



Diseño y fabricación de un prototipo funcional de un sistema de freno regenerativo aplicado en vehículos para la Universidad Antonio Nariño

Jean Marco Ortega Joya

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Bogotá, Colombia
2021

Diseño y fabricación de un prototipo funcional de un sistema de freno regenerativo para aplicado en vehículos para la Universidad Antonio Nariño

Jean Marco Ortega joya

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Mecánico

Director (a):

Ing. Diego Pardo Amaya M.Sc.

Línea de Investigación:

Energías renovables, eficiencia energética y energía en el transporte (REM)

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá, Colombia

2021

A mi padre por su apoyo incondicional en todo momento, a mi madre por todo ese amor que me brinda para mi bienestar.

Jean Marco Ortega Joya

Agradecimientos

Un gran agradecimiento a mis padres German ortega y Janeth joya que siempre me apoyan y me brindan su amor incondicional, ya que ven en mi un gran potencial y se esmeran cada día en poder darme las herramientas y valores, para poder aprovecharlas para mi beneficio.

A mi hermana Alejandra Ortega, que me brinda unas palabras de aliento y alegrías en momentos donde más lo necesito.

A mi abuela María Jaime, que siempre me brinda su cariño y apoyo en todo proyecto o meta que me propongo emprender.

Resumen

El reciclaje y eficiencia energética es un tema que está necesitando el mundo en un futuro, ya que los recursos son limitados, por tal razón la universidad Antonio Nariño sede sur a tratado de inculcar en sus estudiantes en este tema , por lo cual, se crea este prototipo de freno regenerativo, donde con el fin de crear un elemento didáctico de aprender cómo se puede reciclar energías en máquinas de uso cotidiano como los vehículos de transporte, y con el fin de que los estudiantes o usuarios de este prototipo entiendan y se motiven a posiblemente, crear su propios proyectos con esta temática como futuros ingenieros. En el proyecto se verá el desarrollo de la creación y diseño de prototipo con el objetivo de costo-beneficio para hacerlo fácil de mantener y replicar, también procurando la seguridad de este mismo con las personas, hasta la experimentación de este en su modelo final. El prototipo está basado en el freno regenerativo de vehículos eléctricos e híbridos, por tanto, se podrá comparar y hacer análisis de cuanta energía produce en inercia y cuanta de esta energía fue aprovecha en la frenada regenerativa, esto también lo hará el estudiante o usuario que maneje o interactúe con el prototipo, ya que en el anexo cuenta con unas guías de experimentación para resolver. En la experimentación para puesta a punto del prototipo se realizaron varias pruebas y se tomaron las ultimas 5 para promediar los datos y comparar los resultados, obteniendo un aprovechamiento en el volante de un promedio en todas las velocidades superior a 80% y en el aprovechamiento del sistema de frenado regenerativo de un 2%, obteniendo un voltaje máximo de 17.5V y un amperaje máximo de 0.95A a la velocidad máxima del prototipo que es 35Km/h a 40Km/h con un motor de 24/12V.

Palabras clave:

Reciclaje y eficiencia de energía, regeneración, freno regenerativo, elemento didáctico, prototipo.

Abstract

Recycling and energy efficiency are matters that the world needs for its future since its resources are limited, regarding that Universidad Antonio Nariño (south branch) has tried to instill awareness in its students on this matters, for which, regenerative brake prototype is created, in order to create a didactic element for learning how energy can be recycled in everyday use machines like transportation vehicles also for motivating this prototype users or students to create their own projects related to this aspect; like the future engineers that they are. The project will be the prototype creation and design development. With the objective of a cost-benefit relationship that makes it easy to be maintained and replicated, also ensuring its safety with people, until the experimentation on its final model. The prototype is based on the regenerative brakes from electric and hybrid vehicles, therefore it will be possible to compare and make an analysis of how much energy it produces in inertia and how much of this energy was used in regenerative brakes, this will also be done by the student or drivers or those who will interact with the prototype, since in the annex some experimentation guides will be found to be solved. In the experimentation to fine-tune the prototype, several tests were carried out and the last 5 were taken to take the average data and compare the results, obtaining an average benefit greater than 80% at the wheel from all speeds in average and a 2 % benefit in the use regenerative braking system, obtaining a maximum voltage of 17.5V and a maximum amperage of 0.95A at the maximum speed of the prototype which is 35Km/h to 40Km/h with a 24/12V motor.

Keywords:

Recycling and energy efficiency, regeneration, regenerative brake, didactic element, prototype.

Contenido

Resumen.....	5
Contenido.....	7
Índice de figuras.....	10
Índice de tablas.....	12
1. Introducción.....	17
1.1 Planteamiento del problema.....	18
1.2 Justificación.....	18
1.3 Objetivos.....	19
1.3.1 Objetivo general.....	19
1.3.2 Objetivos específicos.....	19
2. Marco teórico.....	20
2.1 Eficiencia y rendimiento vehicular.....	20
2.1.1 Eficiencia vehicular.....	20
2.2 Vehículos eléctricos.....	21
2.3 Vehículos híbridos.....	24
2.3.1 Clasificación de vehículos híbridos.....	24
2.4 Vehículos con pilas de hidrógeno.....	26
2.5 Frenos regenerativos.....	26
2.6 Acumuladores de energía en vehículos.....	28
2.6.1 Batería.....	28
2.6.2 Supercapacitores.....	30
2.7 Movimiento rotatorio.....	30
2.7.1 Velocidad lineal.....	30
2.7.2 Velocidad angular.....	31
2.7.3 Momento de inercia rotacional.....	31
2.7.4 Energía cinética rotacional.....	32
2.7.5 Trabajo rotacional.....	33
2.7.6 Porcentaje de aprovechamiento de energía inercial.....	33
2.8 Análisis de esfuerzos para elementos mecánicos.....	34
2.8.1 Esfuerzos directos: tensión y compresión.....	34
2.8.2 Esfuerzo cortante directo.....	34
2.8.3 Esfuerzo cortante a torsional.....	34
2.8.4 Esfuerzo cortante vertical.....	35
2.8.5 Esfuerzo debido a flexión.....	35
2.9 Análisis de frecuencia natural y velocidad crítica.....	36
2.9.1 Frecuencia natural.....	36
2.9.2 Velocidad crítica en un eje.....	36

3.	Identificación de variables para diseño preliminar	37
3.1	Características iniciales para el diseño preliminar del prototipo de freno regenerativo	37
3.2	Elementos para la construcción del prototipo	38
3.2.1	Motor impulsor preliminar.....	39
3.2.2	Batería o fuente de alimentación preliminar	40
3.2.3	Volante de inercia preliminar	41
3.2.4	Sistema de transmisión de potencia preliminar	42
3.2.5	Motor generador o alternador preliminar.....	42
3.2.6	Mecanismo de acople y espacio de apartado preliminar	43
3.2.7	Pedales de prototipo preliminar	43
3.2.8	Estructura soporte del prototipo preliminar	44
4.	Cálculos y modelamientos matemáticos del prototipo	45
4.1	Volante de inercia.....	45
4.1.1	Cálculos para selección de motor impulsor de volante de inercia.....	46
4.1.2	Inercia y energía cinética producida por el volante	49
4.1.3	Aprovechamiento de energía cinética de la rueda conductora	50
4.2	Base o soporte del sistema.....	52
4.3	Calculo estático de fuerzas en la estructura sección barras A, B, C, y D.....	53
4.3.1	Cargas en el eje del volante de inercia.....	54
4.3.2	Análisis estático en el conjunto de barras AB y CD.....	56
4.4	Cálculos y modelamiento de diseño del conjunto mecánico de acople para generación	60
4.4.1	Cálculos de palanca para barra del conjunto	62
4.4.2	Análisis estático de la barra del conjunto	63
4.4.3	Cálculos del eje del fulcro de la barra palanca	64
4.5	Análisis de uniones soldadas	65
4.5.1	Tipo de electrodo	66
4.5.2	Tipo de soldadura.....	66
4.5.3	Tamaño mínimo de la soldadura.....	66
4.6	Diseño de transmisión de potencia por cadena para el prototipo	66
5.	Modelamiento CAD	69
5.1	Calculo estático de fuerzas en la estructura sección barras A, B, C, y D en SOLIDWORKS.....	69
5.2	Análisis estático del eje del volante de inercia.....	72
5.3	Análisis de frecuencia en el eje de volante para calcular velocidad critica.....	73
5.4	Modelo CAD del prototipo.....	75
5.5	Calculo de fuerza o trabajo requerido en el pedal de regeneración.....	75
6.	Construcción y ensamble del prototipo	78
6.1	Componentes y procesos de manufactura	78
6.2	Estructura de soporte del prototipo.....	80
6.3	Montaje mecánico	80
6.4	Panel de control	83
6.5	Carcasa del prototipo y pintado.....	85

6.6	Banco totalmente ensamblado.....	87
6.6.1	Banco ensamblado sin acrílicos.....	87
6.6.2	Banco ensamblado con acrílicos y película protectora.....	88
7.	Experimentación y análisis de resultados.....	89
7.1	Experimentación.....	89
7.2	Análisis de resultados.....	91
7.2.1	Análisis de resultados experimentación volante de inercia.....	91
7.2.2	Análisis de resultados experimentación volante de inercia y rueda regeneradora	93
8.	Conclusiones y recomendaciones	95
8.1	Conclusiones	95
8.2	Recomendaciones.....	96
9.	Bibliografía.....	99
ANEXOS.....		102
Anexo A:	Manual de usuario	102
	MANUAL DE USUARIO PROTOTIPO FRENO REGENERATIVO	102
Anexo B:	Guía de mantenimiento.....	108
Anexo C:	Guías de experimentación estudiantil.....	110
	Guía o practica de experimentación No. 1	110
	Guía o practica de experimentación No.2	118
Anexo D:	Resultados de experimentación	126
	D.1 Experimentación de la energía cinética rotacional entregada por el prototipo.	126
	D.2 Experimentación de la energía cinética rotacional entregada por el prototipo con frenado regenerativo	129
Anexo E:	Planos del prototipo de freno regenerativo	132
	Planos mecánicos.....	132
Anexo F:	Diagramas eléctricos del prototipo de freno regenerativo	134
	Diagrama de voltíamperímetro.....	134
	Diagrama eléctrico de una computadora	134
	Diagrama de motor de transmisión de potencia	135

Índice de figuras

Figura 1: Estructura básica de un vehículo eléctrico [9].	22
Figura 2: Diagrama comparativo de eficiencia entre un motor eléctrico y de combustión [11].	23
Figura 3: Top de autonomía en vehículos eléctricos según la NEDC [9].	24
Figura 4: Esquema de los vehículos híbridos no enchufables [14].	25
Figura 5: Esquema básico de los vehículos híbridos enchufables [14].	25
Figura 6: Esquema básico de un vehículo de pila de hidrogeno [9].	26
Figura 7: Sistema de un freno regenerativo de un del modelo eléctrico ZOE de Renault [14].	28
Figura 8: Diagrama básico del funcionamiento de una batería [9].	28
Figura 9: Momento de inercia cilindro hueco [19].	31
Figura 10: Particula de un cuerpo en rotacion [19].	32
Figura 11: Ilustraciones de A_p y y , empleados para calcular Q de tres perfiles [20].	35
Figura 12: Distribución de esfuerzos sobre la sección de la viga [20].	36
Figura 13: Diseño idealizado para del prototipo de freno regenerativo.	37
Figura 14: Motor 100W AC 120V de máquina de coser casera [24].	40
Figura 15: Sistema de accionamiento por pedal de una maquina de confección.	44
Figura 16: Diseño preliminar del soporte estructural de prototipo de freno regenerativo.	52
Figura 17: Medidas preliminares para cálculos y modelamientos del soporte estructural en mm.	53
Figura 18: Imagen de referencia para ubicación de las uniones AB y CD que soportan el volante de inercia.	54
Figura 19: Cargas sometidas al eje de rotación que soporta el volante de inercia.	55
Figura 20: Caso de viga específico con empotramiento de lado a lado [20].	55
Figura 21: Unión AB sometida a carga o peso de volante.	56
Figura 22: Barra B sometida a cargas que ejerce el volante de inercia.	57
Figura 23: Medidas del perfil de selección preliminar.	58
Figura 24: Medidas para hallar el primer momento con respecto al eje centroidal.	59
Figura 25: Normativa NTC 4526 O ASTM a500 de aceros [24].	60
Figura 26: Diseño idealizado del sistema de regeneración para el prototipo.	61
Figura 27: Pedal del sistema de regeneración.	61
Figura 28: Cargas sometidas a la barra palanca de regeneración.	62
Figura 29: Diagrama de cuerpo libre de la barra palanca de regeneración.	63
Figura 30: Diagrama de cuerpo libre de la barra palanca de regeneración de la parte del motor.	63
Figura 31: Diagrama de cuerpo libre del eje de rotación de la palanca de regeneración	64

Figura 32: ilustracion de union por soldaduras de tipo chaflan [20].	66
Figura 33: Medidas del sistema de transmisión de potencia.	68
Figura 34: Ubicación de las carga del volante en la estructura del prototipo.	69
Figura 35: Parámetros del acero y perfil en la unión AB.	70
Figura 36: Análisis estático en la estructura del prototipo con la carga más impacto.	70
Figura 37: Desplazamiento en el punto de la carga en la unión AB.	71
Figura 38: Factor de seguridad según la carga en la unión AB.	71
Figura 39: Ubicación de parámetros para análisis estático en el eje del volante.	72
Figura 40: Resultados de análisis estático en el eje del volante.	72
Figura 41: Resultados de factor de seguridad para el eje del volante.	73
Figura 42: Ubicación de parámetros para análisis de frecuencia en el eje del volante.	73
Figura 43: Eje con una frecuencia resonante de 9484.7 rad/s.	74
Figura 44: Prototipo de freno regenerativo en fase mecánica.	75
Figura 45: Parámetros para calcular la distancia de la cadena.	76
Figura 46: Distancia de recorrido del pedal con el tornillo de tope.	77
Figura 47: Bastidor o estructura soporte del prototipo.	80
Figura 48: Construcción del sistema del motor para regular la velocidad por pedal.	81
Figura 49: Pruebas de funcionamiento del montaje mecánico del prototipo.	81
Figura 50: Vista del montaje mecánico del prototipo.	82
Figura 51: Vista superior del prototipo.	82
Figura 52: Vista de la acomodación del panel de control del prototipo.	83
Figura 53: Tablero de interacción del prototipo.	84
Figura 54: Vista de panel de interacción de usuario del prototipo totalmente terminado.	85
Figura 55: Recorte captura de la página oficial https://www.uan.edu.co/	86
Figura 56: Proceso de pintura del bastidor y componentes mecánicos del prototipo.	86
Figura 57: Bastidor o estructura soporte del prototipo totalmente pintado.	87
Figura 58: Vistas del prototipo terminado listo para montar acrílicos de seguridad.	87
Figura 59: Vistas del prototipo terminado listo para remover película de protección de los acrílicos de seguridad.	88
Figura 60. Comparación de gráficos velocidad angular contra tiempo recorrido.	92
Figura 61. Comparación de gráficos energía de inercia contra velocidad angular.	92
Figura 62: Voltaje de regeneración Max. Contra velocidad angular promedio.	93
Figura 63. Amperaje de regeneración Max. Contra velocidad angular promedio.	94
Figura 63. Comparación de gráficos de velocidad angular contra velocidad predeterminada.	95

Índice de tablas

Tabla 1: Mix energético eficiencia porcentual de producción y consumo de energía para vehículos [7].	20
Tabla 2: Medida de eficiencia/costo para algunos vehículos con diferente suministro de energía [8].	21
Tabla 3: Comparación de propuestas para motor impulsor.	39
Tabla 4: Comparación de propuestas batería o fuente de alimentación.	40
Tabla 5: Comparación de propuestas para volante de inercia.	41
Tabla 6: Comparación de propuestas para motor generador.	43
Tabla 7: Resultado de frecuencias resonantes para el eje del volante.	74
Tabla 8: Componentes y procesos de manufactura del prototipo.	79
Tabla 9: Parámetros del volante de inercia para hacer cálculos.	89
Tabla 10: Cálculos de experimentación para energía cinética rotacional promedio de 5 pruebas.	90
Tabla 11: Parámetros para cálculos y experimentación rueda de regeneración	90
Tabla 12: Cálculos de experimentación promedio de 5 pruebas de volante de inercia y rueda regeneradora.	91
Tabla 13: Porcentaje promedio de volante en inercia libremente.	91
Tabla 14: Porcentaje promedio de volante en inercia con frenado regenerativo.	93
Tabla 15: Parámetros para experimentación energía cinética entregada por el prototipo.	126
Tabla 16: Prueba No.1 de experimentación energía cinética entregada por el prototipo.	126
Tabla 17: Prueba No.2 de experimentación energía cinética entregada por el prototipo.	127
Tabla 18: Prueba No.3 de experimentación energía cinética entregada por el prototipo.	127
Tabla 19: Prueba No.4 de experimentación energía cinética entregada por el prototipo.	128
Tabla 20: Prueba No.5 de experimentación energía cinética entregada por el prototipo.	128
Tabla 21: Promedio de valores y resultados de 5 pruebas de la Tabla 16 a Tabla 20 ..	129
Tabla 22: Parámetros para experimentación frenado regenerativo del prototipo.	129
Tabla 23: Prueba No.1 de experimentación energía frenado regenerativo por el prototipo.	130
Tabla 24: Prueba No.2 de experimentación energía frenado regenerativo por el prototipo.	130

Tabla 25: Prueba No.3 de experimentación energía frenado regenerativo por el prototipo.	130
Tabla 26: Prueba No.4 de experimentación energía frenado regenerativo por el prototipo.	130
Tabla 27: Prueba No.5 de experimentación energía frenado regenerativo por el prototipo.	131
Tabla 28: Promedio de valores y resultados de 5 pruebas de la Tabla 23 a la Tabla 27	131

Lista de Símbolos

Símbolo	Término
---------	---------

”	Pulgadas
ρ	Densidad
σ	Esfuerzo directo
τ	Torque
τ_{\max}	Torque máximo o momento cortante máximo
ω	Velocidad angular
ω_{\max}	Velocidad angular máxima
$\sigma_{\max} =$	Esfuerzo de flexión máximo
$\bar{y} =$	Distancia del eje neutro de la sección al centroide del área A_p
$\Delta x =$	Variación de distancia
$\Delta t =$	Variación de tiempo

Lista de abreviaciones

Símbolo	Término
---------	---------

CAD	Diseño asistido por computadora (computer-aided design)
EV	Vehículo eléctrico (electric vehicle)
HEV	Vehículo híbrido (hybrid Electric vehicle)
IC	Vehículo gasolina (internal combustion)
ICE	Vehículos de combustión interna (internal combustion engine)
PHEV	Vehículo híbrido enchufable (plug-on- hybrid electric vehicle)
REEV	Vehículo eléctrico de autonomía extendida (range extended electric vehicle)
SEV	Vehículo súper eficiente (Super Efficient Vehicle)

Símbolos con las letras latinas

Símbolo	Término		
A	Área	M	Magnitud del momento de flexión en esa sección
A_p	Parte del área de la sección	m	Metros
A_s	Área transversal	m	Masa
c	Radio de superficie externa del eje	mc	Masa de la rueda conductora
D	Diámetro	M_{letra}	Momento en algún punto especificado con una letra
D_c	Diámetro de la rueda conductora	MPa	Mega pascales
D_p	Diámetro del piñón	N	Newton
D_{pg}	Diámetro del piñón grande	n	Números de revoluciones
D_{pp}	Diámetro del piñón pequeño	Nm	Newton por metro
E_c	Energía cinética	$N_{\text{número}}$	Número de dientes del piñón del subíndice señalado
E_k	Energía cinética rotacional	p	Paso de cadena
E_p	Energía potencial	P	Perímetro
F	Fuerza	Pa	Pascales
F_{letra}	Fuerza en algún punto especificado con una letra	Pc	Perímetro de la rueda conductora
I	Momento de inercia rectangular	P_{req}	Potencia requerida
I_m	Momento de inercia	pulg	Pulgadas
J	Joule	Q	Primer momento con respecto al eje centroidal del área de la sección transversal
J	Momento de inercia polar	R	Reacción de carga o fuerza
Km	Kilómetros	r	Radio
kg	Kilogramos	rad	Radianes
L	Longitud	r_c	Radio de la rueda conductora

rev	Revoluciones	W_c	Peso de la rueda conductora
rpm	Revolución por minuto	W_{eje}	Carga del eje
r_{pp}	Radio piñón pequeño	W_{lineal}	Trabajo lineal
T	Fuerza torsional	W_{seje}	Carga del eje con un factor de seguridad
t	Espesor del perfil	$W_{rotacional}$	Trabajo rotacional
V	Fuerza de corte transversal a la viga	W_{tc}	Trabajo torsional de la rueda conductora
v	velocidad	W_t	Trabajo torsional
s	Segundos		
W	Peso		

1. Introducción

Como en el planeta se ve en una crisis de contaminación por la producción de energías, que se consumen en el cotidiano vivir de las personas, entonces se genera la necesidad de plantear energías alternativas y mejorar la eficiencia de las energías consumidas en los mecanismos del uso común. Por consiguiente, se ha implementado la construcción de nuevas tecnologías que logren solventar este problema y un descubrimiento que ha revolucionado es el freno regenerativo o sistema KERS (kinetic energy recovery system), generando un gran aporte en la fabricación de vehículos eléctricos e híbridos que ayudan al problema, consumiendo energía producida de manera sustentable y con la implementación del freno regenerativo en esto su consumo es más eficiente [1], ya que el mecanismo adaptado en el vehículo aumenta la eficiencia energética de éste, al convertir la energía cinética en eléctrica en vez de que está se desperdicie al convertirse en calor cuando se frena un automóvil [2], esto no solo generando un beneficio al conductor por costos de recarga de energía para su vehículo y desgaste de freno convencional, sino también es un gran beneficio para el planeta ya que reduce algunas emisiones contaminantes causadas por el ciclo de combustión que producen los automóviles [3] (monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxido de nitrógeno, materiales particulados, etc. [4].)

Gracias a los frenos regenerativos se ahorra en combustible en los vehículos convencionales, se aumenta la autonomía en los carros eléctricos e híbridos y se logra que los frenos tradicionales se desgasten con mucha menos facilidad, por lo que, en consecuencia, el mantenimiento es menos reiterado y más rentable [5].

En los sistemas de freno regenerativo se utiliza un motor eléctrico, que trabajando a la inversa se convierte en un generador eléctrico. De esta manera, el sistema es capaz de convertir la energía cinética del vehículo en energía eléctrica. El funcionamiento del sistema de regeneración en automóviles eléctricos e híbridos por medio de frenado, empieza cuando se pisa el pedal del freno o se utiliza el freno de motor para disminuir la velocidad de un vehículo, la energía cinética que lleva en ese momento se transmite al generador eléctrico del freno regenerativo, haciendo que esté trabaje restando movimiento a la transmisión de las ruedas por ende disminuyendo la velocidad del vehículo y generando electricidad por el principio de inducción electromagnética o ley de Faraday. La energía eléctrica se acumula en condensadores o en una batería para funciones posteriores del vehículo como ponerlo en marcha o para alimentar accesorios que el vehículo tenga como por ejemplo el radio.

