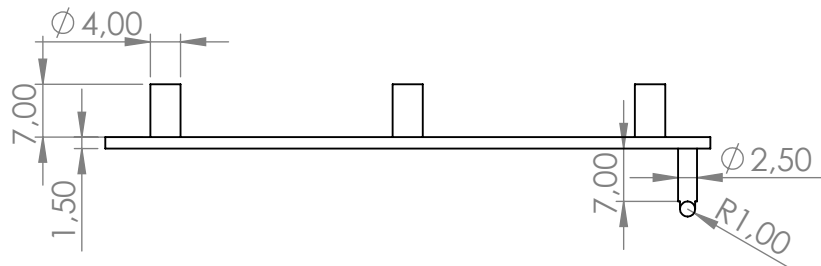
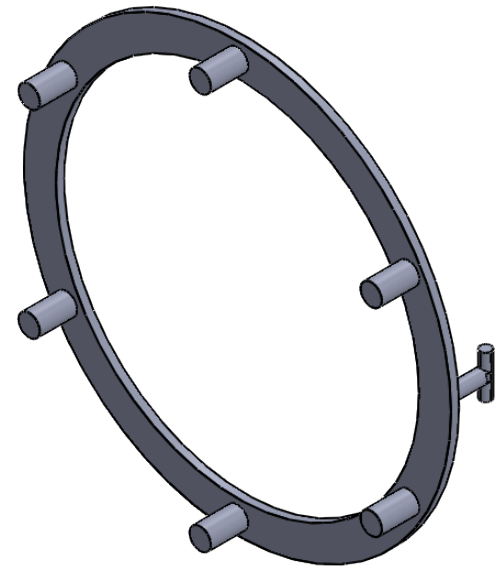
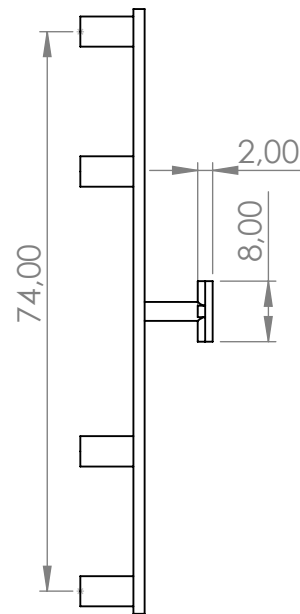
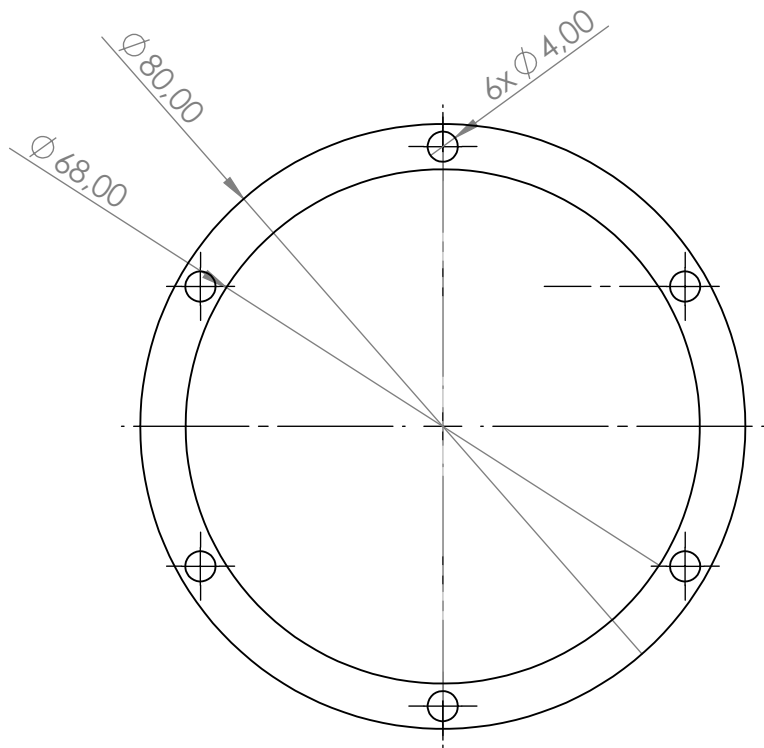
HOJA 41/49