Los sistemas de freno regenerativo en vehículos híbridos y eléctricos hacen que algunos de estos se manejen con un solo pedal, acelerando al pisarlo y desacelerando o frenado al soltar el pedal. Por tanto, regenerando energía al dejar de presionar el pedal, cuando se va con inercia o en movimiento. En autos híbridos llevan el freno regenerativo en las ruedas o eje de ruedas para mayor eficiencia de la regeneración, para estos sistemas se desactiva el freno cuando la batería está llena o se llega a velocidades mínimas que no generan energía eléctrica por tanto, se utiliza en complemento el frenado hidráulico o convencional que funciona por medio de fricción para detener el vehículo completamente [6].

1.1 Planteamiento del problema

Se ha visto que la universidad Antonio Nariño sugiere el estudio y desarrollo de proyectos con el aprovechamiento de energías menos perjudiciales para el ambiente a sus estudiantes de carreras ingenieriles(mecánica, electromecánica, mecatrónica, ambiental, biomédica e industrial) por medio de sus docentes, semilleros y proyectos relacionados con este concepto de eficiencia energética amigable con el planeta, disponibles al estudiante, ya que un problema que a los futuros ingenieros se enfrentan es como generar proyectos que resuelvan necesidades del diario vivir de la gente con este concepto.

Entonces este proyecto busca enfocar un poco más de esa necesidad, de demostrar cómo funcionan las energías alternativas y eficiencia energética de manera didáctica, dirigida a los estudiantes para que ellos se motiven a indagar un poco más sobre métodos de consumos de energías un poco más amigables con el planeta o como futuros ingenieros se den cuenta como las energías alternativas y la eficiencia energética se está implementando.

1.2 Justificación

Dado al aumento de demanda de mecanismos de uso cotidiano con alta eficiencia en energías limpias, para ayudar al planeta en la lucha con la contaminación y la fomentación de la universidad Antonio Nariño sede sur de éstas a sus estudiantes ingenieriles, para que, en un futuro no muy lejano, se desarrollen proyectos con dichos métodos eficientes de consumo energético más amigable con el ambiente. Se plantea hacer un prototipo funcional de un freno regenerativo para dar un aporte de proyectos didácticos que satisfaga a los estudiantes por saber y conocer un poco más de la implementación y provecho de energías limpias en las necesidades y tecnologías de la humanidad.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Realizar el diseño y la fabricación de un prototipo funcional de un sistema de freno regenerativo, como apoyo didáctico del estudio del aprovechamiento de la energía cinética, en el momento de frenado de un vehículo para la Universidad Antonio Nariño Sede Sur.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Estudio / Cálculos y Variables de Diseño (Analizar y plantear el mejor diseño teniendo en cuenta la idea costo-beneficio para un ciclo de vida largo).
2. Analizar la seguridad funcional del dispositivo y componentes requeridos para garantizar la manipulación y operación de forma controlada.
3. examinar y retroalimentar por software CAD el mecanismo, planos de fabricación y ensamble
4. Ensamblar y probar el funcionamiento para puesta a punto.
5. Elaborar manual del usuario y guías de experimentación para estudiantes con el prototipo final.

2. Marco teórico

2.1 Eficiencia y rendimiento vehicular

2.1.1 Eficiencia vehicular

La eficiencia vehicular es el concepto que se adopta a la hora de medir cuanto el vehículo está aprovechando su suministro de combustibles o energía, para poder realizar su función que es primordialmente transportar su energía almacenada en energía mecánica para dar movimiento al motor y posteriormente al vehículo.

En estudios más convencionales se calcula la energía que puede brindar el combustible o el almacén energético del vehículo en Joule y cuanto de estos se transforman en energía mecánica en las ruedas del vehículo de la misma manera de medida energética en Joule y se ve que los resultados favorecen a los vehículos eléctricos. Los factores en contra comienzan en su autonomía y producción de dicha energía a almacenar para el suministro del vehículo.

La eficiencia vehicular es un factor muy importante al momento de solventar la necesidad de transporte en vehículos privados, pero se deben mirar otros aspectos importantes para el suministro de energía que son los recursos son limitados y la contaminación que se produce a la hora de la producción y transformación de energía en vehículos.

Tipo de vehículo	De la producción al depósito del vehículo (<i>Well-to-Tank</i>)	Eficiencia del vehículo (<i>Tank-to-Wheel</i>)	Eficiencia energética total
Vehículo eléctrico	43% (Proceso de transmisión a electricidad)	67% (incluida eficiencia de carga 83%)	29%
Vehículo diésel	88% (Refinado y transporte)	18%	16%
Vehículo híbrido gasolina HEV	82% (Refinado y transporte)	30%	25%
Vehículo gasolina IC	82% (Refinado y transporte)	15%	12%

Tabla 1: Mix energético eficiencia porcentual de producción y consumo de energía para vehículos [7].

Vehiculo modelo	combustible	potencia.	1/100km	G/kWh •f/litro	100km
Seat León 1.4TGI	gasolina	110	3.8	1,44	5,50 €
Mazda 6 2,0Sk Skyactiv	gasolina	145	5.5		7,90 €
Ferrari 458 Italia 45	gasolina	570	13.3	1,44	19,15 €
Fiat Punto 1.4GIP Bifuel	GLP	77	7	0,74	5,20 €
Opel Corsa 1.3 CDTI	Diesel	95	3.3	1,33	440 €
Audi A4	Diesel	150	4.5		6,00 €
Nissan Qashqai dCi 4x2	Diesel	110	3.8	1.33	5,00 €
Lexus CT200h	Hibrido	136	2.1	1.44	3.00 €
Toyota Prius Plug.In Hybrid	Hibrido enchufable	136	3.6	1.44	5.20 €
VE MEDIO	Eléctrico	96	-	0,136366	1.71
Smart Fortwo EV	Eléctrico	75	-	0,136366	1.66
Nissan leaf	Eléctrico	109	-	0.136366	2,36 €
Tesla Model S	Eléctrico	360	-	0.136366	2.73 €

Tabla 2: Medida de eficiencia/costo para algunos vehículos con diferente suministro de energía [8].

2.2 Vehículos eléctricos

Esta clase de vehículos se caracteriza por ser impulsados por un motor eléctrico que por medio de la ley de inducción electromagnética al aplicarle energía eléctrica esta se transforma en energía mecánica. Los vehículos eléctricos tienen uno o más motores dependiendo su modelo su funcionamiento se basa en tener un sistema de almacenamiento de energía que pueden ser baterías o capacitores recargables por medio de la red eléctrica, ya puede ser de un punto doméstico (de 6 a 10 horas para una carga total) o de punto de carga rápida (30 minutos para una carga al 80% de su capacidad) un sistema de control y componentes básicos para un vehículo convencional [9] [10].

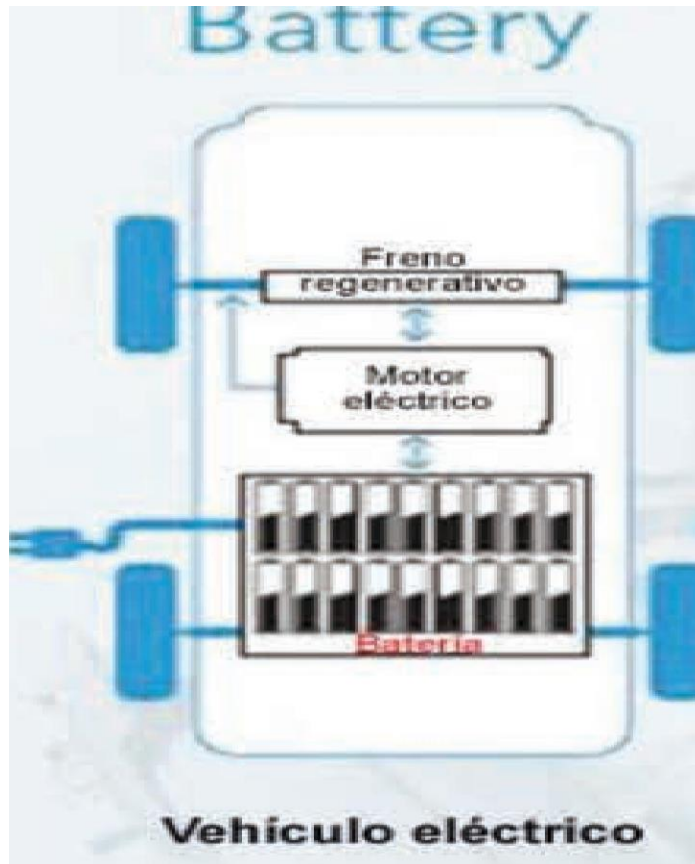


Figura 1: Estructura básica de un vehículo eléctrico [9].

Los vehículos eléctricos son muy conocidos por sus altas eficiencias de 40-70% a comparación de otros tipos de vehículos como los de combustión interna 17-30% y los híbridos 25-60%. Otro beneficio es en el impacto ambiental al disminuir sus contaminaciones al planeta ya que se ve reflejada la contaminación en la generación de energía en su consumo, también el impacto sonoro ya que su ruido en marcha es mínimo.

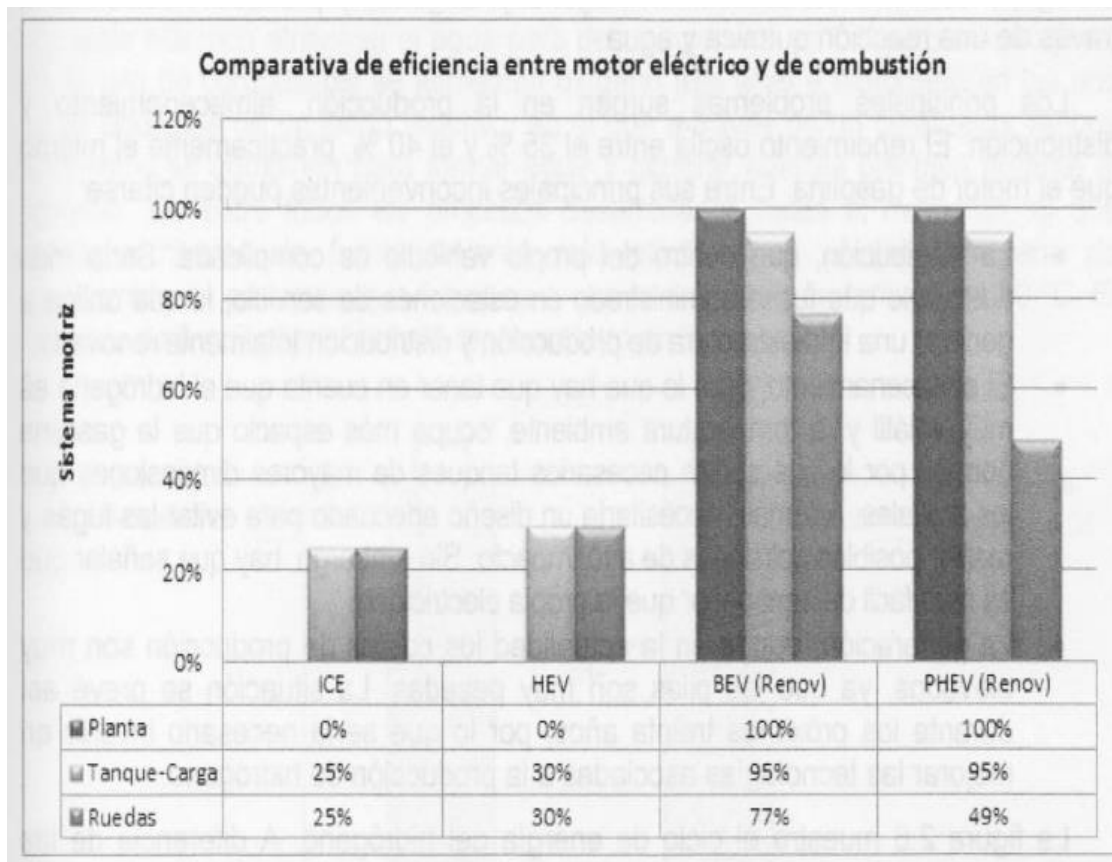


Figura 2: Diagrama comparativo de eficiencia entre un motor eléctrico y de combustión [11].

A lo largo de la historia su gran rival a sido los vehículos de combustión ya que un reto para los vehículos eléctricos está en sus autonomías de recarga y costos de adquisición ya que los vehículos de combustión estos aspectos los favorecen en la actualidad el costo decreciente del petróleo y el mantenimiento periódico, hacen ver los eléctricos como mejor adquisición a futuro ya que los avances tecnológicos hacen vehículos con más autonomía a precios de adquisición más aceptables [10] [11] [12]

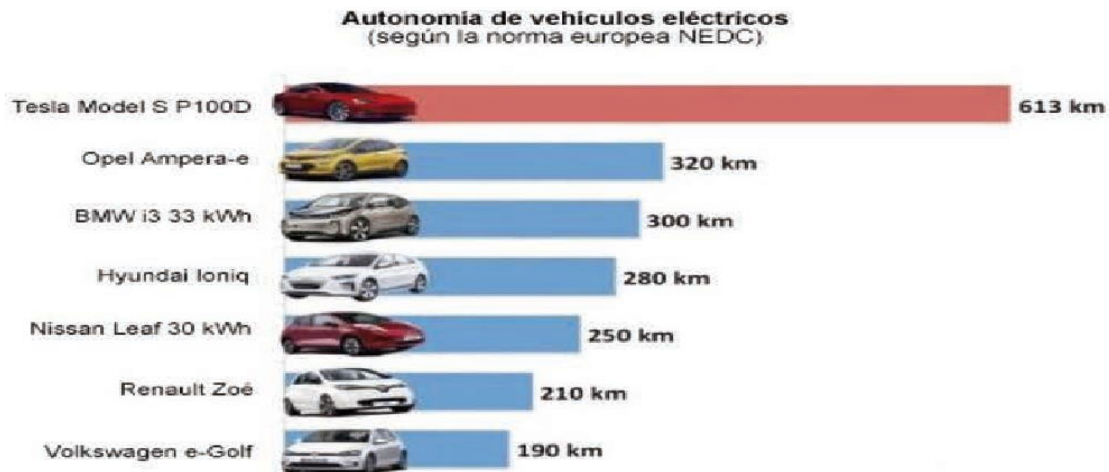


Figura 3: Top de autonomía en vehículos eléctricos según la NEDC [9].

2.3 Vehículos híbridos

Es un mecanismo de transporte que tiene un motor de combustión interna y un motor eléctrico, estos con la capacidad de poder desplazar el vehículo y cumplir sus funciones independientemente de otro según el modelo de vehículo. Los Vehículos híbridos al tener dos motores de diferente suministro energético tienen menos porcentajes en las desventajas de sus motores. Por el motor eléctrico su desventaja de autonomía se reduce parcialmente y por parte de motor de combustión interna su eficiencia y porcentaje de contaminación [13]

2.3.1 Clasificación de vehículos híbridos

- **Vehículos híbridos no enchufables**

Estos vehículos contienen un motor de combustión encargado de la propulsión del vehículo y un motor eléctrico que solo es posible cargarse en frenadas para desacelerar o en bajadas de pendientes. El motor eléctrico en estos vehículos usualmente se suele utilizar para arrancar o sumarle fuerza en pendientes [10, 11].

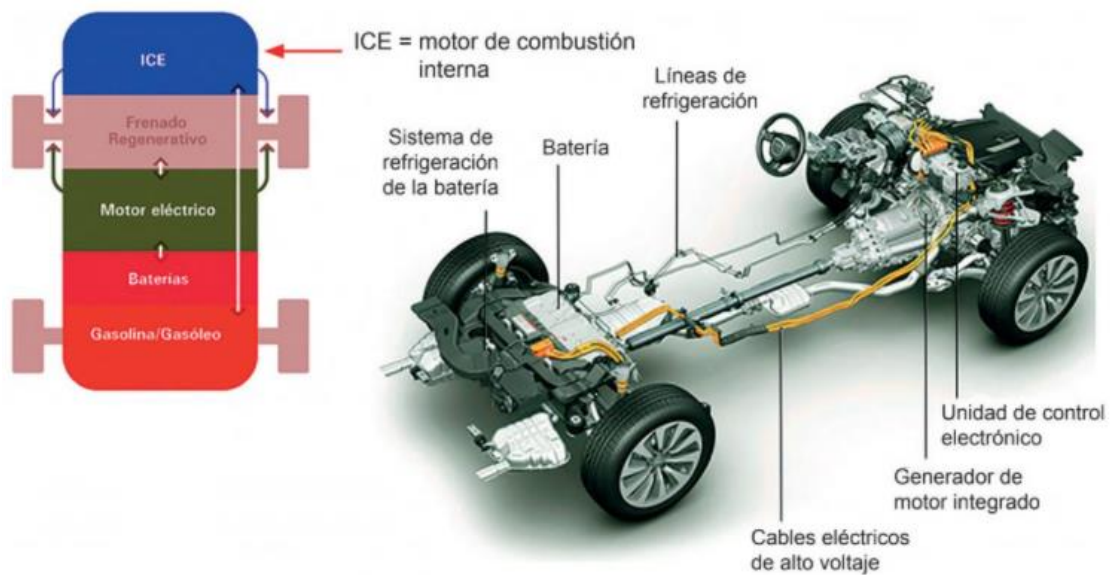


Figura 4: Esquema de los vehículos híbridos no enchufables [14].

- **Vehículos híbridos enchufables**

Estos vehículos coexisten con 2 energías para su propulsión, la energía eléctrica y la energía química de combustibles, ya que si se quiere se puede propulsar el recorrido designado con el motor de combustión interna o el motor eléctrico, esto dependiendo del suministro de energía, esto gracias a que el vehículo se puede conectar a la red eléctrica para cargar las baterías de motor eléctrico sin la dependencia de carga eléctrica por medio de energía cinética generada en el vehículo [10, 11]. En la siguiente figura se puede ver cómo sería un esquema básico de los vehículos híbridos.



Figura 5: Esquema básico de los vehículos híbridos enchufables [14].

2.4 Vehículos con pilas de hidrógeno

Estos vehículos también conocidos fuel-cell son impulsados por un motor eléctrico que se alimenta de la reacción química que genera el hidrogeno al hace electrolisis, se generan electrones produciendo así una corriente eléctrica que sirve para alimentar al motor eléctrico. Para estos vehículos se debe tener un almacén de hidrogeno que luego lo pasan a las pilas de hidrogeno medida que el vehículo lo requiera en su autonomía, para que estas transformen la energía química que este elemento contiene, en energía eléctrica así alimentado el motor para la propulsión del vehículo, de igual manera que los vehículos de combustión se necesitan puntos específicos para el abastecimiento de combustible, que en este caso sería el hidrogeno.

Los vehículos de pila de hidrogeno son amigables con el planeta ya que el único desperdicio que produce en su escape es vapor de agua , las desventajas que tienen este tipo de vehículos son los costos elevados de accesibilidad a las personas y la alta volatilidad del hidrogeno [10] [14] [15].

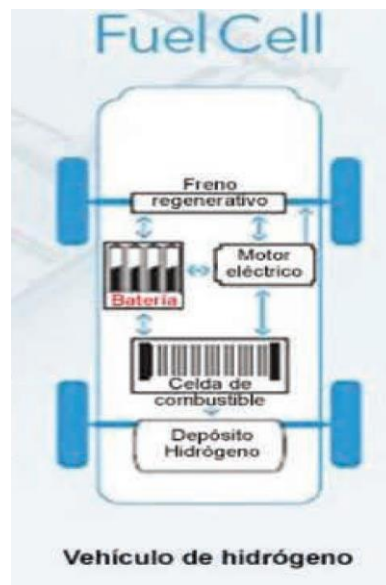


Figura 6: Esquema básico de un vehículo de pila de hidrogeno [9].

2.5 Frenos regenerativos

Este mecanismo es el encargado de transformar la energía cinética o inercia que va acumulando los vehículos eléctricos e híbridos en su aceleración o impulsión a lo largo del trayecto en energía eléctrica, esto sería la definición básica [16]. Entonces en su concepto se destaca principalmente que es un sistema conformado por un motor eléctrico que trabajando a la inversa y se convierte en un generador eléctrico conectado al sistema de frenos del vehículo, que al frenar la energía cinética que lleva en ese momento se transmite al generador eléctrico haciendo girar y producir una corriente, esta energía se

produce ya que los vehículos en movimiento están vinculados con la siguiente ecuación de energía cinética:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

Por tanto, aplicando la ley de la conservación de la energía o primera ley de la termodinámica que dice que la energía no se crea ni se destruye, se transforma se puede transformar la energía cinética en energía eléctrica para el principio de reciclaje de energía en los frenos regenerativos. Otra forma que se puede obtener energía mediante el funcionamiento de los frenos regenerativos es en la desaceleración en bajada de pendientes que esta vincula a la ecuación de energía potencial:

$$E_p = mgh \quad (2.2)$$

El funcionamiento del sistema de regeneración de energía en automóviles eléctricos e híbridos por medio de frenado, empieza cuando se pisa el pedal del freno o se utiliza el freno de motor para disminuir la velocidad de un vehículo, la energía cinética que lleva en ese momento se transmite al generador eléctrico del freno regenerativo, haciendo que esté trabaje restando movimiento a la transmisión de las ruedas por ende disminuyendo la velocidad del vehículo y generando electricidad por el principio de inducción electromagnética o ley de Faraday. La energía eléctrica se acumula en condensadores o en una batería para funciones posteriores del vehículo como ponerlo en marcha o para alimentar accesorios que el vehículo tenga como por ejemplo el radio.

Los sistemas de freno regenerativo en vehículos híbridos y eléctricos hacen que algunos de estos se manejen con un solo pedal, acelerando al pisarlo y desacelerando o frenado al soltar el pedal. Por tanto, regenerando energía al dejar de presionar el pedal, cuando se va con inercia o en movimiento. En autos híbridos llevan el freno regenerativo en las ruedas o eje de ruedas para mayor eficiencia de la regeneración, para estos sistemas se desactiva el freno cuando la batería está llena o se llega a velocidades mínimas que no generan energía eléctrica por tanto, se utiliza en sincronía el frenado hidráulico o convencional que funciona por medio de fricción para desacelerar el vehículo completamente [6].

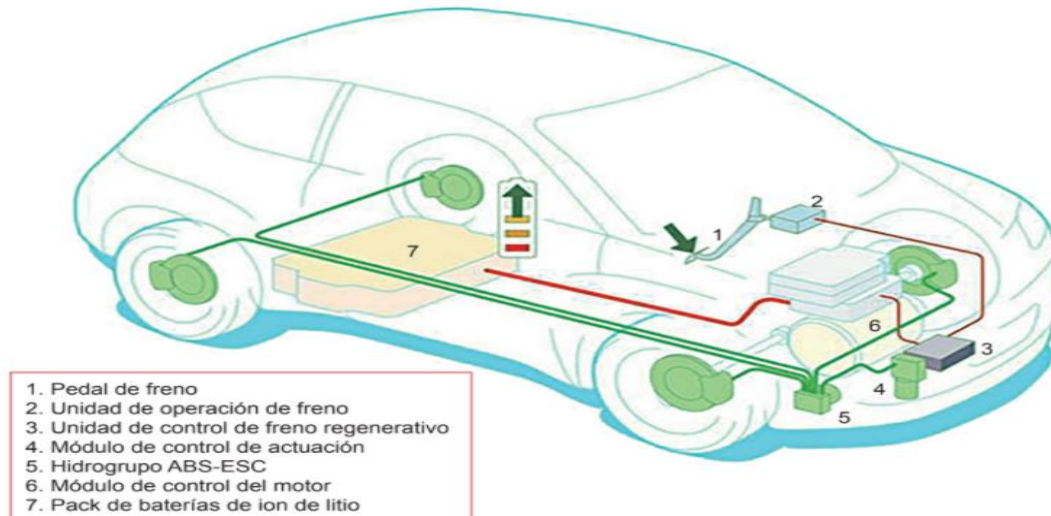


Figura 7: Sistema de un freno regenerativo de un del modelo eléctrico ZOE de Renault [14].

2.6 Acumuladores de energía en vehículos

2.6.1 Batería

Las baterías son un almacén de corriente eléctrica, esto mediante un proceso químico de oxidación / reducción. En general una batería es un dispositivo electroquímico capaz de transformar energía eléctrica en energía química en el proceso de carga, y convertir, la energía química en energía eléctrica en el proceso de descarga. Estas están compuestas por celdas. Cada celda la compone tres elementos: 2 electrodos (ánodo y cátodo) inmersos en un electrolito [10] [14] [12].

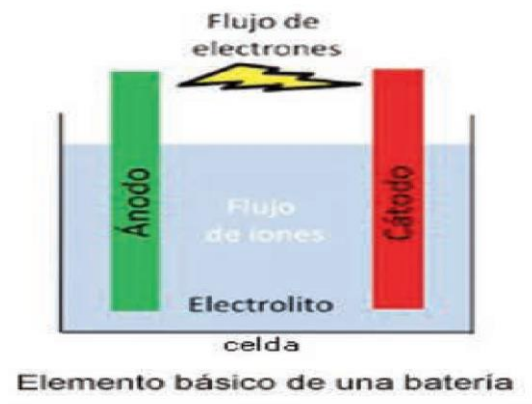


Figura 8: Diagrama básico del funcionamiento de una batería [9].

Para vehículos eléctricos o híbridos los tamaños de las baterías suelen variar ya que para híbridos se utilizan tamaños pequeños y para eléctricos tamaños más grandes. Ya para algunos modelos de vehículos eléctrico el tamaño de las celdas puede variar por ejemplo tesla utiliza tamaños pequeños para un mejor diseño cinemático a la diferencia del resto de fabricantes que si lo hacen de gran tamaño para aumentar la autonomía [9].

Los parámetros que se toman en cuenta a la hora de escoger una batería para un vehículo son: La potencia o el voltaje, capacidad específica, energía específica, ciclos de vida, Las principales baterías recargables en la industria de vehículo son:

- **Plomo-ácido**

Estas son acumuladores de energía económicos y seguros en la industria del automovilismo eléctrico, estas poseen características favorables. Suelen construirse para funciones internas de los vehículos como baterías secundarias o también para la propulsión del vehículo, pero con tamaños considerables.

Están compuestas por un electrodo negativo esponjoso de plomo altamente reactivo, para su electrodo positivo emplea el dióxido de plomo y utiliza una solución de ácido sulfúrico como electrolito. Estas baterías son eficientes en temperaturas considerables ya que tienen recubrimientos internos de cables en su estructura [11].

- **Níquel cadmio(NiCd)**

Estas baterías son muy practicas ya que tienen una larga duración en su vida útil y no sufren tanto si se les llegara a descargar por completo. La dificultad de estas baterías es que tienen menos densidad energética que las de NiMH y Li-ion, también destaca que son más costosas de fabricar. Su impacto ambiental es más nocivo que otro tipo de baterías [9].

Estas baterías utilizan para su electrodo positivo el níquel trivalente, para su electrodo negativo cadmio y para su electrolito una solución alcalina de hidróxido de potasio [11].

- **Níquel-hidruro Metálico(NiMH)**

Estas son baterías que utilizan como electrodo positivo hidróxido de níquel, para su electrodo negativo tiene varios elementos a escoger para esta función como lo es las aleaciones de níquel, titanio, vanadio y otros elementos, para su electrolito utiliza una solución alcalina.

Estas tienen más densidad energética que las de plomo ácido y son más amigables con el planeta. Estas baterías son utilizadas como para autos eléctricos, híbridos y de combustión ya sea para funcionamiento de componentes internos del carro, como para propulsión y arranque. [12]

- **Iones de litio(Li-ion)**

Estas son las baterías que más equilibrio tienen beneficios de uso como perjuicios ambientales, ya que es lo último en baterías en un mercado comercial. Las baterías de litio son muy consideradas en la industria automovilística por su capacidad de densidad energética, su soporte de alta tensión y sus pequeños tamaños.

Su composición de litio, oxígeno, carbón y manganeso para su electrodo positivo, para su electrodo negativo una gran variedad según el enfoque que se le quiera dar a este acumulador [17].

2.6.2 Supercapacitores

Son similares a los capacitores normales, pero tiene una capacidad de potencia energética superior superando también a las baterías de litio, níquel y plomo-ácido, estas características permiten suprimir los picos que se generan en la demanda de potencia a la hora del arranque y la recarga por medio de los frenos regenerativos. Los supercapacitores reducen el estrés en los motores en la demanda de energía, aunque necesitan sincronía con baterías por su falta de densidad energética [18].

2.7 Movimiento rotatorio

2.7.1 Velocidad lineal

La cinemática es la rama de la física que estudia el movimiento de los cuerpos, pero sin tener en cuenta la causa que los produce y analiza el movimiento de un objeto a lo largo de una línea recta. Uno de estos movimientos es el movimiento rectilíneo uniforme en el cual se considera una partícula que se mueve con una velocidad constante [19] [20]. El modelo de partícula bajo velocidad constante se aplica a cualquier situación en la que una entidad que se pueda representar como partícula se mueva con velocidad constante. Esta situación ocurre con frecuencia, de modo que este modelo es importante. Si la velocidad de una partícula es constante, su velocidad instantánea en cualquier instante de su recorrido durante un intervalo de tiempo es la misma que la velocidad promedio durante el intervalo y su velocidad se podrá determinar mediante la expresión:

$$V_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2.3)$$

Donde V_x es la velocidad lineal, Δx es el recorrido desplazado y Δt el tiempo.

2.7.2 Velocidad angular

El periodo de una partícula en movimiento circular uniforme es una medida del número de segundos para una revolución de la partícula alrededor del círculo. El inverso del periodo es la razón de rotación y se mide en revoluciones por segundo [19]. Ya que una revolución completa de la partícula alrededor del círculo corresponde a un ángulo de 2π radianes, el producto de 2π y la razón de rotación da la velocidad angular ω de la partícula, medido en radianes/s o s⁻¹:

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (2.4)$$

Donde ω es la velocidad angular, v es la velocidad lineal y r es el radio de la rueda o en este caso el volante de inercia.

2.7.3 Momento de inercia rotacional

Este se da cuando un cuerpo con cierta masa gira entorno a un eje de referencia produciéndose así una magnitud vectorial [19]. En para cada forma de cuerpo se posee una ecuación para hallar dicho momento de inercia rotacional (I_m) la ecuación principal de donde parten las demás es:

$$I_m = \frac{1}{2}mr^2 \quad (2.5)$$

En el caso de una rueda de bicicleta se trata como un cilindro hueco y su fórmula es:

$$I_m = \frac{1}{2}m(r_1^2 + r_2^2) \quad (2.6)$$

Donde I_m es el momento de inercia, r_1 es el radio a la pared interior de la rueda, r_2 es el radio del eje de rotación a la pared exterior de la rueda y m es la masa de la rueda.

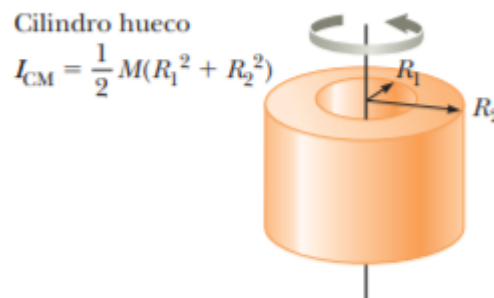


Figura 9: Momento de inercia cilindro hueco [19].

2.7.4 Energía cinética rotacional

las partículas individuales que conforman el objeto en rotación se mueven a través del espacio; siguen trayectorias circulares. En consecuencia, con el movimiento rotacional hay energía cinética asociada. Considere un objeto como un sistema de partículas y suponga que da vueltas en torno a un eje fijo z con una rapidez angular ω [19]. La figura a continuación muestra al objeto en rotación e identifica una partícula sobre el objeto ubicada a una distancia r_i del eje de rotación. Si la masa de la i -ésima partícula es m_i y su rapidez tangencial es v_i , su energía cinética rotacional es:

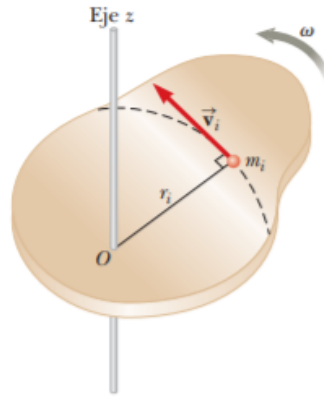


Figura 10: Partícula de un cuerpo en rotación [19].

$$E_k = \frac{1}{2} m * v^2 \quad (2.7)$$

Donde E_k es la energía cinética rotacional

Reemplazamos v de la ecuación (2.4) en la ecuación (2.7) y queda

$$E_k = \frac{1}{2} m(\omega * r)^2 \quad (2.8)$$

Reemplazando la ecuación(2.5) en la ecuación (2.8) se obtiene:

$$E_k = \frac{1}{2} I_m * \omega^2 \quad (2.9)$$

2.7.5 Trabajo rotacional

El trabajo lineal en física se define como la fuerza ejercida en un intervalo de distancia, por tanto, el trabajo rotacional es similar pero ahora se utiliza el radio y el recorrido en radianes como se presenta en la siguiente ecuación [20]:

$$W_{\text{lineal}} = F * \Delta x \quad (2.10)$$

Donde W_{lineal} es el trabajo lineal, F la fuerza que se ejerce y Δx la variación de distancia o el recorrido lineal. Ahora podemos decir que Δx se asemeja al recorrido de una partícula de un cuerpo en recorrer su circunferencia para esto se debe multiplicar el radio de la circunferencia por la distancia en radianes recorrida:

$$\Delta x = r * \theta \quad (2.11)$$

Donde r es el radio de la rueda y θ es los radianes de recorrido por ejemplo una vuelta es 2π por tanto despejando la ecuación queda:

$$W_{\text{rotacional}} = F * r * \theta \quad (2.12)$$

Donde $W_{\text{rotacional}}$ es el trabajo rotacional. Teniendo en cuenta que fuerza por radio es torque:

$$\tau = F * r \quad (2.13)$$

Donde τ es torque. La ecuación de trabajo rotacional queda:

$$W_{\text{rotacional}} = \tau * \theta \quad (2.14)$$

2.7.6 Porcentaje de aprovechamiento de energía inercial

La teoría dice que utilizando la ecuación de energía cinética rotacional obtendremos un resultado, pero al momento de proceder a comparar con los datos experimentales no concuerda esto se debe a que para hacer un cálculo más aproximado a lo teórico se debe tener en cuenta distintos factores que afectan a la práctica como lo puede ser perdidas por fricción, vibraciones, ambiente y demás factores que afectan la práctica. Para saber el porcentaje que aprovechamiento de energía de la forma más básica se utiliza la ecuación [20]:

$$\% \text{aprovechamiento} = \frac{\text{energía aprovechada}}{\text{energía inercia}} * 100\% \quad (2.15)$$

2.8 Análisis de esfuerzos para elementos mecánicos

Los mecanismos al trabajar con energías están sometidos a fuerzas para cumplir sus propósitos, las fuerza a las cuales los elementos mecánicos estas sometidos son: Flexión, Esfuerzos cortantes verticales en vigas, Cortante directo, Tensión y compresión directas, Cortante torsional, para secciones circulares y no circulares

2.8.1 Esfuerzos directos: tensión y compresión

El esfuerzo es la resistencia que tiene el material a oponerse a una carga o fuerza externa que se le aplique. Los esfuerzos normales pueden ser de tensión que se consideran positivos o de compresión que se consideran negativos, esto respecto a cómo intente moverse el material a su área transversal [20]

$$\sigma = \frac{\text{fuerza}}{\text{área}} = \frac{F}{A} \quad (2.16)$$

2.8.2 Esfuerzo cortante directo

Este se produce cuando una fuerza sobre el elemento mecánico tiende a cortar esté como si fueran unas tijeras, el esfuerzo cortante directo es parecido al esfuerzo normal en tensión la diferencia es que esta se da con una fuerza cortante y no con una fuerza normal [20]. Por tanto:

$$\tau = \frac{\text{fuerza de corte}}{\text{area al corte}} = \frac{F}{As} \quad (2.17)$$

2.8.3 Esfuerzo cortante a torsional

Cuando se aplican o se da un par de torsión o momento de torsión sobre un elemento mecánico, este elemento tiende a deformarse por torsión lo cual produce fuerza cortante sobre esté [20].

$$\tau_{max} = \frac{Tc}{J} \quad (2.18)$$

Donde T es la fuerza torsional sobre el elemento, c es el radio de la superficie externa del eje y J es el momento polar de inercia.

2.8.4 Esfuerzo cortante vertical

Cuando manejamos vigas o elemento que tienen cargas transversales a su eje se desarrolla fuerza de corte. Por lo general se hacen análisis de cuerpo libre y se deducen las fuerzas que actúan a lo largo de la viga [19]. Entonces el esfuerzo cortante vertical se puede calcular:

$$\tau = \frac{VQ}{It} \quad (2.19)$$

Donde V es la fuerza de corte transversal a la viga, I es el momento de inercia rectangular de la sección transversal de la viga, t es el espesor del perfil en el lugar donde se va a calcular el esfuerzo cortante y Q es el primer momento con respecto al eje centroidal del área de la sección transversal de esa parte. Para calcular el valor de Q se utiliza:

$$Q = A_p \bar{y} \quad (2.20)$$

Donde A_p la parte del área de la sección arriba del lugar donde se va a calcular el esfuerzo y \bar{y} distancia del eje neutro de la sección al centroide del área A_p . A continuación, podemos ver algunas ilustraciones ejemplo de cómo calcular Q .

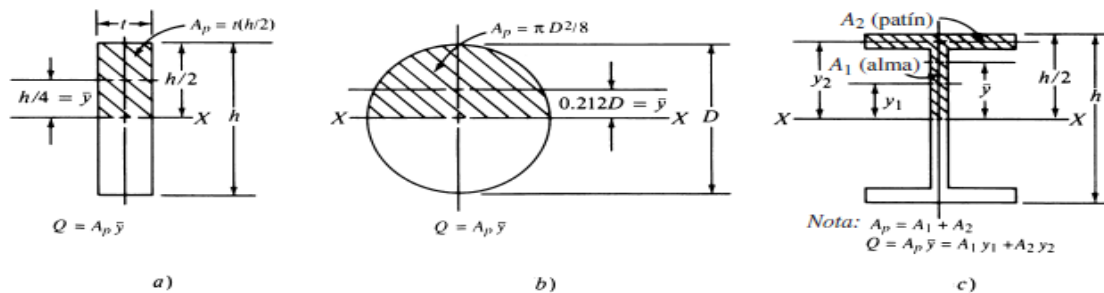


Figura 11: Ilustraciones de A_p y \bar{y} , empleados para calcular Q de tres perfiles [20].

2.8.5 Esfuerzo debido a flexión

Cuando una viga está soportando cargas transversales a su eje, estas producen momentos de flexión en la viga. El esfuerzo de cortante máximo en una sección transversal de una viga está en la parte más alejada del eje neutro de la sección [20]. En ese punto se puede calcular el resultado del esfuerzo con:

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (2.21)$$

Donde M es la magnitud del momento de flexión en esa sección, I es el momento de inercia del área transversal con respecto a su eje neutro y c es la distancia del eje neutro a la fibra más alejada, en la sección trasversal de la viga.

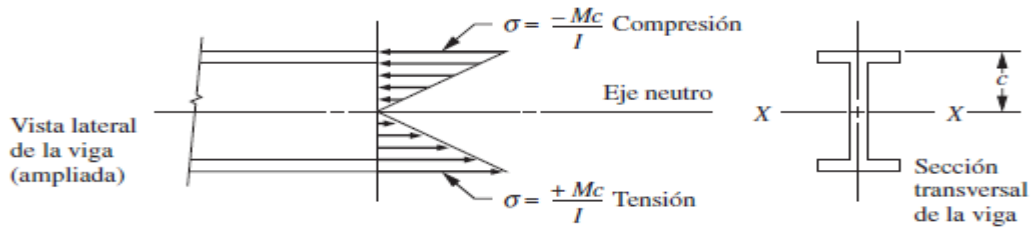


Figura 12: Distribución de esfuerzos sobre la sección de la viga [20].

Para facilitar en la búsqueda de selección de materiales se utiliza el módulo de sección S , como:

$$S = \frac{I}{c} \quad (2.22)$$

Entonces, la fórmula de la flexión se transforma en

$$\sigma = M/S \quad (2.23)$$

2.9 Análisis de frecuencia natural y velocidad crítica

2.9.1 Frecuencia natural

Cuando un elemento no amortiguado vibra libremente y no requiere ninguna carga estática para mantener dicha vibración, se dice que lo está haciendo a su frecuencia natural. Cuando el elemento tiene una perturbación a la misma frecuencia natural el elemento entrara en resonancia, por esta razón al tener sistemas de rotación expuestos a incrementos de vibraciones significativo y para evitar inestabilidad por resonancia se recomienda un estudio de frecuencia del elemento [21] [22].

2.9.2 Velocidad crítica en un eje

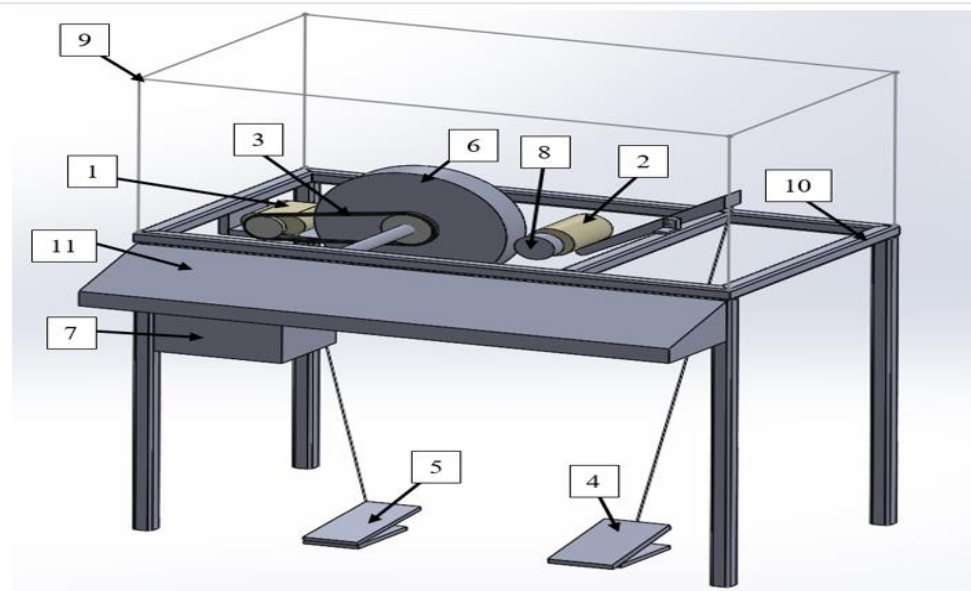
Cuando un eje está a ciertas velocidades de rotación y estas entran a la misma frecuencia que la frecuencia natural del eje causado que se unan las ondas de frecuencia y haciendo que estas se amplifiquen, por tanto haciendo al eje más inestable, provocando problemas en soportes o rodamientos de dicho eje causando más rápido el desgaste del mecanismo [23].

3. Identificación de variables para diseño preliminar

3.1 Características iniciales para el diseño preliminar del prototipo de freno regenerativo

En el diseño preliminar del prototipo se plantea tener los siguientes aspectos para comenzar su ejecución:

- Para hacer el prototipo se necesita un medio de transmisión con el mínimo de piezas para evitar perdida por fricción al momento que el volante de inercia transmita la energía almacenada.
- Procurar un beneficio mutuo entre costo-mantenimiento al utilizar piezas mecánicas y dispositivos eléctricos comerciales para la fabricación del prototipo al contrario de producirlas o manufacturándolas.
- Una idealización en el diseño para que los estudiantes primerizos comprendan más fácilmente el funcionamiento.
- Se idea un bosquejo o una idea preliminar como guía en los aspectos o límites de este. Como requisitos en piezas que se deberán tener para el diseño idealizado.



1	Motor (transmisión de potencia)	7	Caja o espacio para fuente de energía
2	Motor generador	8	Rueda de acople para regeneración
3	Sistema de transmisión de potencia	9	Acrílico o cubierta de protección
4	Pedal de regeneración de energía	10	Estructura soporte del prototipo
5	Pedal de transmisión de potencia	11	Apartado eléctrico y de interacción con el usuario
6	Volante de inercia		

Figura 13: Diseño idealizado para del prototipo de freno regenerativo.

Ya que se tiene la idealización del diseño preliminar del prototipo se procede a hacer el estudio de las características de los componentes o partes con sus especificaciones técnicas y la conveniencia de estas para los objetivos de diseño del prototipo. Los componentes principales que se requieren están en la **Figura 13**: Diseño idealizado para del prototipo de freno regenerativo.