 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		
FECHA: 10/10/20 ESCALA: 3:1, 10:1		TITULO: PIEZA 2.7.2. TAPA DE TRINQUETE Y PLANO 2.7.3. RESORTE TRINQUETE		
UNIDADES: mm		AUTORES: IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA		
A4		REvisa: ING. RICARDO JAIMES	PLANO 1.2.7.2-3	HOJA 42/49



 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		
FECHA: 10/10/20		TITULO: PIEZA 2.7.5. UÑETATRINQUETE MANZANA - PLATO RESORTE		
ESCALA: 5:1		AUTORES: IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA		
UNIDADES: mm		REVISA: ING. RICARDO JAIMES		
A4		PLANO 1.2.7.5	HOJA 43/49	



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10/10/20

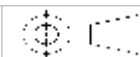
TITULO:
PIEZA 2.8 RETENEDOR

ESCALA: 1:1

UNIDADES: mm

AUTORES:
IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA

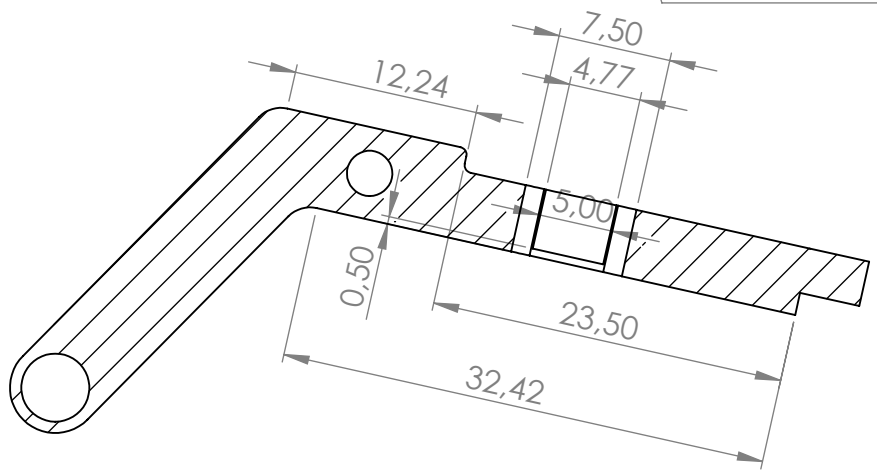
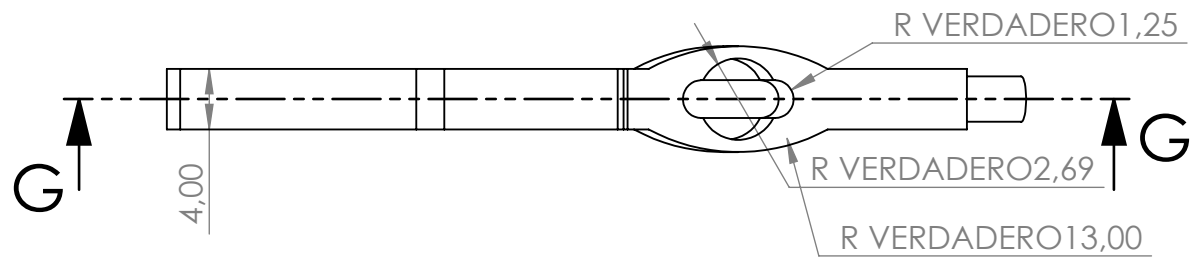
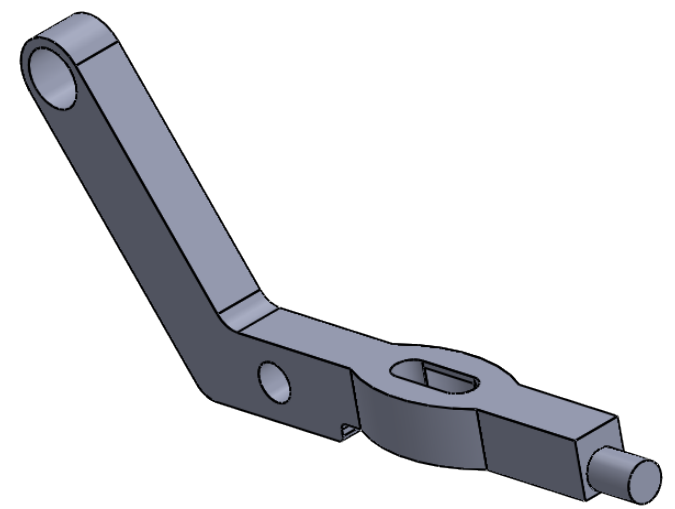
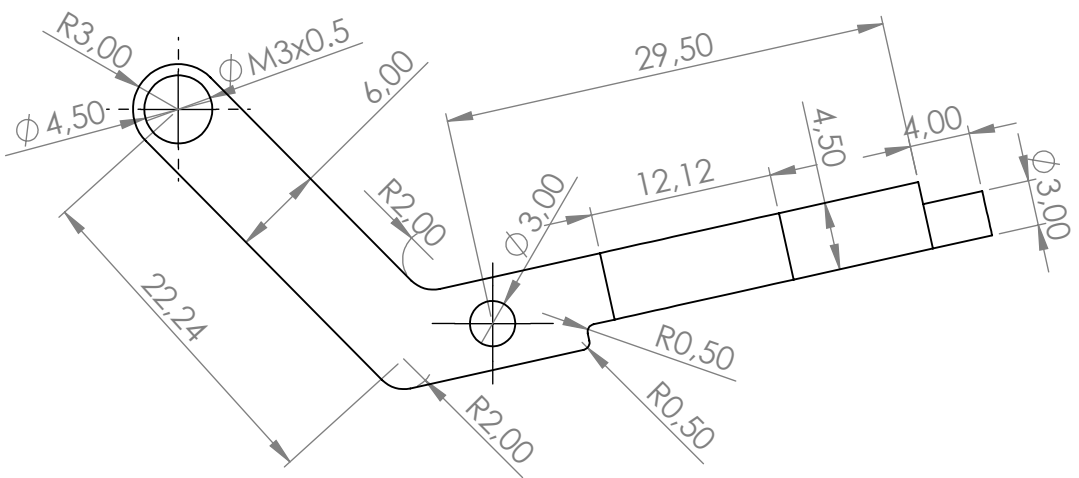
A4