3.2 Elementos para la construcción del prototipo

Se procede a ordenar por importancia los elementos básicos para el diseño y fabricación del prototipo y después se procede a tomar varias opciones para desglosar cada uno, por su características cuantitativas y cuantitativas

- Motor impulsor: Será el encargado de transmitir la potencia al prototipo, el cual le dará el movimiento rotacional al volante de inercia, por tanto, se debe seleccionar primero y conocer sus especificaciones, ya que con estas se pueden hacer cálculos para los demás componentes (batería o fuente de alimentación, volante de inercia, sistema de transmisión, motor generador, etc.)
- Batería o fuente de alimentación del sistema: Este componente es el encargado de suministrar la energía para el funcionamiento adecuado del motor impulsor, por eso mismo se debe plantear después de haber hecho la elección del motor impulsor
- Volante de inercia: Será el encargo de acumular la energía cinética rotatoria del prototipo, para interactuar con otros componentes como el motor generador y mecanismo de acople de regeneración. Este componente se debe plantear después de haber seleccionado el motor impulsor ya que se debe saber la potencia de este primero.
- Sistema de transmisión: Será el encargado de transmitir la potencia del motor impulsor al volante de inercia para generar movimiento rotatorio en este.
- Motor generador: Será el encargado de transformar la energía cinética rotacional en energía eléctrica.
- Mecanismo de acople de regeneración: Será el sistema encargado de transmitir la energía cinética rotacional del volante de inercia al motor generador.
- Espacio de apartado eléctrico: Es el destinado para la interacción con el usuario, al tener sensores en algunos componentes del prototipo, estos se reflejarán en este apartado los cuales arrojaran datos con los que se pueden experimentar y desarrollar prácticas.
- Pedales del prototipo: Estos son los encargados de accionar y regular los sistemas de transmisión de potencia y sistema de regeneración.
- Base soporte del prototipo y componentes: Es la estructura encargada de soportar todos los componentes del prototipo.

A continuación, se procede a hacer un apartado para cada componente y en este se presentarán unas posibles elecciones para analizar cuál es la mejor opción, comparando sus características cualitativas y cuantitativas.

3.2.1 Motor impulsor preliminar

Para la selección preliminar del motor impulsor se escogen 3 tipos de motores de 100 W con diferencia en tipo de corriente y fuente de alimentación, ya que analizando las primeras opciones se escogen estos para comenzar la selección, si el escogido no cumple con las necesidades del prototipo en la sección de cálculos será cambiado por otro que ofrezca mejores características para el prototipo, por otro lado se proponen unas características básicas cualitativas, que debe tener el prototipo para tener un mejor costo-beneficio:

1. Motor accesible de precio
2. Motor bajo peso
3. Motor de fácil mantenimiento y/o fácil reemplazo
4. Motor con un sistema de control sencillo o económico
5. Motor con una potencia considerable
6. Motor con buenos antecedentes en el mercado

Motor Característica a cumplir	Motor 100W AC 120V de maquina de coser casera	Motor DC 100W 12V para proyectos sencillos	Motor DC 100W 12V para proyecto con arduino
1	40mil - 100mil con pedal y sistema de	200mil- 300mil solo motor	200mil- 300mil solo motor
2	Aproximadamente 2 kg	Aproximadamente 2 kg	Aproximadamente 2 kg
3	Muy común en el mercado	Se necesita persona con conocimiento básico para manejo	Se necesita persona con conocimiento básico para manejo
4	Sistema de control integrado	Diseñar el sistema de control (aprox. 50mil-150mil)	Diseñar el sistema de control con arduino (aprox. 100mil-250mil)
5	100w	100 w	100w
6	Motor para trabajo continuo moderado	Motor para trabajo continuo moderado	Motor para trabajo continuo moderado

Tabla 3: Comparación de propuestas para motor impulsor.

Analizando las características anteriores se puede considerar como la mejor opción el motor 100W AC 120V a 8000 rpm de máquina de coser casera ya que es conocido por ser de uso continuo, posee una buena característica de potencia iniciales, posee el pedal para regular la potencia de esté, además de ser económico para su adquisición y mantenimiento.



Figura 14: Motor 100W AC 120V de máquina de coser casera [24].

3.2.2 Batería o fuente de alimentación preliminar

Para el suministro de alimentación de energía para el prototipo, se presentan 3 posibilidades dado las especificaciones de los motores de la (Tabla 3), ya que se presentan varias opciones se plantean las más accesibles en el mercado convencional y según la selección del motor impulsor, se puede acoger una opción. Se presentan a continuación unas características cualitativas necesarias para el desarrollo de los objetivos a cumplir por el prototipo:

1. Que tenga la capacidad de cargarse y descargarse fácilmente sin daño
2. Economía
3. Peso
4. Forma para ubicación y transporte
5. Mantenimiento o fácil reemplazo
6. Duración

Fuente de alimentación / Característica a cumplir	Batería de moto 12V 5Ah - 12Ah	Batería de carro 12V 35Ah - 60Ah	Conexión 110V a red eléctrica y con transformador a 12V
1	200 ciclos al 100%	200 ciclos al 100%	No tiene ciclo determinado
2	50mil - 120 mil	100mil - 450mil	Conexión a red eléctrica costo por kWh y precio del transformador (50mil-200mil)
3	1 kg - 2 kg	10 kg - 15 kg	Se puede transportar si se tiene una batería se puede conectar al transformador
4	0,004 m ³ - 0,006 m ⁴	0,006 m ³ - 0,010 m ⁴	Poco espacio
5	Si	Si	Si
6	5Ah - 12Ah	35Ah - 60Ah	Conexión a red eléctrica costo por kWh y precio del transformador (50mil-200mil)

Tabla 4: Comparación de propuestas batería o fuente de alimentación.

Se escoge como fuente de alimentación eléctrica el sistema de conexión 110V a red eléctrica, ya que el motor impulsor seleccionado funciona con corriente AC a esas características técnicas de energía, es fácil de hacer mantenimiento, no tiene ciclo de vida muy limitado, por su economía y duración es la mejor opción.

3.2.3 Volante de inercia preliminar

Para el volante de inercia que es el encargado de almacenar la energía cinética rotacional en el prototipo, se proponen 4 opciones las cuales 3 están en el mercado convencional y una de ellas es de propia manufactura se proponen unas características cualitativas idealizadas para la selección preliminar si en la sección de cálculos no cumple lo requerimientos se remplazará por otra opción:

1. Superficie de fácil transmisión o fricción con la rueda de generación
2. Fácil mantenimiento y reposición
3. Peso
4. Economía
5. Forma de aro más momento de inercia y funcionalidad
6. Resistencia al uso
7. Complementos que aportan al sistema

Volante de inercia Característica a cumplir	Rueda de bicicleta	Rueda de moto	Rueda de carro	Volante manufacturado
1	Coraza para agarre y adherencia	Coraza para agarre y adherencia	Coraza para agarre y adherencia	Diseñar con superficie de agarre y adherencia
2	Se puede fácilmente	Se puede fácilmente	si se puede fácilmente	Mantenimiento específico y reemplazo específico a manufactura
3	5 kg - 8 kg	10 kg - 20 kg	15 kg - 25 kg	según diseño
4	20mil-100mil	100mil-300mil	100mil-500mil	Según diseño aproximado (200mil-400mil)
5	Aro	Aro	Rueda tipo aro	Diseño especificado a aro
6	Según el mercado vel. Max. 80km/h	Según el mercado vel. Max. 260km/h	según el mercado vel. Max. 260km/h	Según diseño
7	Sistema de rodamiento que aprovecha la inercia	Freno de tambor o de disco integrado	Ninguno	Según diseño

Tabla 5: Comparación de propuestas para volante de inercia.

Se escoge la rueda de bicicleta al tener el sistema de rodamientos que permiten inercia al mecanismo una vez el motor o el sistema termine de transmitir potencia a este, además su mantenimiento y remplazo es considerablemente económico.

Se escoge una rueda de bicicleta con una especificación de peso de 4.2 kilogramos, diámetro de 20 pulgadas, radio interno de 0.21 metros y radio externo de 0.235 metros.

3.2.4 Sistema de transmisión de potencia preliminar

Se escoge el sistema de transmisión de potencia por cadena, ya que posee características favorables para el funcionamiento del prototipo como alta resistencia a las tensiones, buena aplicabilidad de transmisión de potencia a velocidades bajas, necesaria para la variabilidad de velocidad que tendrá el funcionamiento del prototipo. A comparación de un sistema de transmisión por bandas, estas sufren y patinan a bajas velocidades de revolución y los sistemas de transmisión de potencia por engranajes, estos en momentos de desgaste y reemplazo son más complicados al tener que manufacturarse. Al ser la rueda de bicicleta un elemento comercial y seleccionarse como volante de inercia para el prototipo, poseen parte del sistema de transmisión por cadena incorporado al momento de su adquisición [20] [25].

3.2.5 Motor generador o alternador preliminar

Este componente es el encargado de la transformación de energía para prototipo, para su elección se proponen 3 motores con características que se enfocan en vehículos, que son la capacidad de voltaje de 12V o generadores de energía como lo es el alternador, al escoger un motor de 100W como motor impulsor se toma esta característica para el motor encargado de la regeneración del sistema. Se considera también unas características cualitativas que se enfocan en el costo beneficio:

1. Que sea generador
2. Que trabaje a altas revoluciones
3. Precio
4. Mantenimiento o reemplazo
5. Peso
6. Aporte al sistema

Fuente de alimentación Característica a cumplir	Motor DC 100W 12V	Motor AC 100W 12V	alternador de carro
1	Si	Si	Si
2	Si	Si	Si
3	150mil - 250mil	No se consigue fácilmente	100mil-500mil no incluye regulador y/o conversor
4	Fácil	Con dificultad	Moderado
5	0,5 kg -1,5kg	0,5kg - 1,5kg	1,5 kg -3,5 kg
6	No necesita regulador o conversor	Ninguno	Ninguno

Tabla 6: Comparación de propuestas para motor generador.

Se selecciona el motor DC 100W 12V con unos rpm de 3600, se escoge porque es un buen dispositivo de generación a velocidades variables a ser de imanes permanentes, al tener corriente continua y no tener que añadir a los costos un convertidor y regulador de corriente en el caso de un motor AC y un alternador. Al ser un motor un motor de imanes permanentes su pérdida de eficiencia por calor es menor a comparación de otros motores [20]. Estos tipos de motores son de fácil reemplazo y reparación ya que son comerciales

3.2.6 Mecanismo de acople y espacio de apartado preliminar

Para el mecanismo de acople se plantea que sea accionado por medio de un pedal para dar una simulación a los autos eléctricos e híbridos, que son por sistema de pedales al acelerar por un pedal y obtener una frenada regenerativa con otro en algunos casos. Se plantea que el mecanismo sea accionado por pedal, se transmita la fuerza a una cadena y se utilice una barra como palanca para acoplarse al volante de inercia por medio de fricción en las superficies del volante de inercia y una rueda que se aloja en el eje del motor de regeneración que será alojado en la barra palanca del mecanismo de acople.

El espacio de apartado se tiene como opción preliminar para alojar cables y sistemas eléctricos internos del prototipo (motor eléctrico, cables, consumidores eléctricos, batería, etc.). Este se plantea construir con perfiles y láminas, pero se debe primero a hacer cálculos de diseño

3.2.7 Pedales de prototipo preliminar

Para emular el accionamiento de potencia y frenado regenerativo de los vehículos eléctricos e híbridos, se escoge tener un diseño de accionamiento para el prototipo por medio de pedales. Para el accionamiento de potencia para el prototipo se tiene ya seleccionado el pedal del motor de máquina de coser al este venir incluido en la adquisición de dicho motor. Para la selección de pedal del frenado regenerativo se toma como opción preliminar un pedal de máquina de confección, ya que se puede tomar parte de su sistema para diseñar el mecanismo de regeneración lo cual su diseño de funcionamiento está compuesto básicamente pedal, cadena, barra palanca y acople, como se puede observar en la figura a continuación.

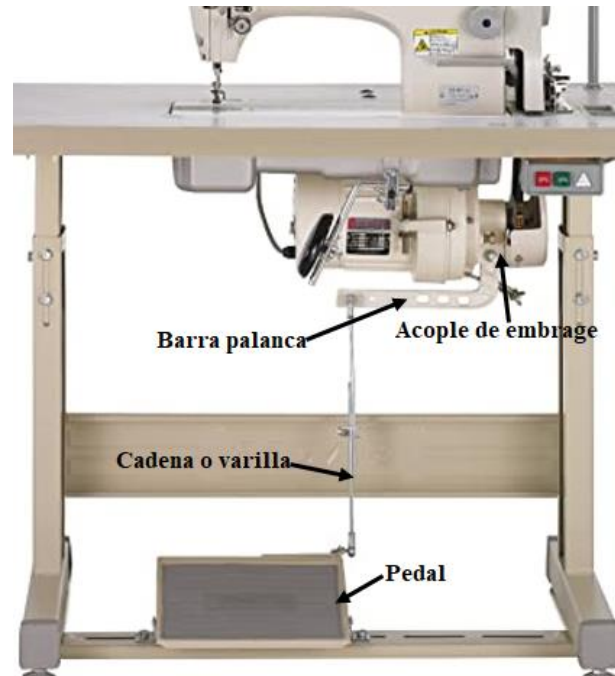


Figura 15: Sistema de accionamiento por pedal de una maquina de confección.

3.2.8 Estructura soporte del prototipo preliminar

Los requerimientos básicos para la estructura soporte del prototipo son que la estructura tenga una buena resistencia a esfuerzos como la flexión y torsión, que sea en un material de poco peso sin sacrificar sus características mecánicas de esfuerzos, que tenga una buena resistencia al desgaste por corrosión o fatiga y sea fácil su manufactura (cortar, unir, pintar, etc.). Para tomar una decisión preliminar para comenzar los cálculos se selecciona como material para la estructura soporte el perfil cuadrado de acero al poseer de buena manera los requerimientos básicos y poseer la cualidad de ser muy comercial y entrar como buena opción en el objetivo costo-beneficio. Para una selección más detallada se procederá a la realización de cálculos si el material no cumple con los requerimientos será cambiado por otra opción preliminar.

4. Cálculos y modelamientos matemáticos del prototipo

4.1 Volante de inercia

Parámetros:

Rueda de bicicleta rin 20" con coraza esta posee las siguientes características:

D= 0.470m; r= 0.235m; P= 1.477m; m= 4.2kg; W=41.202 N;

Dónde.

D: Diámetro de la rueda[m]

r: Radio de la rueda[m]

P: Perímetro de la rueda[m]

W: Peso de la rueda[N]

Para no tener problemas con el motor y la eficiencia de este mismo se utilizará máximo una potencia de 50% - 65%

Se le pone una velocidad de máxima de $v = 35 \text{ Km/h}$ que es una velocidad promedio que se alcanza en este tipo de ruedas y será la velocidad preliminar para iniciar los cálculos. También se estudiará el caso de poder aumentar esta velocidad para generar más inercia según no sobre pase la potencia limite que se le dio al motor.

Entonces por cada vuelta de la rueda esta recorre un distancia lineal de 0.001477 Km, al ser este valor su perímetro, ahora se debe pasar esto a rad/s, pero para esto se toma la velocidad máxima que se estableció al principio de 35Km/h para saber cuál va a ser la energía cinética máxima que va a brindar el volante de inercia, para eso se calcula la velocidad angular (ω):

$$\omega = \frac{35 \text{ km/h}}{0.001477 \text{ km/revolucion}} = 23696 \frac{\text{rev}}{\text{h}} * \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 395 \text{ rpm} \quad (4.1)$$

Por tanto, esto determina que el volante tendrá una velocidad angular máxima de 395 rpm, pero ahora se necesita pasar este resultado a rad/s para facilitar los cálculos de potencia y energía

$$\omega = 395 \text{ rpm} * \frac{2\pi}{1 \text{ rev}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} = 41.36 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (4.2)$$

Como el prototipo se trabajará con un sistema de transmisión de potencia por cadena y catarinas se debe hacer los cálculos de relación de estos para saber cuánta fuerza y potencia será necesaria para mover el mecanismo a los valores predeterminados al principio

El piñón conductor debe ser más pequeño que el piñón conducido esto para que no tenga un sobreesfuerzo el motor al momento de arrancar el mecanismo

La rueda de bicicleta viene con un piñón para la transmisión de potencia, este con un diámetro de 0.075 m y se escoge el piñón más pequeño que será el piñón conductor anclado al motor de potencia que tiene un diámetro de 0.05 m, por tanto, con estos parámetros ya podemos trabajar para hallar la relación de estos, y encontrar la potencia con la cual trabajara el motor

$$n_1 * D_{p1} = n_2 * D_{p2} \quad (4.3)$$

Donde.

D_{p1} : Diámetro del piñón pequeño[m]

n_1 : Número de revoluciones del piñón pequeño[rpm]

D_{p2} : Diámetro del piñón grande[m]

n_2 : Número de revoluciones del piñón grande[rpm]

Al tener la velocidad angular calculada en la ecuación (4.1) en rpm se designa este parámetro a la variable (n_2) al ser el piñón anclado al volante de inercia, diciéndose entonces que una vuelta del piñón grande es una vuelta del volante de inercia. Ahora se procede a calcular (n_1) que será el piñón anclado al motor de potencia y con esto hallar la potencia y torque necesario para el funcionamiento del prototipo.

Entonces:

$$n_1 = \frac{0.075 \text{ m} * 395 \text{ rpm}}{0.05 \text{ m}} = 592.5 \text{ rpm}$$

4.1.1 Cálculos para selección de motor impulsor de volante de inercia

Se halla el trabajo que va realizar el motor en el piñón pequeño que será el conductor para mover el peso de la rueda entonces:

$$W_t = W * r_{pp} * \theta \quad (4.4)$$

Donde.

W_t : Trabajo rotacional[J]

W : Peso de la rueda[N]

r_{pp} : Radio del piñón pequeño[m]

θ : Grados de giro[rad]

Entonces se procede a calcular el trabajo rotacional del volante de inercia en una revolución que sería un radian, como el diámetro del piñón pequeño es de 0.5 m hallar su radio se divide el este y se obtiene que el radio es de 0.25 m.

$$W_t = 41.202 N * 0.025 m * 1 rad = 1.03 J$$

Esto significa que para dar aproximadamente una vuelta en el piñón grande se necesita 1.03 J con el peso del volante. ahora se debe hallar la potencia máxima requerida para hacer girar el volante de inercia a la velocidad angular máxima predeterminada hallada en la ecuación (4.2) de 41.36 rad/s, para ello se necesita el torque que necesita el sistema para hacer girar el volante con el piñón del motor

$$\tau = W * r_{pp} = 41.202 N * 0.025m = 1.03 Nm \quad (4.5)$$

Donde.

τ : Torque[Nm]

Entonces se procede a calcular la potencia requerida que el motor debe tener para hacer trabajar a la velocidad angular máxima de 41.36 rad/s una vez obtenido el valor del torque en la ecuación (4.5).

$$P_{req} = \tau * \omega \quad (4.6)$$

Donde.

P_{req} : Potencia requerida[W]

$$P_{req} = 1.03 Nm * 41.36 \frac{rad}{s} = 42.603 W$$

A la potencia resultante se le da un factor de seguridad o de imprevisto por de 1.5 por accesorios en fricción o perdidas de potencias por mecanismos de transmisión que puede ser la cadena, los piñones y los rodamientos

$$P_{req} = 42.603 W * 1.5 = 64 W \quad (4.7)$$

Como se puede observar la potencia máxima requerida para girar el volante a una velocidad angular máxima de 395 rpm es de 64 W con factor de seguridad por pedidas, este valor está en el rango establecido de 50% - 65% de potencia, esto se puede comprobar con la siguiente ecuación considerando que el motor es de 100W:

$$\% \text{ potencia a utilizar} = \frac{100\% * 64 W}{100W} = 64 \% \quad (4.8)$$

Ahora se necesita saber si el motor tiene el torque necesario para hacer girar el volante de inercia si el motor dice que tiene una especificación de 100W a 2900rpm a 8000rpm, entonces con la ecuación a continuación se puede obtener ese dato:

$$\tau = \frac{P_{motor}}{\omega} \quad (4.9)$$

Donde.

P_{motor} : potencia máxima del motor seleccionado[W]

ω : velocidad angular máxima del motor a analizar[rpm]

$$\tau = \frac{100W}{8000rpm * \frac{2\pi}{60 s}} = 0.12 Nm$$

Al compararse los resultados de la ecuación (4.9) de 0.12 Nm que es el torque que brinda el motor, con el resultado de la ecuación (4.5) de 1.03 Nm que es el torque requerido para el sistema indica que el motor seleccionado no tiene el torque necesario para el funcionamiento del prototipo, por tanto, se toma la decisión de cambiar por un motor manufacturado, tomando el objetivo del proyecto de costo-beneficio para ello se toma la decisión de utilizar el mecanismo de un taladro ya que tienen las mismas ventajas del motor anterior las cuales son:

- Fuente de alimentación a la red eléctrica
- Con regulador de velocidad
- Económico de adquirir
- Fácil reparación y mantenimiento
- Motor con buenos antecedentes en el mercado para trabajo de fuerza

Dado esto se escoge un motor de taladro de 550W de 110v a 2900 rpm con un coste de 80mil pesos por ende sigue siendo más viable que las otras opciones de la sección [3.2.1](#).

Entonces se procede a realizar el cálculo del torque que brinda el motor de taladro utilizado de nuevo la ecuación (4.9) :

$$\tau = \frac{P_{motor}}{\omega} = \frac{550W}{2900rpm * \frac{2\pi}{60s}} = 1.811 Nm \quad (4.10)$$

Ahora al comparar el resultado de la ecuación que es el torque requerido para el funcionamiento del sistema como la ecuación que es el torque que brinda el motor, se dice que el motor de taladro cumple el requerimiento de torque para el funcionamiento del sistema. Para si cumple con los requerimientos de potencia se utiliza de nuevo la ecuación (4.8)

$$\% potencia a utilizar = \frac{100\% * 550W}{65W} = 11.64 \% \quad (4.11)$$

El resultado de la ecuación (4.11) de 11.64% indica el porcentaje de potencia requerida por el sistema, al ser menos de 65 % cumple los requerimientos de potencia.

4.1.2 Inercia y energía cinética producida por el volante

Si la rueda de esta fabricada en aluminio su peso específico es de 2700kg/m², como el volante de inercia es prácticamente un aro tiene dos radios, uno externo y uno interno, los cuales son 0.245m y 0.21m respectivamente, y su masa es de 4.2 kg, entonces con estos parámetros se puede hallar el momento de inercia para un aro con la siguiente ecuación:

$$Im = \frac{1}{2} * m * (r_1^2 + r_2^2) \quad (4.12)$$

Donde.

Im: Momento de inercia[kg*m²]

m: Masa del volante de inercia[kg]

r1: Radio interno del volante de inercia[m]

r2: Radio interno del volante de inercia[m]

$$Im = \frac{1}{2} * 4.2kg * (0.21m^2 + 0.235m^2) = 0.22 kg*m^2$$

Ahora con el resultado de la ecuación (4.12) que arroja el valor del momento de inercia ahora del volante, podemos estimar la energía cinética rotacional que puede almacenar el sistema

$$Ek_{max} = \frac{1}{2} * Im * \omega_{max}^2 = \frac{1}{2} * (0.22 kg * m^2) * \left(41.36 \frac{rad}{s}\right)^2 = 187.03 J \quad (4.13)$$

Donde.

$E_{k_{max}}$: Energía cinética rotacional máxima[J]

ω_{max} : Velocidad angular máxima[rad/s]

Para la velocidad máxima angular utilizamos la que proporciona la ecuación (4.2) al ser este resultado la máxima velocidad angular que se pretende en el funcionamiento del sistema.

Entonces el resultado de la ecuación (4.13) dice la energía cinética rotacional ideal, esto porque no se tiene en cuenta en la ecuación factores de pérdida de energía por fricción de aire y pérdidas de energía en forma de calor por rozamiento de partes mecánicas, estos factores aparecerán en el apartado de experimentación, por ahora se utiliza este resultado ideal como referencia para estimar cuantas vueltas puede seguir dando el volante en inercia una vez se detenga el motor. Para calcular el número ideal de vueltas que puede dar el volante en inercia, se divide la energía cinética rotacional ideal máxima almacenada por el volante por la energía requerida para dar una vuelta, este dato calculado en la ecuación (4.4)

$$vueltas\ por\ energia = \frac{187.03\ J}{1.03\ \frac{J}{rev}} = 181.6\ rev \quad (4.14)$$

Por tanto, después que el motor sea parado se estima en un caso ideal que el volante aprovechará esa energía cinética dando 181.6 vueltas antes de estar en reposo de nuevo, si no tiene pérdidas por fricción en su funcionamiento, ya en el apartado experimental se cree que se reflejarán estas pérdidas.

4.1.3 Aprovechamiento de energía cinética de la rueda conductora

Se supone que la rueda conducida anclada al motor de regeneración tiene un diámetro de 0.065 m, por ende un radio de 0.0335 m, con una superficie de agarre en su banda rodamiento para acoplarse por fricción a la superficie de la coraza del volante de inercia del prototipo, y esta rueda conductora se estima una masa de 0.05 kg y un peso 0.491 N de con los anteriores parámetros se puede utilizar la ecuación de trabajo rotacional para calcular la energía requerida de la rueda conductora para dar una vuelta, esto con el fin de calcular el número de vueltas máximas en una condición ideal para tener una referencia.

$$W_{tc} = W_c * rc * \theta = 0.491N * 0.0335m * 1rad = 0.01645\ J \quad (4.15)$$

Donde.

W_{tc} : Trabajo rotacional de la rueda conducida[J]

W_c : Peso de la rueda conducida[kg]

θ : Grados de rotación [rad]

Con el resultado de la ecuación (4.15) se necesita 0.01645 J. Ahora bien, con estos resultados se saca una relación de perímetro y con estos resultados se puede calcular cuántas vueltas puede dar la rueda conducida cuando se acople al volante de inercia. Entonces se calcula el perímetro de la rueda conducida

$$P_c = \pi * D_c = \pi * 0.067m = 0.2105m \quad (4.16)$$

Donde.

P_c : Perímetro de la rueda conducida de regeneración[m]

D_c : Diámetro de la rueda conducida de regeneración[m]

Entonces con el resultado de la ecuación (4.16) que es el valor del perímetro de la rueda conducida y el perímetro del volante de inercia que viene siendo la rueda conductora tiene un perímetro de 1.477 m([sección 4.1](#)) se puede hacer el cálculo de la relación de perímetro con la siguiente ecuación.

$$\text{Relación de perímetros} = \frac{\text{perímetro rueda conductora}}{\text{perímetro rueda conducida}} \quad (4.17)$$

$$\text{Relación de perímetros} = \frac{1.477m}{0.21m} = 7.02$$

El resultado anterior significa que por cada vuelta del volante la rueda conducida va a dar 7.02 vueltas cuando estos estén acoplados. Ahora con estos resultados se puede estimar cuanta energía o vueltas le puede brindar el volante a la rueda conducida con la energía almacenada a máxima velocidad permitida. Entonces como se calculó anteriormente el volante a máxima velocidad, acumulara una energía cinética rotacional de 187.03 J esto calculado en la ecuación (4.13) que significan 181.6 revoluciones de volante para un caso ideal antes de parar como se calculó en la ecuación (4.14). Entonces se hace un cálculo de cuantas vueltas puede hacer la rueda conducida con la máxima energía rotacional que puede almacenar y brindar el volante de inercia en un caso ideal con la siguiente ecuación

$$\text{Vueltas rueda conducida} = 181.6 \text{ rev} * 7.02 = 1274.8 \text{ rev} \quad (4.18)$$

Entonces ahora se puede estimar la energía enviada del volante de inercia a la rueda conductora

$$\text{Energía rueda conducida} = 1274.8 \text{ rev} * 0.10335 \frac{J}{\text{rev}} = 131.75 J \quad (4.19)$$

Entonces se estima que el volante de inercia a su máximo almacenamiento de energía cinética rotacional en un caso ideal le puede brindar 131.75 J a la rueda conducida.

Entonces como la rueda conducida está anclada al eje del motor regenerador en el centro, estas revoluciones serán las del eje para producir un voltaje y un corriente eléctrica.

4.2 Base o soporte del sistema

Características preliminares:

- Por diseño preliminar se supone que el volante es el elemento que ejercerá más fuerza en un punto específico, que es el peso del conjunto del volante con sus accesorios eje, cadena y piñones.
- Se idealiza una estructura de soporte tipo mesa para el mecanismo, ya que por su forma se pueden ubicar los componentes con facilidad, también se puede hacer un análisis de vigas estáticas con mayor facilidad al tomar la estructura por vigas a 90 grados y de igual manera sus fuerzas son la mayoría aplicadas transversalmente a sus planos de aplicación.
- Ya que el volante de inercia tiene un diámetro de 0.475 m y está rota sobre su punto central, se debe tomar el radio de éste, y un espacio preliminar para dejar rotar libremente, a la barra paralela a la cara del volante.
- El eje del volante tiene una longitud de 0.16 m de enganche a enganche esta medida debe ser tomada en cuenta para dejar el espacio de rotación del volante.
- A continuación, se realiza un diseño preliminar de la estructura, este será la base para los cálculos y si se nota que se puede acortar o alargar medidas para un mejor funcionamiento o eficiencia será cambiado para el diseño final.

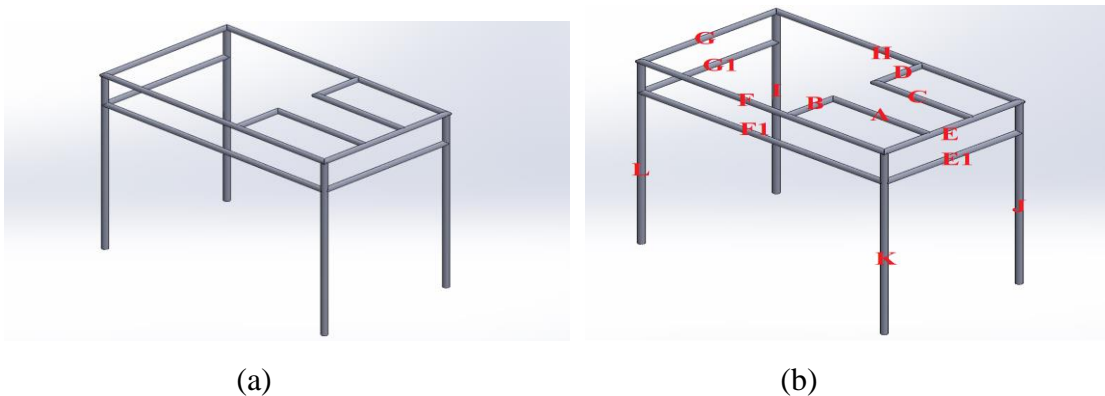


Figura 16: Diseño preliminar del soporte estructural de prototipo de freno regenerativo.

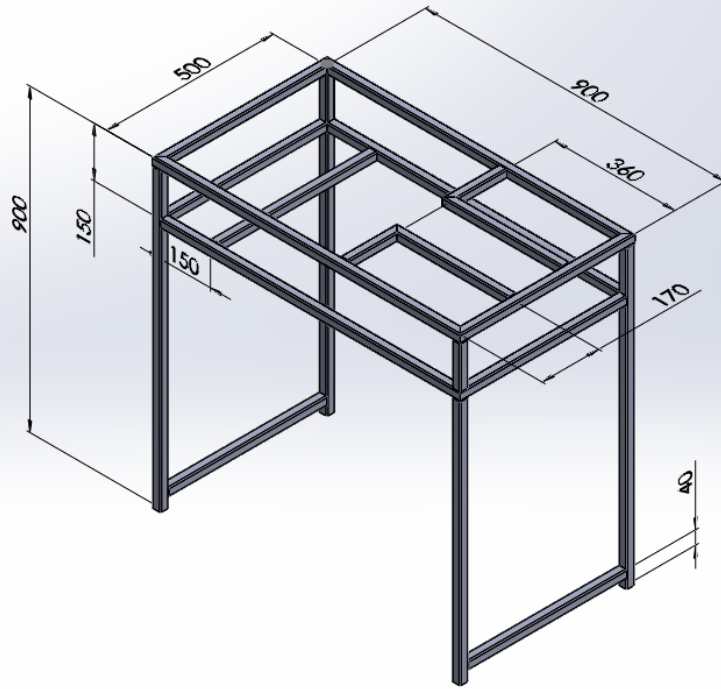


Figura 17: Medidas preliminares para cálculos y modelamientos del soporte estructural en mm.

En las figuras anterior se visualiza la ejemplificación de la estructura para el soporte y carcasa del prototipo en forma de mesa la cuales las barras E, F, G, H, I, J, K y L son la estructura básica y las barras A, B, C, y D son las que soportan el volante. Las barras A y C su medida está dada por el radio más una medida, para dejar un espacio, para que el volante pueda girar libremente.

Las barras B y D su medida está dada de restarle la medida del eje de agarre a agarre que es de 0.16 m lo cual para el diseño preliminar de 0.5m en la barra E queda un espacio de 0.34m lo cual se divide en 2 y se obtiene que las barras B y D tienen una medida de 0.17m.

Las barras E1, F1, y G1 son barras preliminares en el diseño donde se ponen o se apoyan los elementos como el motor de transmisión de potencia, el soporte del pedal de regeneración, la palanca donde va la rueda conducida de regeneración y el motor de regeneración.

4.3 Cálculo estático de fuerzas en la estructura sección barras A, B, C, y D

Para calcular la carga o esfuerzo máximo que debe soportar en un punto específico se toma el volante de inercia que es el elemento con más peso y que concentra este en unos puntos

específicos, esto con el fin de hallar los esfuerzos mecánicos máximos que debe soportar la estructura para seleccionar un material que soporte estas cargas, una vez seleccionado el material se puede hacer el estudio para comprobar cálculos en el programa CAD SolidWorks. Se ubica el eje del volante de inercia en las uniones de las barras AB y CD como se muestra en la siguiente figura:

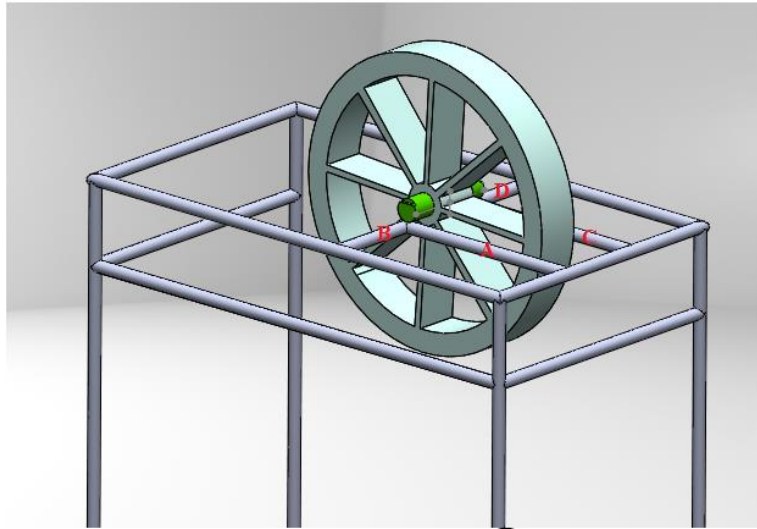


Figura 18: Imagen de referencia para ubicación de las uniones AB y CD que soportan el volante de inercia.

4.3.1 Cargas en el eje del volante de inercia

Entonces se toma el eje del volante de inercia como una viga en voladizo empotrada en sus 2 extremos y se hallan las reacciones para saber cuáles son las cargas que soportaran las uniones de las barras AB y CD. Para hallar el peso de diseño que va a soportar el eje se le pone un factor de diseño de 2 entonces:

$$W_{eje} = m * g = 4.2kg * 9.81 \frac{m}{s^2} = 41.202 N \quad (4.20)$$

Donde.

W_{eje} : Carga del volante de inercia sobre el eje

m: Masa del volante

g: Constante de gravedad

Con el factor de seguridad queda:

$$W_{seje} = W_{eje} * N = 41.202 N * 2 = 82.404 N \quad (4.21)$$

Donde.

W_{seje} : Carga del volante de inercia sobre el eje con factor de seguridad

N: Factor de seguridad

Entonces con el resultado de la ecuación (4.21) se hace una esquema el cual muestra las cargas y las reacciones sobre el eje del volante de inercia

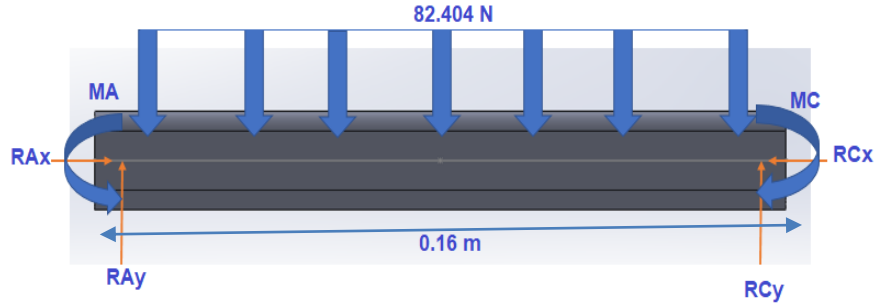


Figura 19: Cargas sometidas al eje de rotación que soporta el volante de inercia.

En la figura anterior vemos el eje del volante tratado como viga sometida a cargas estáticas para visualizar la respuesta de las reacciones y momentos. Se utiliza como guía casos especificados de resolución de problemas estáticos en vigas para calcular los valores de las reacciones como se ilustra a continuación

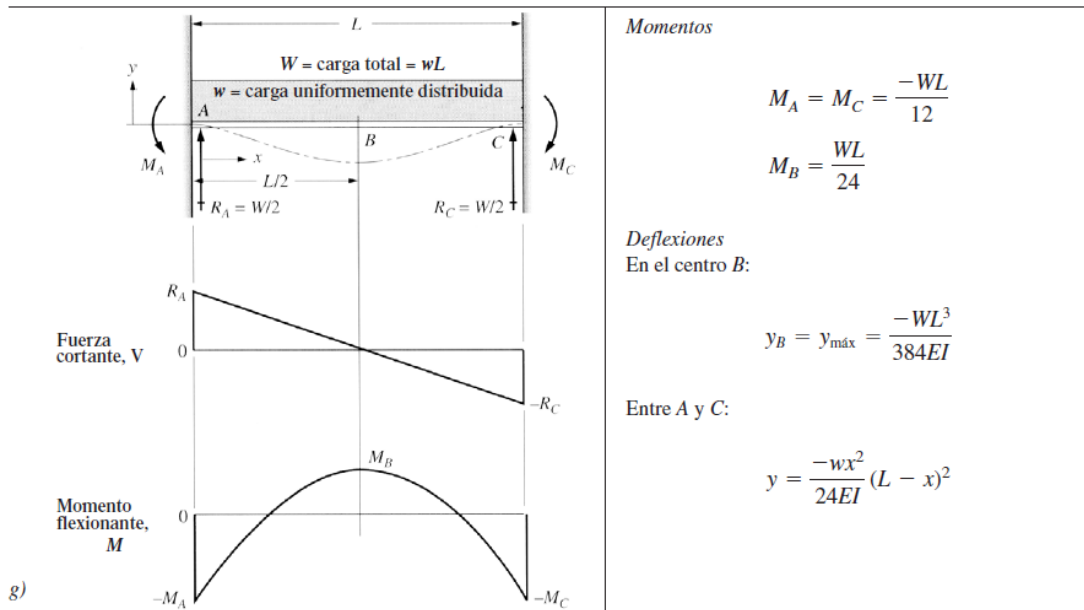


Figura 20: Caso de viga específico con empotramiento de lado a lado [20].

Entonces con estos planteamientos se hallan las reacciones

$$MA = MC = 1.098 N * m \quad (4.22)$$

$$|RAy| = |RCy| = 41.202 N \quad (4.23)$$

4.3.2 Análisis estático en el conjunto de barras AB y CD

Dando un análisis al resultado la carga de 82.404 N se dividió entre los 2 soportes del eje, haciendo que donde va a ir soportado el eje cada lado tendrá una carga de 41.202 N, en este caso las uniones de la barra AB y BC como se muestra en la inercia. Como sus longitudes de las barras son similares como se presentan a continuación:

$$\text{barra A} = \text{barra C} = 0.36m \quad (4.24)$$

$$\text{barra B} = \text{barra D} = 0.17m \quad (4.25)$$

$$\text{carga en union AB} = \text{carga en union CD} = 41.202 N \quad (4.26)$$

Entonces se calcula una sola unión de barras y sus resultados serán iguales en el análisis estático

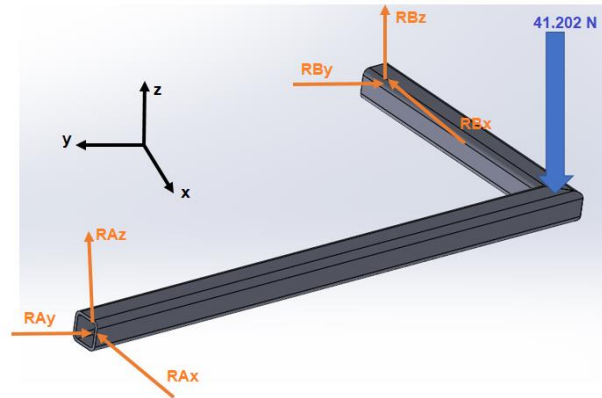


Figura 21: Unión AB sometida a carga o peso de volante.

Entonces se procede a hacer el cálculo de momentos y esfuerzo sobre vigas con la reacción planteada en la **figura 19**.

$$\begin{aligned} \sum MA=0; & 0.36m (j) \times 41.202N(-k) + 0.36m (j) \times RBx(i) + (0.36m (j) + \\ & 0.17m (-i)) \times \\ & RBy(j) + (0.36m (j) + 0.17m(-i)) \times RBz (k) = 0 \end{aligned} \quad (4.27)$$

$$\sum MA = -14.833(i) - 0.36 RBx(k)+0 - 0.17RBy (k) + 0.36RBz (i) + 0.17RBz(j) = 0 \quad (4.28)$$

$$\sum Mx = 0 ; -14.833Nm + 0.36RBz = 0 \quad (4.29)$$

$$RBz = 41.202$$

$$\sum Fx = 0 ; \sum Fy = 0 ; \sum Fz = 0 ; \quad (4.30)$$

$$RAy=0; RAz=0; RAx=0; RBy=0; RAx=0;$$

El resultado de la ecuación (4.29) muestra que la barra B es la que va a recibir toda la carga, esto era de esperarse, ya que al ser de menor medida de la barra b su distribución de pesos a lo largo de su cuerpo va a hacer más concentrado o va hacer la primera en recibir todo el peso. Se procederá a hacer un análisis de la barra B en voladizo para determinar más factores de esfuerzo ubicados en esta barra y así poder aprobar el material de forma preliminar.

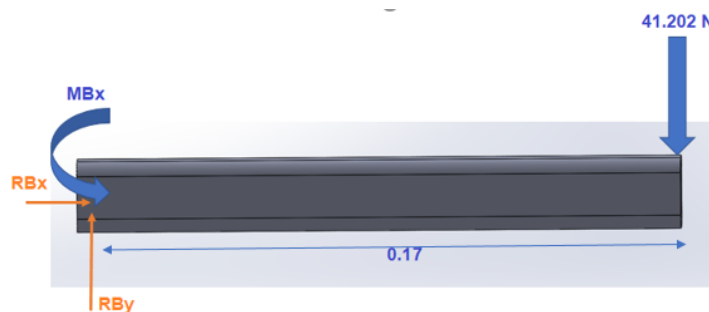


Figura 22: Barra B sometida a cargas que ejerce el volante de inercia.

$$\sum MB = 0 ; -41.202N * 0.17m + MBx = 0 \quad (4.31)$$

$$MBx = 7 \text{ Nm}$$

$$\sum Fy = 0 ; -41.202 + RBy = 0 \quad (4.32)$$

$$RBy = 41.202$$

$$\sum Fx = 0 ; RBx = 0 \quad (4.33)$$

$$RBx = 0$$

Los cálculos anteriores dan la fuerza cortante máxima y el momento flexiónate máximo que va a soportar en un punto determinado de la estructura soporte del prototipo. Se procede a escoger un material preliminar con el cual se pueda construir la estructura, para esto se averiguo por sitios web proveedores de barras o vigas para estructuras y se eligió un tubo hueco cuadrado de acero NTC4526 que en equivalencia internacional viene aproximándose a las características del acero ASTM A500, ya que diseñar un miembro estructural que resista torsión y flexiones se recomienda por resistencia y economía barras con estructura hueca de forma cerrada y para facilitar cálculos se escoge un tubo hueco cuadrado [20]. Para el diseño preliminar se escoge la medida del tubo de 1" X 1" calibre 18 o espesor 0.12 milímetros.

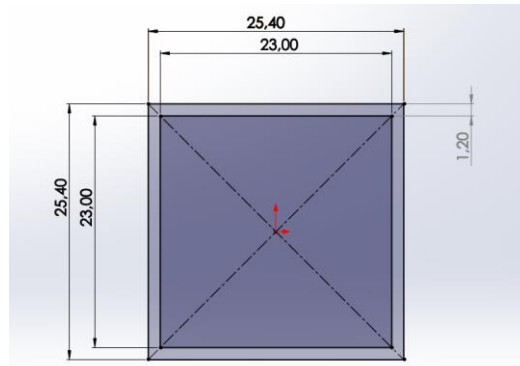


Figura 23: Medidas del perfil de selección preliminar.

Para hallar I se consigue en un libro de diseño de máquinas como por ejemplo Diseño de elementos de máquinas de Robert Mott

$$I = \frac{(0.0254m)^4}{12} - \frac{(0.023m)^4}{12} = 1.137 \times 10^{-8} m^4 \quad (4.34)$$

Para hallar Q.