REVISÁ:
ING. RICARDO JAIMES

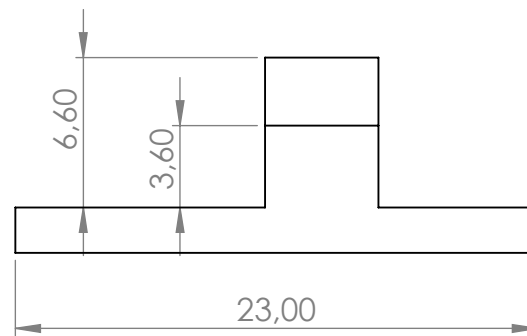
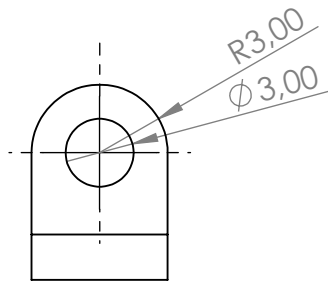
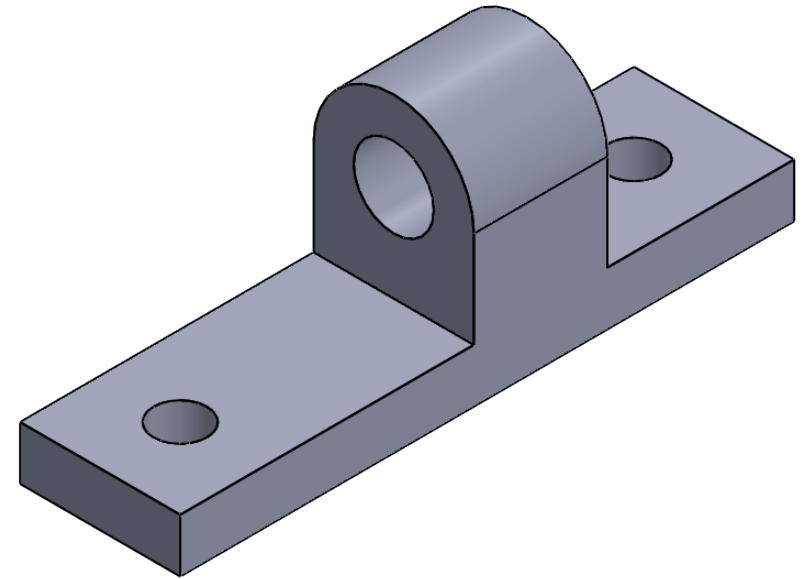
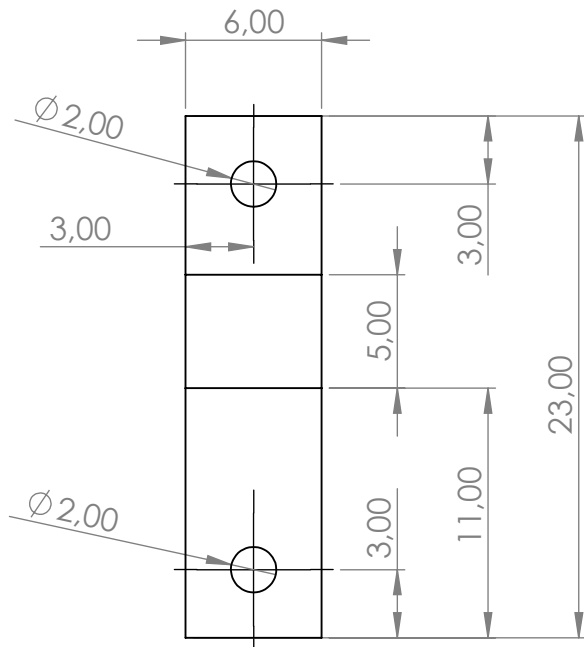
PLANO 1.2.8

HOJA 44/49

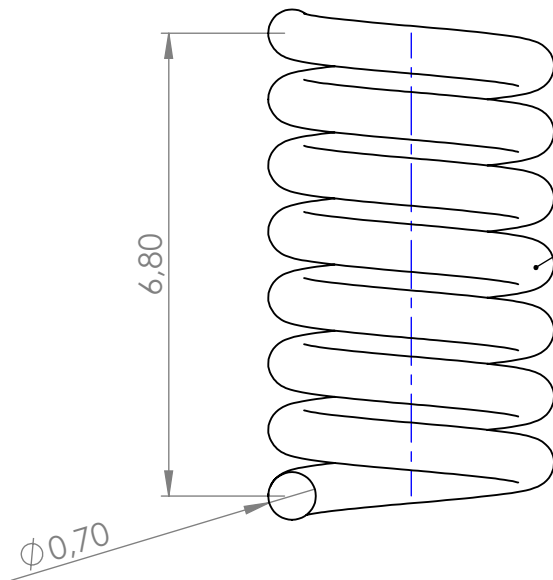


SECCIÓN G-G

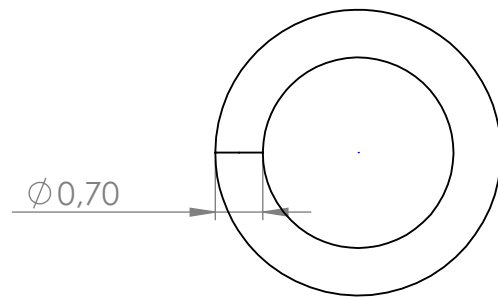
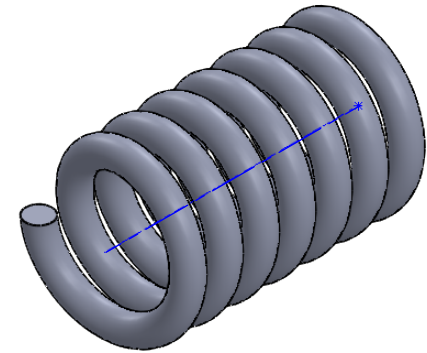
 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		
FECHA: 10/10/20		TITULO: PIEZA 2.9. PALANCA FRENO		
ESCALA: 2:1		AUTORES: IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA		
UNIDADES: mm		REVISA: ING. RICARDO JAIMES		
A4		PLANO 1.2.9	HOJA 45/49	



 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		
FECHA: 10/10/20		TITULO: PIEZA 2.10. SOPORTE PALANCA		
ESCALA: 3:1		AUTORES: IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA		
UNIDADES: mm		REVISA: ING. RICARDO JAIMES		
A4		PLANO 1.2.10	HOJA 46/49	



Nº Espiras: 7
 Diametro
 medio: 3.5



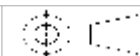
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10/10/20

ESCALA: 9:1

UNIDADES: mm

A4



TITULO:

PIEZA 2.12. RESORTE EMPUJE

AUTORES:

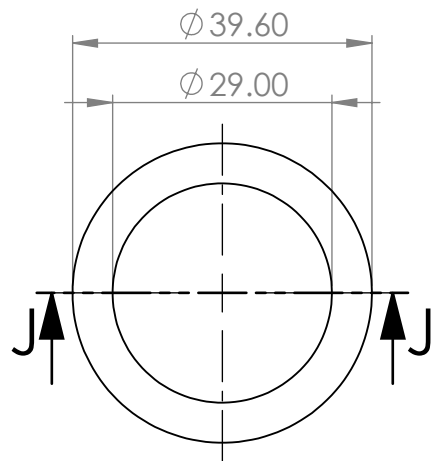
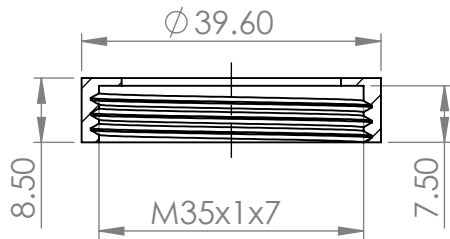
IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA

REVISÁ:

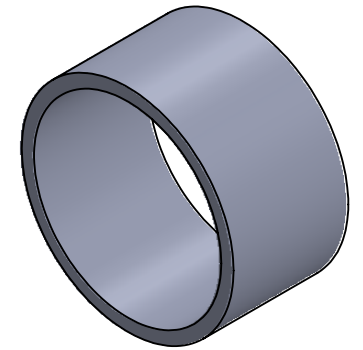
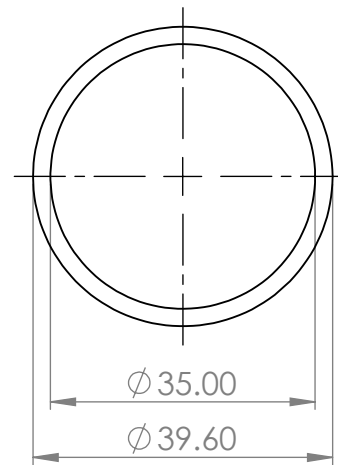
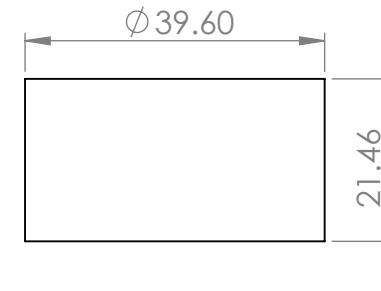
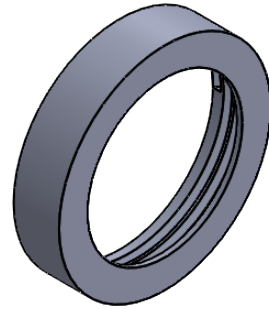
ING. RICARDO JAIMES

PLANO 1.2.12

HOJA 48/49



PIEZA 2.14



PIEZA 2.13

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		
FECHA: 10/10/20		TITULO:		
ESCALA: 1:1		PIEZA 2.13 FIJADOR RODAMINETO INTERNO Y PIEZA 2.14 FIJADOR RODAMIENTO ROSCADO		
UNIDADES: mm		AUTORES: IVAN RENGIFO Y ANDRES SANTANA		
A4		REVISIA: ING. RICARDO JAIMES	PLANO 1.2.13	HOJA 49/49