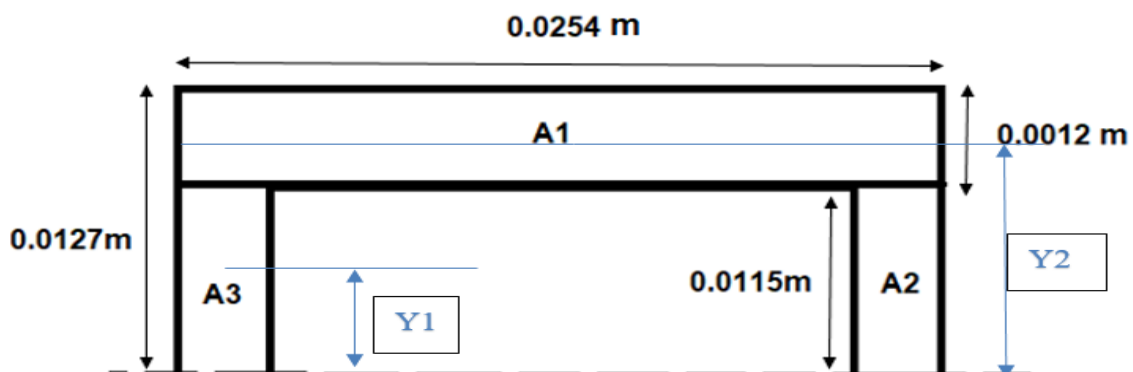


Figura 24: Medidas para hallar el primer momento con respecto al eje centroidal.

$$A1 = 0.0254m * 0.0012m = 30.48x10^{-6}m^2$$

$$A2 = A3 = 0.0115m * 0.0012m = 1.38x10^{-5}m^2$$

$$Q = \sum A\bar{y} = (30.48x10^{-6}m^2 * 0.0012m) + 2(1.38x10^{-5}m^2 * 0.00575m) = 1.953x10^{-7}m^3 \quad (4.35)$$

Entonces ya se tienen las variables para calcular el torque máximo que se ejercerá sobre la viga con la carga más alta en toda la estructura con la ecuación(2.19) :

$$Q = 1.953x10^{-7}m^3; t = 0.0012 m; V = 41.202 N; I = 1.137x10^{-8} m^4$$

$$\tau_{max} = \frac{41.202N * 1.953x10^{-7}m^3}{1.137x10^{-8}m^4 * 0.0012m} = 58976.5 Pa = 0.59MPa$$

Ahora se procede a calcular la máxima fuerza normal cortante que soportara la estructura en un solo punto con la ecuación (2.21)

Entonces las variables con las que se van a calcular la fuerza normal cortante son:

$$M_{max} = 7Nm; c = 0.0127m; I = 1.137x10^{-8}m^4;$$

$$\sigma = \frac{7Nm * 0.0127m}{1.137x10^{-8}m^4} = 7818821.5 Pa = 7.82Mpa$$

Ahora analizando los resultados con el valor de resistencia ultima a la fluencia y resistencia ultima a la tensión del material preliminar que escogimos por tener su norma, ser económico y de fácil adquisición que es el NTC 4526 o ASTM A500 con $S_y = 270 MPa$ y $S_u = 310 MPa$ se concluye que el material es seguro para esas cargas y por varias veces ese peso [24].

Normatividad

La Tubería Estructural METALTUB de ACESCO es fabricada bajo norma ASTM A500 Grado C en espesores 1.5mm a 10mm; bajo norma ASTM A500 Grado A para espesores de 12mm y bajo norma NTC 4526.

Especificaciones Técnicas

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS METALTUB ESTRUCTURAL						
ASTM A500		Resistencia a la Fluencia mínima		Resistencia a la Tracción mínima		Elongación mínima
		MPa	psi	MPa	psi	%
Redondo	Grado A	230	33000	310	45000	25
	Grado C	315	46000	425	62000	21
Cuadrado y Rectangular	Grado A	270	39000	310	45000	25
	Grado C	345	50000	425	62000	21

TOLERANCIAS	
Longitud ≤ 6.5m	-6mm, +13mm
Longitud > 6.5m	-6mm, +19mm
Espesor de pared	± 10%

Para otras tolerancias remitase a la norma ASTM A 500 o NTC 4526.

Figura 25: Normativa NTC 4526 O ASTM a500 de aceros [24].

4.4 Cálculos y modelamiento de diseño del conjunto mecánico de acople para generación

En éste conjunto se utilizará un pedal de máquina de coser, ya que son conocidos por funcionar por medio de cadena, que, al ejercer una fuerza sobre el pedal en dirección al suelo, esta se transmite por la cadena, después pues a una barra que funciona por la ley física de la palanca. Por tanto, para el mecanismo tendrá como función levantar el motor de generación que está inclinado hasta acoplar con el volante de inercia del prototipo, para por tanto con esta idea el diseño preliminar seria el siguiente:

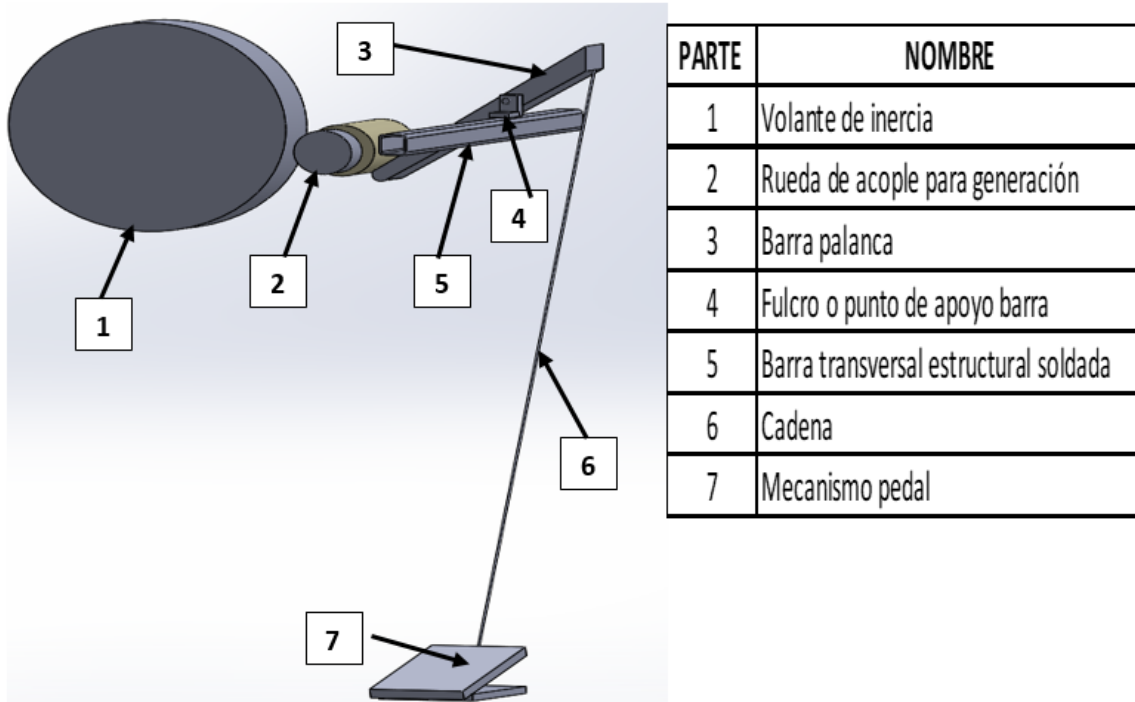


Figura 26: Diseño idealizado del sistema de regeneración para el prototipo.

Se pone una cadena ya que si hay un sobre esfuerzo esta se desacopla del sistema, pero solo recibiendo el daño en un solo eslabón de esta, y, por tanto, se puede reemplazar fácilmente a diferencia de una varilla

Se pondrá un tornillo en la base del pedal apuntando a la parte superior del pedal, esto con el fin de indicar al usuario el máximo recorrido que puede hacer el pedal, una imagen para la idealización de esto es la siguiente:

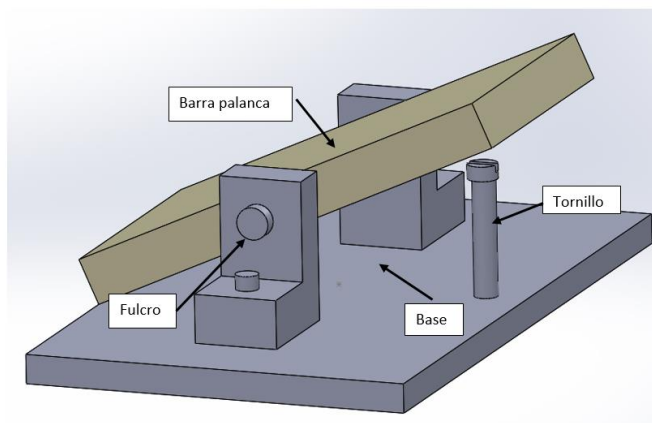


Figura 27: Pedal del sistema de regeneración.

Se deduce que las piezas que van a estar sometidas a varias cargas y se deben estudiar estáticamente son la palanca y el eje o fulcro que permiten el efecto palanca de la barra en

el conjunto. En el pedal se estudiará cual es la fuerza necesaria para levantar el motor de su punto inclinado al punto de acople con el volante, ya que este ya es diseñado para soportar la carga que lo somete una persona. Por tanto, primero se hace un estudio a la barra del conjunto que actúa como palanca, y con los resultados se puede estudiar el eje del fulcro

4.4.1 Cálculos de palanca para barra del conjunto

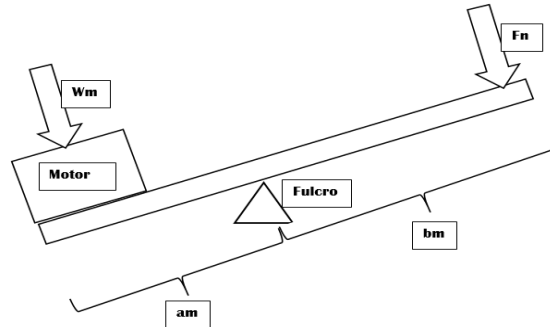


Figura 28: Cargas sometidas a la barra palanca de regeneración.

Si el motor pesa de 0.5 kg a 1.5 kg se toma la masa de mayor valor para hacer el cálculo, de la fuerza requerida para levantar el motor de su estado de reposo inclinado por tanto se utiliza la siguiente ecuación con los parámetros visualizados en la **Figura 28:** Cargas sometidas a la barra palanca de regeneración.:

$$F_n * a_m = W_m * b_m \quad (4.36)$$

Donde.

F_n : Fuerza normal del motor

a_m : Distancia del fulcro a la fuerza W_m

W_m : Carga del motor

b_m : Distancia del fulcro a la fuerza F_n

Estos son los parámetros para el cálculo:

$$a_m = 0.15 \text{ m}; b_m = 0.15 \text{ m}; W_m = \left(1.5 \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = 14.715 \text{ N}$$

Entonces despejando la ecuación (4.36) :

$$F_n = \frac{W_m * b_m}{a_m} = \frac{14.715 \text{ N} * 0.15 \text{ m}}{0.15 \text{ m}} = 14.715 \text{ N}$$

Con este resultado se afirma que la fuerza que se debe aplicar el pedal y esta se transmite a través de la cadena y la barra del conjunto es de 14.715 N. Ahora se puede proceder a hacer un estudio estático a la barra para determinar si soporta esta fuerza y cuál será la fuerza o carga que le transmite al eje del fulcro

4.4.2 Análisis estático de la barra del conjunto

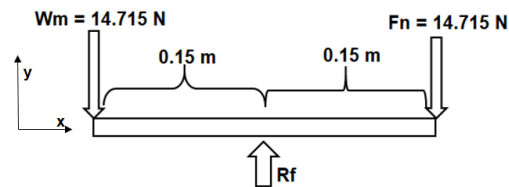


Figura 29: Diagrama de cuerpo libre de la barra palanca de regeneración.

$$\sum Fy = 0; -Wm - Fn + Rf = 0 \quad (4.37)$$

$$Rf = Wm + fn$$

$$Rf = 29.42 \text{ N}$$

Si se plantea que $F_n=0$ y la distancia se acorta a la mitad del fulcro esto con el fin de saber qué momento flexionante va a soportar R_f cuando se deje de presionar el pedal. Entonces la viga se toma en voladizo como se ilustra a continuación:

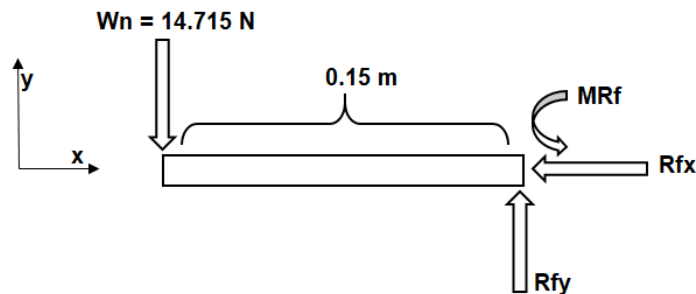


Figura 30: Diagrama de cuerpo libre de la barra palanca de regeneración de la parte del motor.

$$\sum MRf = 0; -14.715\text{N} * 0.15\text{m} - MRf = 0 \quad (4.38)$$

$$MRf = 2.2 \text{ Nm}$$

Como se va a utilizar el mismo material y forma de la estructura soporte que es acero ASTM A500 en tubo hueco cuadrado 1"x1" espesor 1.2mm y las fuerzas de los cálculos anteriores son inferiores a los hechos en la estructura, se puede concluir que la barra soportara muy bien la cargas sobre ellas. Ahora con estas reacciones de los cálculos anteriores se puede proceder al estudio estático de fuerzas que actuaran sobre el eje del fulcro.

4.4.3 Cálculos del eje del fulcro de la barra palanca

En la siguiente figura se mostrará las cargas o fuerzas sobre el eje del fulcro que actúa como viga estática:

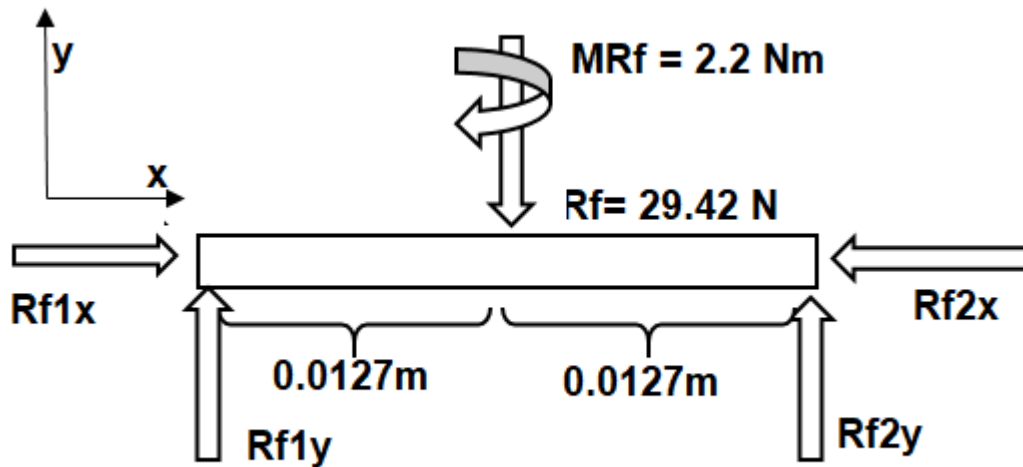


Figura 31: Diagrama de cuerpo libre del eje de rotación de la palanca de regeneración

$$\sum Mf1 = 0; -(29.42Nm * 0.0127) - 2.2Nm + 0.0254 * Rf2y = 0 \quad (4.39)$$

$$Rf2y = 101.34 N$$

$$\sum Fy = 0; 101.34N + Rf1y - 29.42N = 0 \quad (4.40)$$

$$Rf1y = 71.92N$$

Según la formula especial de esfuerzo cortante para un circulo es:

$$\tau_{max} = \frac{4V_{max}}{3A} \quad (2.41)$$

Ahora para hallar el momento de flexión utilizamos la ecuación (2.23):

Se pone como eje preliminar fulcro de pedal de máquina de coser de acero galvanizado con eje de 1/4". La página de ACESCO especializadas en metales brinda la información del acero galvanizado el cual es $S_y = 230\text{MPa}$ y $S_u = 310\text{MPa}$ al acero galvanizado con mínimo valor S_y , entonces tomamos este como referencia.

Los parámetros para hallar estas fuerzas son

$$D = \frac{1}{4} \text{pulgada} = 0.00635\text{m}; I_o = \frac{\pi D^4}{6}; S_o = \frac{\pi D^2}{32}; A_s = \frac{\pi D^2}{4}$$

Entonces

$$A_s = 3.17 \times 10^{-5} \text{m}^2$$

$$I_o = 0.852 \times 10^{-9} \text{m}^4$$

$$S_o = 3.96 \times 10^{-6} \text{m}^3$$

Por tanto resolviendo la ecuación (2. 41):

$$\tau_{max} = \frac{4(101.34\text{N})}{3(3.17 \times 10^{-5})\text{m}^2} = 4262460.7 \text{Pa} = 4.3 \text{Mpa}$$

Ahora con los parámetros definidos utilizamos la ecuación (2.23)

$$\sigma_{max} = \frac{M}{S} = \frac{2.574\text{Nm}}{3.96 \times 10^{-6} \text{m}^3} = 6500000 \text{Pa} = 6.5 \text{MPa}$$

Dado los cálculos anteriores el perno resiste las cargas propuestas, has muchas veces esa cantidad:

$$N = \frac{\sigma}{\sigma_d} = \frac{230 \text{MPa}}{6.5 \text{MPa}} = 35.38 \text{MPa} \quad (2. 42)$$

Se puede afirmar que su factor de diseño soporta 35 veces esa carga propuesta

4.5 Análisis de uniones soldadas

Para soldaduras se debe procurar hacer un mismo espesor de cordón de soldadura para evitar concentraciones de esfuerzos. Por tanto si esto se cumple la soldadura tendrá más resistencia de esfuerzos que el propio material a unir [20] [19]. Así no se necesita análisis especiales de unión, si ya se ha hecho el estudio de seguridad del material a unir por soldadura. Pero según el tipo de unión, material y forma se deben cumplir las siguientes características:

4.5.1 Tipo de electrodo

Para aceros ASTM A500 se recomienda un electrodo tipo E60 [20].

4.5.2 Tipo de soldadura

Para este tipo de forma cuadra de barras se recomienda el cordón de soldadura tipo chaflán sin penetración en las orillas [20].

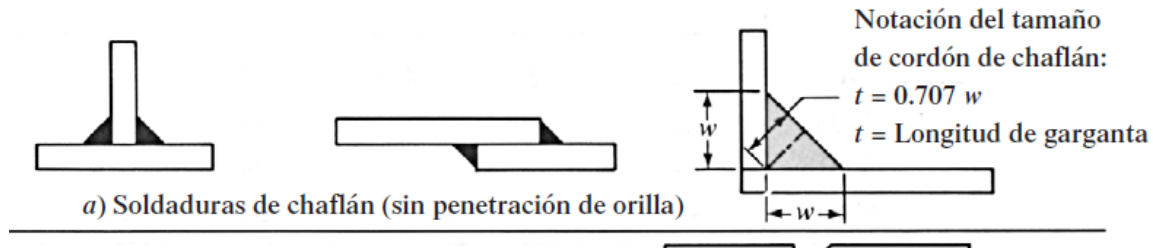


Figura 32: ilustracion de union por soldaduras de tipo chaflan [20].

4.5.3 Tamaño mínimo de la soldadura

Para tamaños iguales a menores de 0.5 pulgadas en espesor de perfil se recomienda un cordón de espesor 3/16 de pulgada para barras o placas [20].

4.6 Diseño de transmisión de potencia por cadena para el prototipo

Las características preliminares calculadas anteriormente y necesaria para hacer los modelamientos son:

Potencia del sistema: $51 \text{ W} = 0.069 \text{ hp}$

Velocidad de salida $n_2 = 395 \text{ rpm}$

Velocidad de entrada $n_1 = 592.5 \text{ rpm}$

Relación de potencia $RP = 1.5$

N. hileras = 1

Paso de la cadena $p = 0.5$ pulgadas

Diámetro de paso piñón pequeño $D_{pp} = 0.05 \text{ m} = 1.97$ pulgadas

Diámetro de paso piñón grande $D_{pg} = 0.075 \text{ m} = 2.95$ pulgadas

$$N_1 = \frac{D_{pp} * \pi}{p} = \frac{1.97 \text{ pulg} * \pi}{0.5 \text{ pulg}} = 11 \text{ a } 12 \text{ dientes} \quad (2.43)$$

$$N_2 = N_1 * RP = 11 \text{ dientes} * 1.5 = 16 \text{ a } 17 \text{ dientes} \quad (2.44)$$

Con el número de dientes en transmisiones por cadenas $N_1= 17$ dientes y $N_2= 11$ dientes. Entonces se procede a verificar

$$n_2 = n_1 \left(\frac{N_1}{N_2} \right) = 592.5 \text{ rpm} * \frac{11 \text{ dientes}}{17 \text{ dientes}} = 383.4 \text{ rpm} \quad (2.45)$$

Como n_2 no supera las condiciones iniciales de velocidad de salida de 395 rpm es aceptable para el diseño. Ahora veremos la longitud ideal de cadena para nuestra transmisión de potencia

$$L = 2p + \frac{N_2 + N_1}{2} + \frac{(N_2 - N_1)^2}{4\pi^2 p} \quad (2.46)$$

De la ecuación (2.46) se despeja y obtenemos el número de eslabones de paso 40 o de medida de 0.5 pulgadas

$$L = 2(40) + \frac{17 + 11}{2} + \frac{(17 - 11)^2}{4\pi^2 * 40} = 94 \text{ pasos}$$

$$L = 94 \text{ pasos} * 0.5 \text{ pulg} = 47 \text{ pulg}$$

Ahora se procede hallar la distancia ideal entre centros de piñón

$$C = \frac{1}{4} \left[L - \frac{N_2 + N_1}{2} + \sqrt{\left(L - \frac{N_2 + N_1}{2} \right)^2 - \left(\frac{8(N_2 - N_1)^2}{4\pi^2} \right)} \right] \quad (2.47)$$

De la ecuación (2.47) se puede hallar la distancia ente centros de los piñones

$$C = \frac{1}{4} \left[94 - \frac{17 + 11}{2} + \sqrt{\left(94 - \frac{17 + 11}{2} \right)^2 - \left(\frac{8(17 - 11)^2}{4\pi^2} \right)} \right] = 40 \text{ pasos}$$

$$C = 40 \text{ pasos} * 0.5 \text{ pulg} = 20 \text{ pulg}$$

Entonces el diseño de la transmisión de potencia seria el siguiente

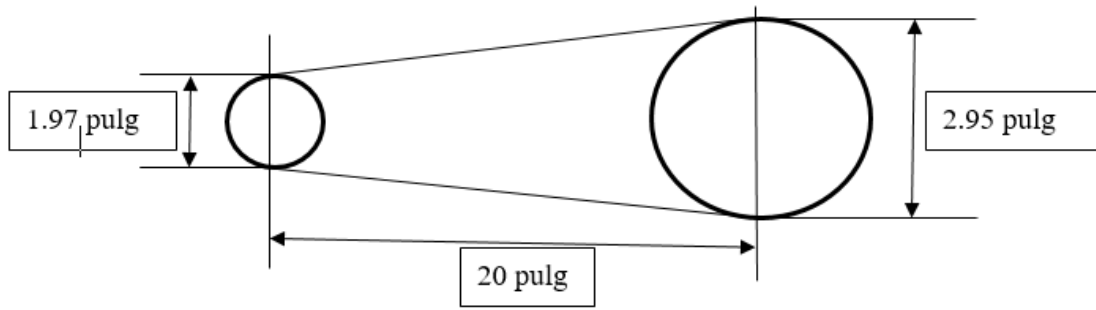


Figura 33: Medidas del sistema de transmisión de potencia.

5. Modelamiento CAD

5.1 Cálculo estático de fuerzas en la estructura sección barras A, B, C, y D en SOLIDWORKS

Se hace un análisis en estas partes de la estructura ya que el elemento con más carga está ubicado en estos nodos con un peso de 82.404 N que es el volante de inercia y al ser apoyado en dos puntos de forma simétrica en cada nodo se pone una carga de 41.404 N con sujeciones de fijas en las patas de la estructura

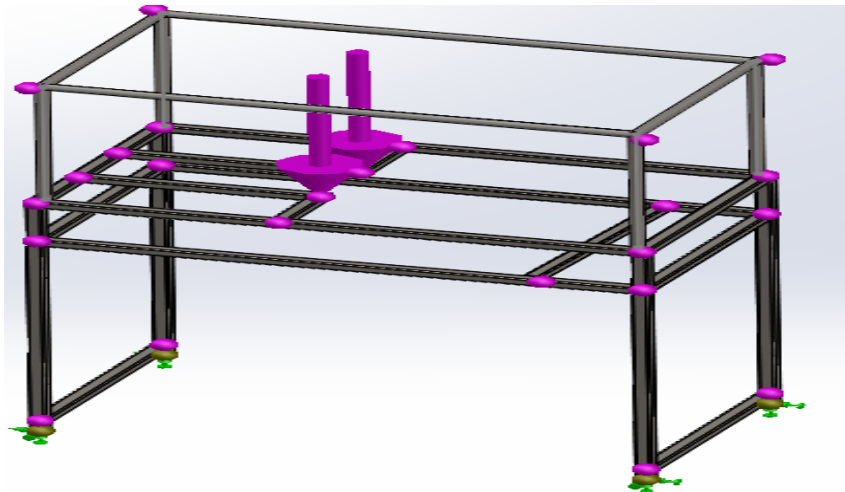


Figura 34: Ubicación de las carga del volante en la estructura del prototipo.

Con los parámetros ya establecidos:

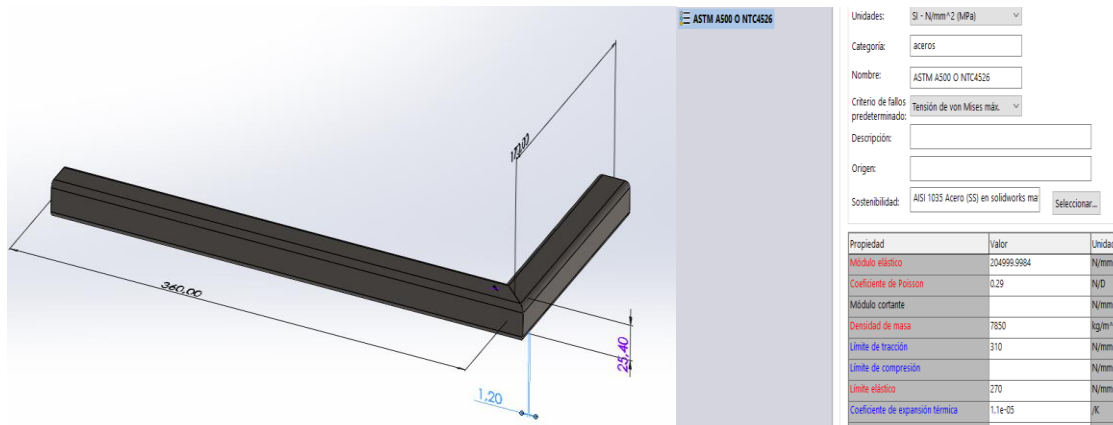


Figura 35: Parámetros del acero y perfil en la unión AB.

El análisis estático de elementos finitos arroja que el esfuerzo de flexión normal que tendrá es de 7.6 MPa, pero al material tener un límite ultimo de fluencia de 270 MPa no hay problema con esta carga el análisis es aproximado a los resultado del análisis estático en el apartado [4.3.2](#) de este trabajo que fue de 7.82 MPa.

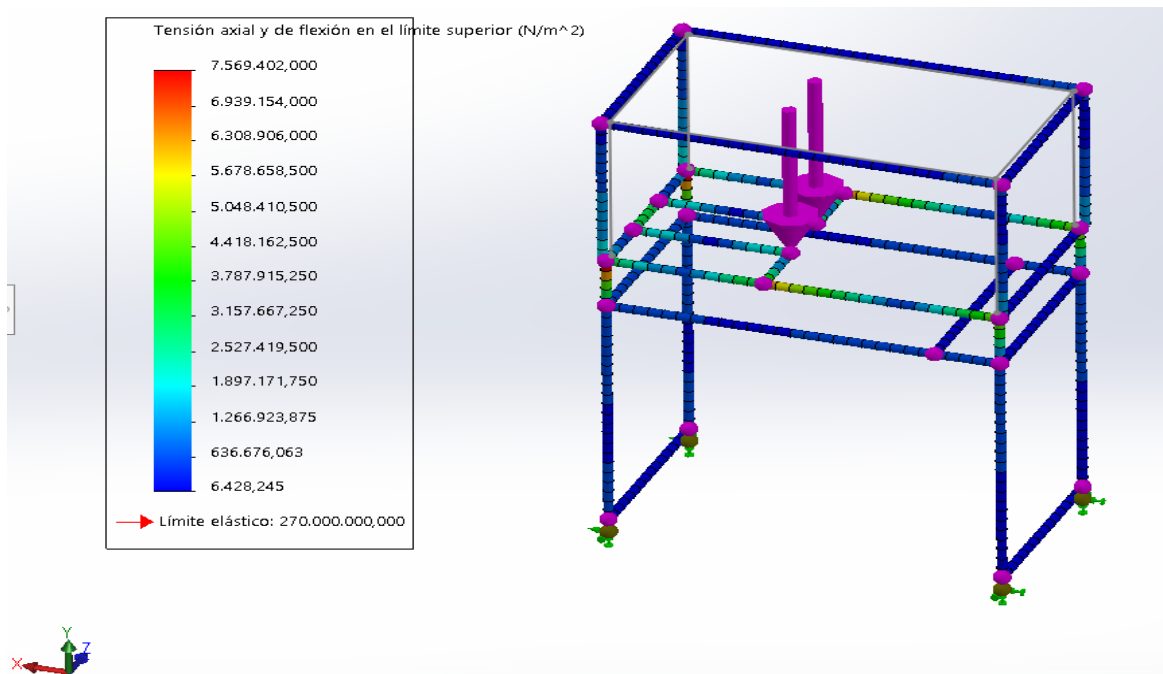


Figura 36: Análisis estático en la estructura del prototipo con la carga más impacto.

Este análisis indica que el punto de flexión máximo está en la barra de menor longitud que es la barra B, pero el material no tiene problema para esta carga porque no alcanza ni se acerca a su límite de fluencia

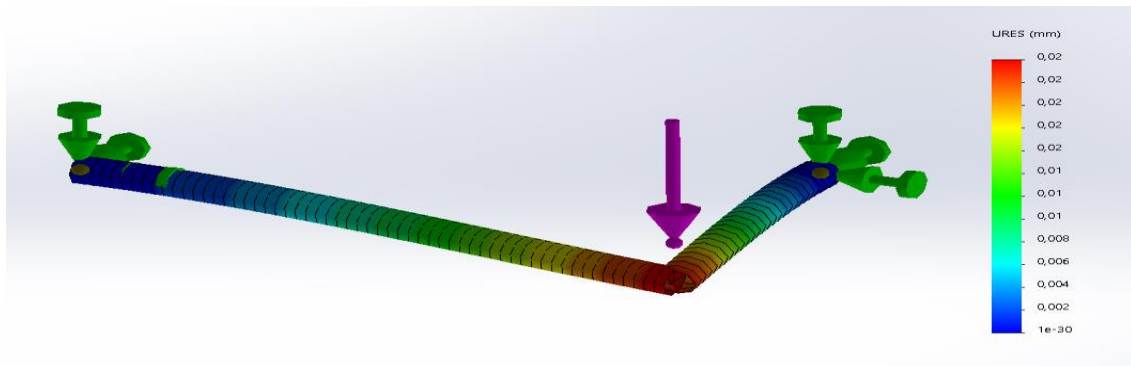


Figura 37: Desplazamiento en el punto de la carga en la unión AB.

Este análisis indica el desplazamiento que tiene el elemento analizado, este desplazamiento es de 0.02mm y se da en la unión de las barras

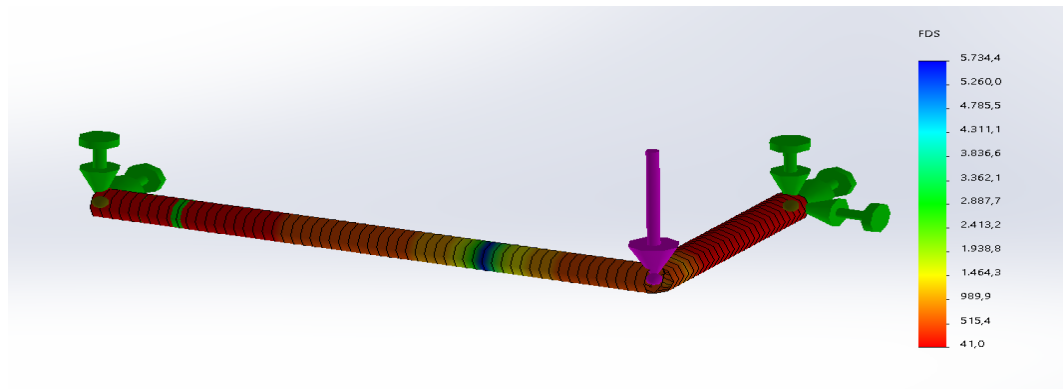


Figura 38: Factor de seguridad según la carga en la unión AB.

Este resultado indica que su factor de seguridad puede soportar hasta 41 veces la carga inicial puesta para el análisis estático

Con estos resultados se puede concluir que la forma y el material preliminar es apta con extrema seguridad y se puede cambiar el material y las medidas de la forma de las barras por unos que no exageren en su factor de seguridad pero al ser este material y forma la más accesible en acero estructurado con sus respectivas normas e indicadores se escoge porque un material más económico sería el acero comercial pero, éste no cuenta con normas ni indicadores que me permitan hacer cálculos estáticos por ende se selecciona el acero NTC4526 tubo hueco cuadrado 1"x1" de grosor de 1.2mm

5.2 Análisis estático del eje del volante de inercia

Para este análisis se dejan la sujeciones fijas en donde van ubicadas las chumaceras (flechas verdes) y las cargas de fuerza y torsión alrededor del eje, que es donde se va a alojar el volante de inercia las carga de fuerza es de 82.404 N como se vio previsto a lo largo del trabajo y de torsión son de 1.098 Nm calculado en la sección [5.3.1](#) , con revoluciones del motor a 41.36 rad/s como se calculó en la sección [4.1](#).

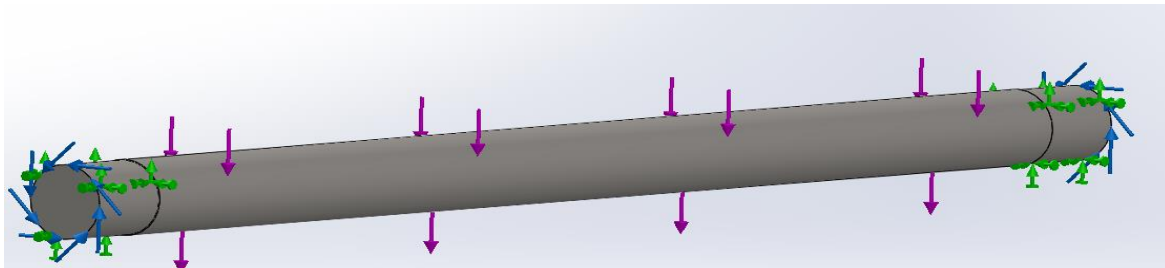


Figura 39: Ubicación de parámetros para análisis estático en el eje del volante.

Entonces ejecutando el análisis estático no da un esfuerzo de 13 MPa aproximadamente con un parámetro de 350 MPa de límite de fluencia con un acero ANSI 1020 del eje por tanto el eje es seguro para estas cargas

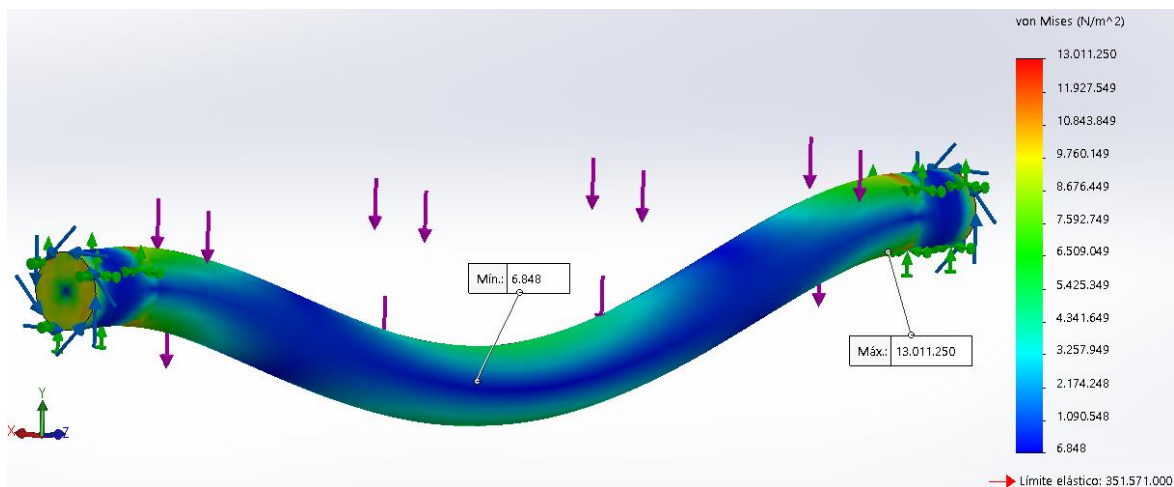


Figura 40: Resultados de análisis estático en el eje del volante.

Analizando el factor de seguridad que no brinda el análisis del programa no arroja un factor de seguridad de aproximadamente 27.

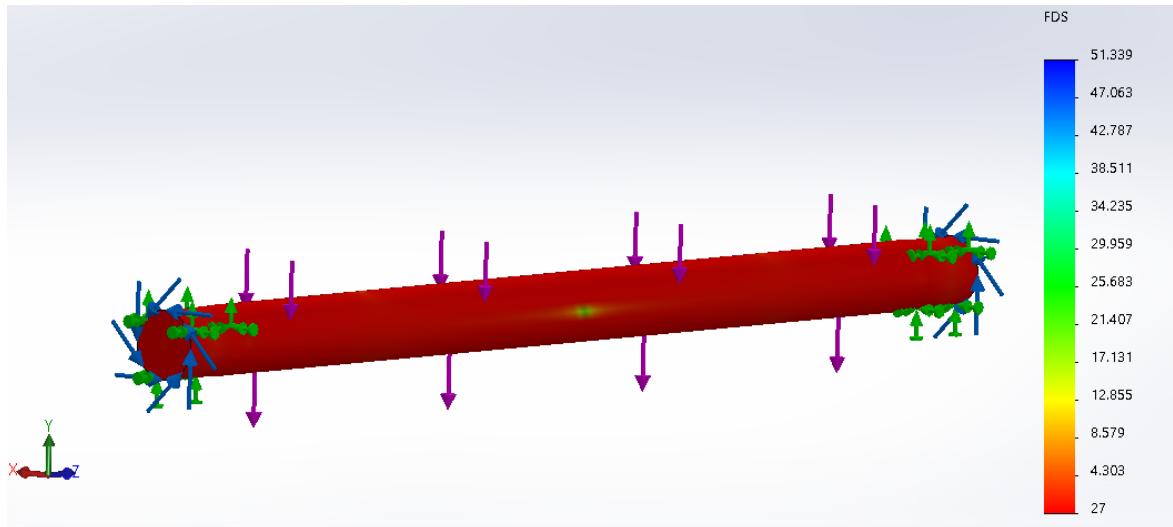


Figura 41: Resultados de factor de seguridad para el eje del volante.

5.3 Análisis de frecuencia en el eje de volante para calcular velocidad crítica

Se toma el eje del volante con un diámetro de 10mm, longitud de 190mm y con una selección de material de acero ANSI 1020 que es típicamente los ejes más comunes vendidos en el mercado y se somete a un estudio de frecuencia.

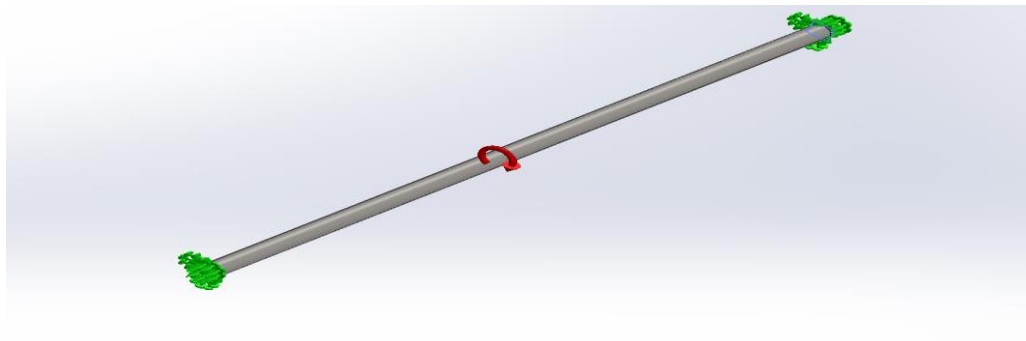


Figura 42: Ubicación de parámetros para análisis de frecuencia en el eje del volante.

Se ponen restricciones de tipo fijo en sus extremos ya que hay es donde se ubicaran los rodamientos y se le pone una fuerza centrífuga de 592.5 rad/s como se calculó en la sección 4.1 para el eje de volante de inercia, ya que esta es la máxima velocidad angular que está diseñado el sistema en rotar y dado a que la frecuencia natural depende de la fuerza inerciales del eje no de las fuerzas externas aplicadas a esté, también llamado esto como velocidad crítica [23] [21].

Nombre de estudio: Estudio de frecuencia 1

Nº de modo	Frecuencia(Rad/seg)	Frecuencia(Hertz)	Periodo(Segundc
1	9484.7	1509.5	0.00066246
2	9484.8	1509.6	0.00066245
3	25683	4087.6	0.00024464
4	25683	4087.6	0.00024464
5	49153	7823	0.00012783

Tabla 7: Resultado de frecuencias resonantes para el eje del volante.

Ejecutando el análisis de frecuencia el programa arroja que la primera frecuencia a la que el eje no puede estar es a 1509.5 Hz que en vueltas o velocidad critica a las que el eje no puede girar es a 9484.7 rad/s o 993.23 rpm, por tanto, al tener un diseño para que el eje gire máximo de 592.5 rpm que la velocidad máxima que gira el volante de inercia, el eje es seguro para el modelo y evita entrar en resonancia.

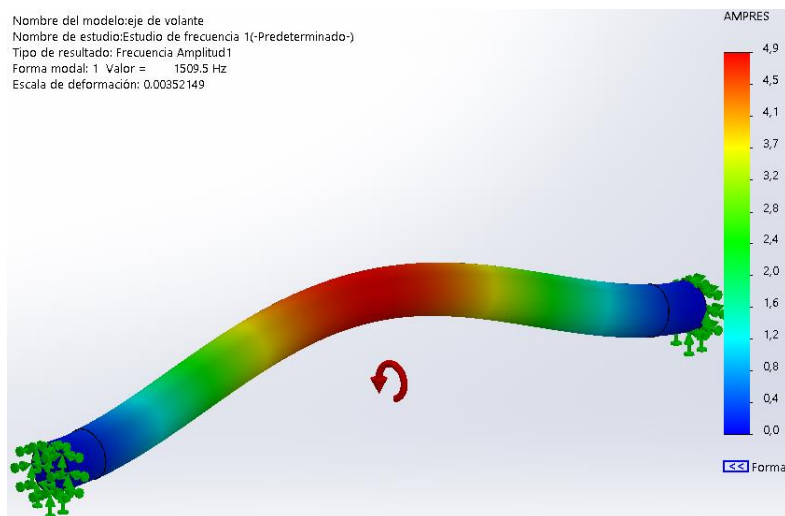


Figura 43: Eje con una frecuencia resonante de 9484.7 rad/s.

5.4 Modelo CAD del prototipo

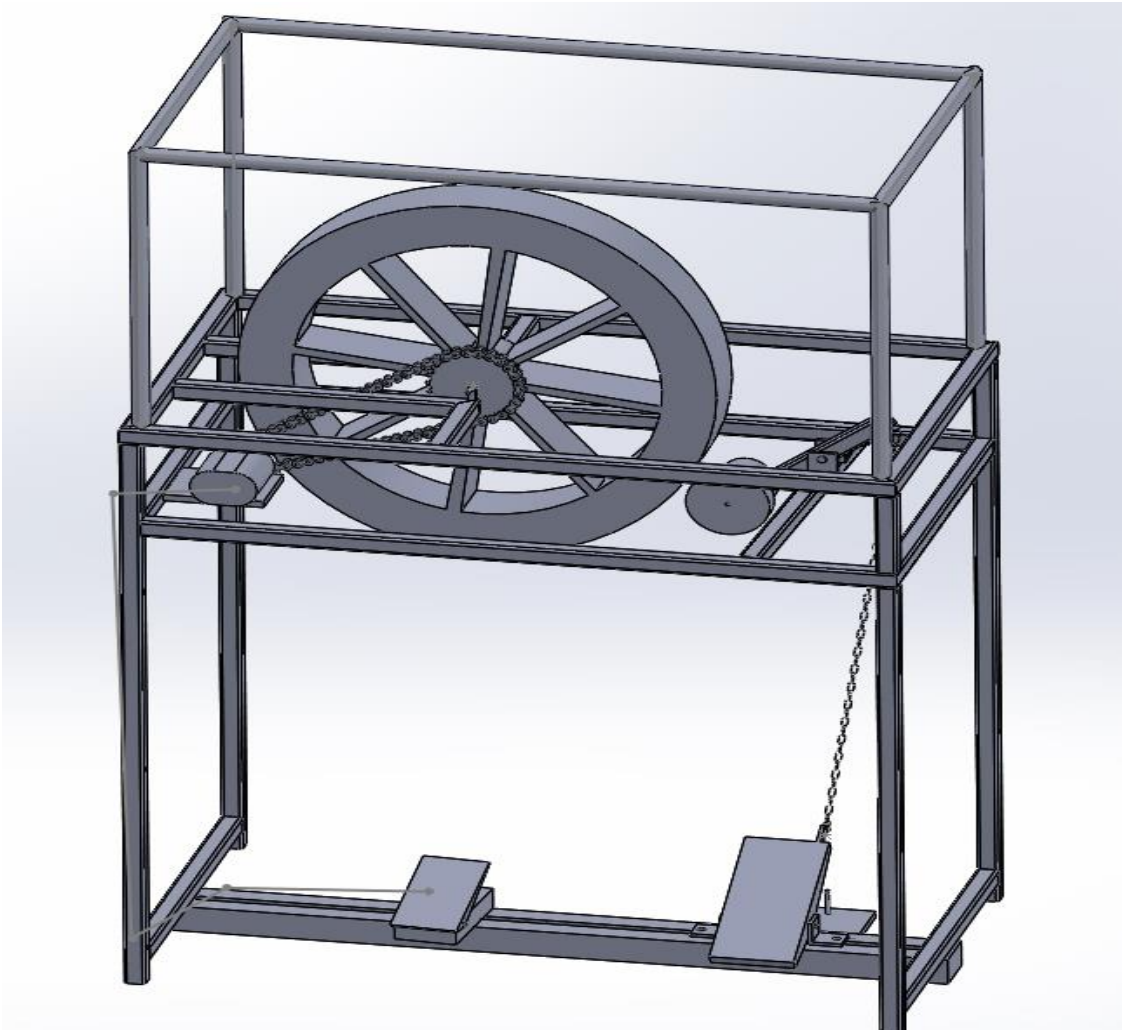


Figura 44: Prototipo de freno regenerativo en fase mecánica.

5.5 Calculo de fuerza o trabajo requerido en el pedal de regeneración

Para poder saber cuál será el trabajo máximo que se podrá ejercer en el pedal de regeneración para no haber un sobre esfuerzo y afectar el mecanismo, tomamos las siguientes medidas del prototipo CAD y analizamos cual sería la longitud de la cadena y el tornillo que será el tope de recorrido del pedal

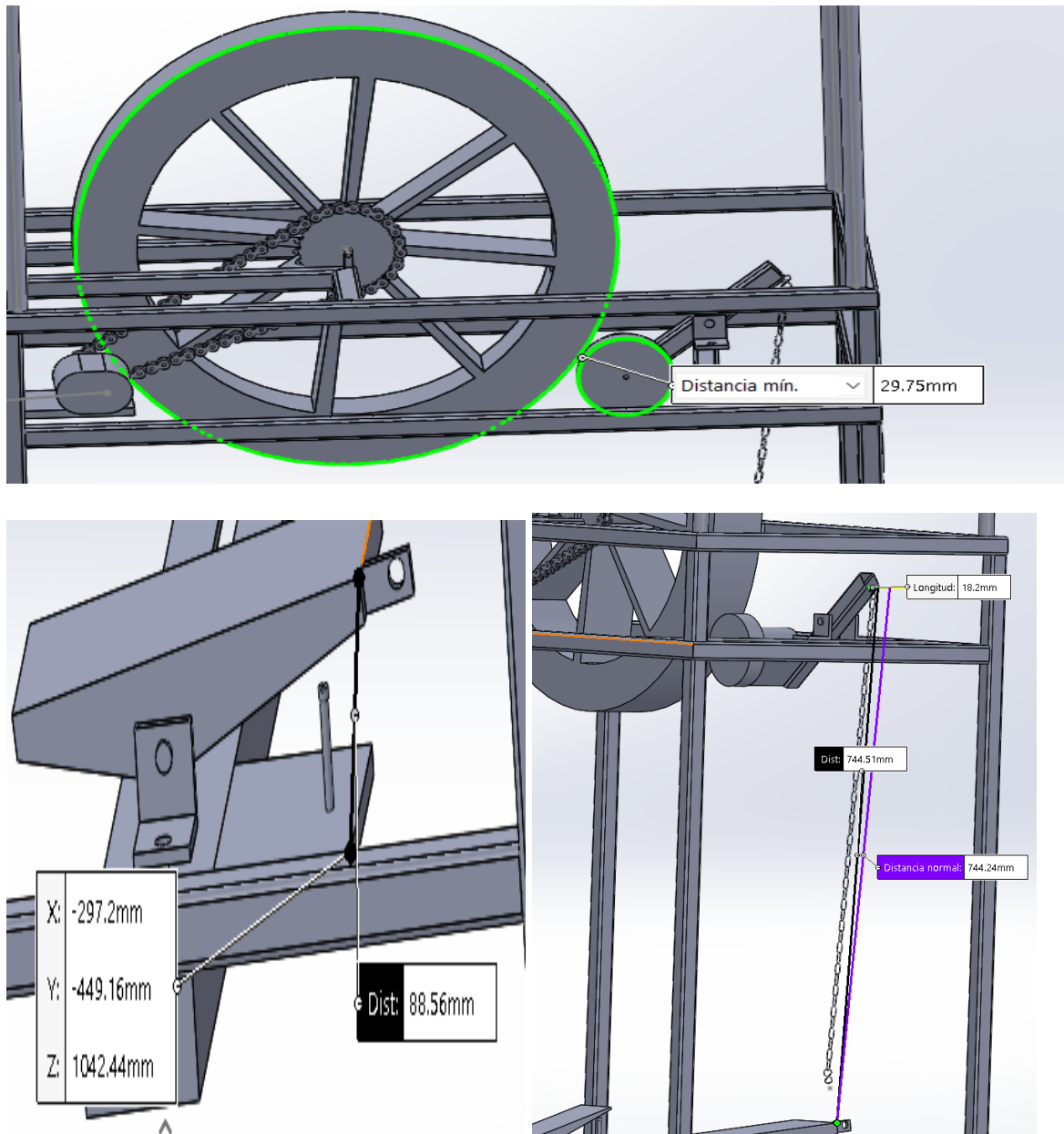


Figura 45: Parámetros para calcular la distancia de la cadena.

Con estas medidas que arroja el programa SolidWorks podemos poner las siguiente restricciones en el mecanismo:

- El pedal con respecto a su base de giro debe estar a una altura de 89mm.
- La distancia antes de contacto del volante de inercia y la rueda de generación es de 29.75mm.
- La cadena debe tener una longitud de 744.51mm.

Por lo tanto, hallamos el trabajo que debe hacer el usuario para hacer contacto entre las dos ruedas que sería:

$$W_{pedal} = distancia\ contacto * fuerza\ requerida \quad (3.1)$$

La distancia de contacto es 29.75mm y la fuerza requerida es el peso del motor ya que la barra palanca esta en reposo. Entonces si el peso del motor es de aproximadamente 14.751 N como se calculó en la sección [4.4.1](#) de este trabajo entonces:

$$W_{pedal} = 0.02975m * 14.751N = 0.44 J$$

Donde.

W_{pedal} : trabajo que requiere el pedal

El trabajo óptimo para el contacto de la rueda de generación y el volante de inercia es de 0.44 J y para lograr esto a la medida de recorrido del pedal a la base que es de 89mm se le resta 29.75mm de recorrido y esto no arroja 59.25mm esta medida se debe tener de largo en el tornillo tope de recorrido del pedal.

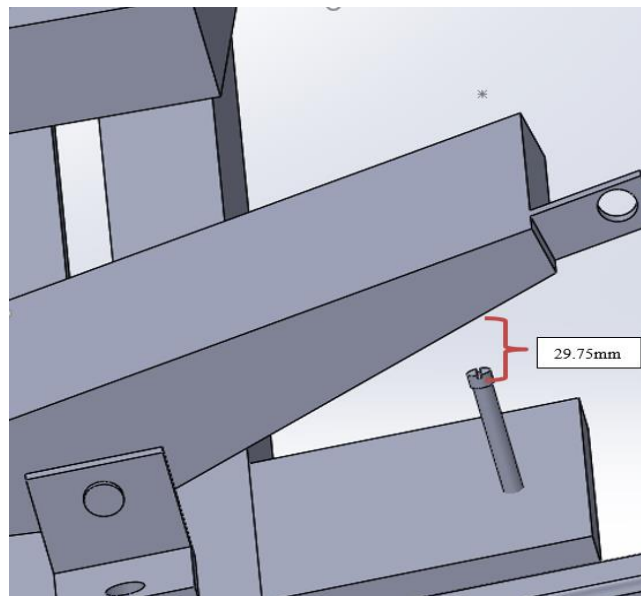


Figura 46: Distancia de recorrido del pedal con el tornillo de tope.

6. Construcción y ensamble del prototipo

6.1 Componentes y procesos de manufactura

Para tener la certeza del objetivo de costo beneficio del proyecto se hace un conteo y listado de los componentes y procesos de manufactura con sus respectivos costos. También para dejar un costo de fabricación por si este proyecto sirve de inspiración o guía para la fabricación de un proyecto similar se pueda tomar como modelo.

Componente	Precio	Componente	Precio
Coraza y manguera de rueda	\$ 25.000	Bateria 9v	\$ 3.500
Rueda 20 " bicicleta	\$ 25.000	Voltiamperimetro 100v	\$ 25.000
Piñon de 17 dientes	\$ 16.000	4 computadoras de bicicletas	\$ 150.000
Piñon de 11 dientes	\$ 10.000	Travesaño de pedales	\$ 3.000
Cadena de transmision de potencia	\$ 15.000	Eje de piñon de potencia	\$ 5.500
3 chumatera	\$ 37.000	Lamina galvanizada para tapas	\$ 10.000
Motor DC de 24/12 V	\$ 100.000	Rueda generadora	\$ 5.000
Motor taladro 550 W	\$ 85.000	2 amarres de motor	\$ 10.000
Pedal de freno regeneracion	\$ 40.000	2 platinas de base de motores	\$ 10.000
Pedal de potencia	\$ 20.000	4 fulcros de pedal	\$ 20.000
Perfil acero a500 15 mts perfil de 1"x1" c18	\$ 100.000	5 laminas de acrilico	\$ 220.000
Perfil en angulo 6mts	\$ 30.000	Remaches	\$ 25.000
Tornillos	\$ 20.000	Pintura	\$ 100.000
12 mts de cable	\$ 18.000	4 platinas patas	\$ 10.000
2 interruptores	\$ 4.000	1,2mts cadena	\$ 3.500
6 bisagras	\$ 6.000	2 s de aclaje	\$ 2.000
1 papel lija	\$ 1.500	Adaptador bateria 9v	\$ 1.000
2 conectores positivo y negativo	\$ 1.000	1 platina para recorrido pedal	\$ 3.000
		TOTAL	\$ 1.160.000

Procesos de manufactura	Precio
Pintura	\$ 100.000
Soldadura	\$ 250.000
Corte de perfiles	\$ 25.000
Pulida de soldadura	\$ 25.000
Montaje electrico	\$ 25.000
Remachado de laminas	\$ 45.000
Taladrado ubicacion de componestes	\$ 25.000
Contruccion del panel de interaccion	\$ 50.000
TOTAL	\$ 545.000

Total precio de manufactura	\$ 545.000
Total precio componentes	\$ 1.160.000
TOTAL	\$ 1.705.000

Tabla 8: Componentes y procesos de manufactura del prototipo.

6.2 Estructura de soporte del prototipo

En proceso de hacer el bastidor o estructura soporte del sistema se agregaron 4 platinas en las patas a sugerencia del soldador que tiene la experiencia en el tema de hacer estructuras soldadas, ya que con dichas platinas reduce el movimiento o vibraciones del bastidor al tener más área de apoyo con el suelo.

Por sugerencia del soldador se configura el soporte de panel de interacción de la manera que se visualiza en la imagen a continuación ya que se ahorra material y da más espacio para el trabajo de más personas en el banco al momento de la experimentación



Figura 47: Bastidor o estructura soporte del prototipo.

6.3 Montaje mecánico

Para el montaje mecánico se procedió a cambiar el motor de máquina de coser por un motor de taladro, por no tener el torque necesario como se calculó en la sección [4.1.1](#) para esto se procedió a adaptar el taladro para que sus regulador de velocidad, se acoplara al pedal que se aprovecha del motor de máquina de coser

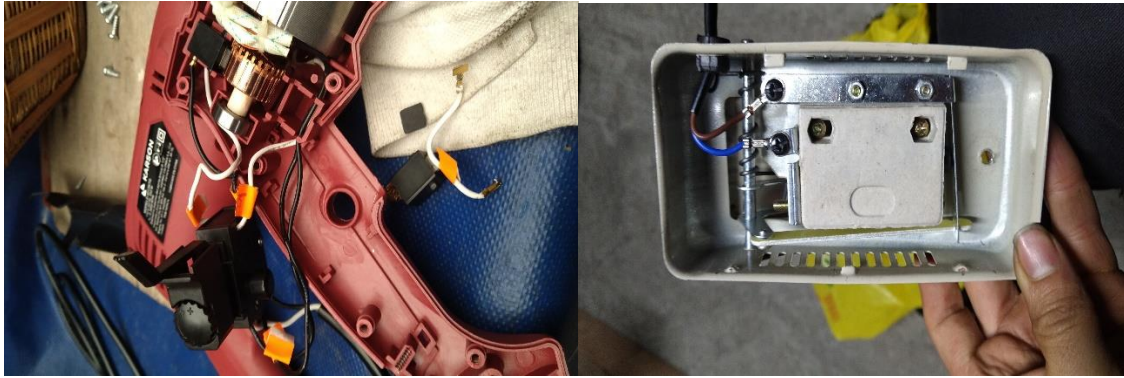


Figura 48: Construcción del sistema del motor para regular la velocidad por pedal.

En el proceso del montaje mecánico se procede a hacer pruebas para evitar posibles fallos y uno que se pudo detallar fue el de la medida de la cadena de transmisión de potencia calculada en la sección [4.6](#) al ser la distancia de 20 pulgadas y el sistema actuar a 35 Km/h la cadena se salía de sus piñones la solución que se dio fue disminuir su medida a 15 pulgadas aprovechando la barra para soldar la base del motor de potencia.

Otro inconveniente que se presentó fue el acople por fricción entre el volante de inercia y la rueda de regeneración, se pudo experimentar que la rueda de regeneración patina al momento de la frenada regenerativa, por tanto, se procede a instalar un papel lija de coraza anclado con tornillos.



Figura 49: Pruebas de funcionamiento del montaje mecánico del prototipo.

Una vez se probado el prototipo se procede a hacer el montaje mecánico final y probarlo antes de pasarlo por el proceso de pintura, como se observa en la imagen a continuación:



Figura 50: Vista del montaje mecánico del prototipo.

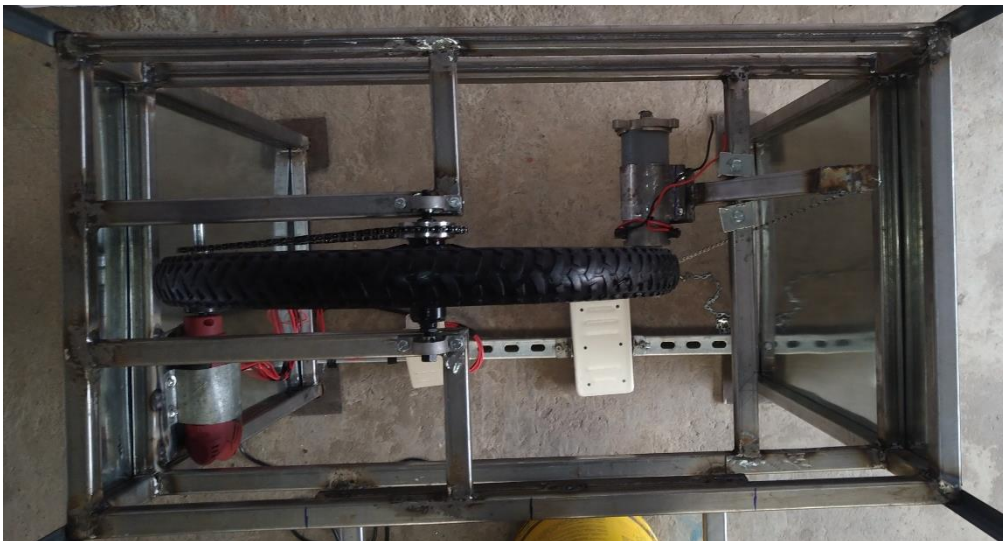


Figura 51: Vista superior del prototipo.

6.4 Panel de control

En el proceso de crear el panel de interacción se procede a dejar en un ángulo de visualización óptimo para el usuario para esto se hicieron algunas pruebas obteniendo el resultado que se muestra a continuación



Figura 52: Vista de la acomodación del panel de control del prototipo.

Se procede a hacer el tablero de anclaje de los dispositivos eléctrico para el panel de interacción con el usuario, para esto se dispuso los objetos como se muestra a continuación para aprovechar la distribución de los cables que viene de fábrica con las computadoras de bicicletas



Figura 53: Tablero de interacción del prototipo.

Para proceder a hacer mantenimientos y tener a acceso al sistema eléctrico se pusieron bisagras y se dejó espacio para guardar componentes como bombillos y motores de 12/24v como se muestra a continuación:



Figura 54: Vista de panel de interacción de usuario del prototipo totalmente terminado.

6.5 Carcasa del prototipo y pintado

Para el proceso de pintura se escoge un azul característico de la universidad Antonio Nariño ya que este prototipo va a permanecer en las instalaciones y va a hacer parte de la universidad.

Figura 55: Recorte captura de la página oficial <https://www.uan.edu.co/>.

Para el proceso de pintura se compró pintura fondo blanco y laca azul, a sugerencia de la persona contratada con experiencia en pintado de estructura en acero. Aplicando 2 capas de fondo blanco y después 2 capas de laca azul para mayor adherencia y duración de la pintura en el prototipo.



Figura 56: Proceso de pintura del bastidor y componentes mecánicos del prototipo.

Una vez secado, se obtuvo el resultado que se puede visualizar en la imagen a continuación:



Figura 57: Bastidor o estructura soporte del prototipo totalmente pintado.

6.6 Banco totalmente ensamblado

Después del proceso de pintura se procedió a hacer el montaje mecánico nuevamente para proceder a probar el funcionamiento de sus componentes y pasar al proceso de experimentación y puesta a punto del prototipo.

6.6.1 Banco ensamblado sin acrílicos

Para visualizar mejor el funcionamiento de los componentes se procedió a hacer la experimentación y puesta a punto de prototipo de freno regenerativo sin los acrílicos de protección. Además, que se puede corregir con más libertad de acceso para corregir cualquier mal posicionamiento de algún componente mecánico.



Figura 58: Vistas del prototipo terminado listo para montar acrílicos de seguridad.

6.6.2 Banco ensamblado con acrílicos y película protectora

Una vez finalizado la experimentación y puesta a punto del prototipo se procede a colocar los acrílicos de protección. Se deja las películas protectoras para evitar cualquier inconveniente durante el transporte a su lugar de destino la Universidad Antonio Nariño. Además, para entregar con sensación de un producto totalmente nuevo.



Figura 59: Vistas del prototipo terminado listo para remover película de protección de los acrílicos de seguridad.

7. Experimentación y análisis de resultados

7.1 Experimentación

Se procede a poner el volante a 7 velocidades predeterminadas como se mostrara en las siguientes tablas para hallar la energía inercial producida, los valores de cálculos se calculan como se hizo al comienzo de la sección [4.1](#) de este trabajo.

Vuelta de volante =	1,477	m/vuelta
Vuelta =	6,2832	rad
1 hora =	3600	seg
Momento de inercia volante	0,22	Kg*m ²
1 km	1000	m

Tabla 9: Parámetros del volante de inercia para hacer cálculos.

Dejando claro los parámetros iniciales se procede a hacer una hoja de cálculo para cada velocidad predeterminada, ya que se maneja por pedal el prototipo y no es preciso al tacto para llegar se toman velocidades que sobrepasen a la velocidad predeterminada y se tomara la velocidad promedio para hacer los cálculos, se hará en 2 pasos los cálculos, en la primera parte los parámetros con el motor de potencia accionado hasta alcanzar la velocidad aproximada requerida, accionado en frenado regenerativo y el segundo paso midiendo solo la inercia, esto se logra al activar el botón del dispositivo de medición al dejar de presionar el pedal.

Para esto se procede a hacer unas 5 tabulaciones de las tablas que se encuentran en el ([Anexo D.1](#)) y promediando los valores de esas 5 tabulaciones obtenemos la siguiente tabla:

Velocidad predeterminada [Km/h]	Velocidad MAX con motor(MXS) [Km/h]	Velocidad MAX inercia(MXS) [Km/h]	Velocidad promedio motor(AVS)[Km/h]	Velocidad promedio inercia(AVS) [Km/h]	Tiempo total(TM) [s]	Tiempo con inercia(TM)[s]	Tiempo con motor[s]	Distancia total recorrida(DTS) [m]	Distancia recorrida inercia(DTS) [m]
5,00	8,20	8,28	4,60	4,40	33,60	30,40	3,20	44,20	38,40
10,00	13,44	11,64	6,20	5,84	45,00	40,60	4,40	77,80	65,80
15,00	17,56	17,58	8,36	8,12	58,40	54,60	3,80	136,80	123,20
20,00	23,04	22,84	10,44	9,98	69,40	64,60	4,80	202,60	184,40
25,00	27,16	26,92	12,12	11,22	80,00	72,20	7,80	269,60	225,40
30,00	32,54	32,30	13,56	12,72	87,60	80,20	7,40	333,40	282,80
35,00	36,82	36,28	14,82	13,92	91,60	84,80	6,80	377,20	327,60
Distancia recorrida con motor[m]	Velocidad promedio motor[m/s]	Velocidad promedio inercia[m/s]	Vueltas con motor	Vueltas con inercia	Velocidad angular promedio motor [rad/s]	Velocidad angular promedio inercia [rad/s]	Energía de inercia teórica[J]	Energía de inercia experimental[J]	% energía inercial
5,80	1,28	1,22	3,93	26,00	5,44	5,21	3,26	2,98	91,49
12,00	1,72	1,62	8,12	44,55	7,33	6,91	5,92	5,25	88,72
13,60	2,32	2,26	9,21	83,41	9,89	9,61	10,76	10,15	94,34
18,20	2,90	2,77	12,32	124,85	12,35	11,81	16,78	15,33	91,38
44,20	3,37	3,12	29,93	152,61	14,34	13,27	22,61	19,38	85,70
50,60	3,77	3,54	34,26	191,47	16,04	15,05	28,31	24,91	87,99
49,60	4,12	3,87	33,58	221,80	17,53	16,47	33,81	29,83	88,22
Promedio								89,69	

Tabla 10: Cálculos de experimentación para energía cinética rotacional promedio de 5 pruebas.

Ahora se procede a experimenta acoplando la rueda de regeneración y tomar los datos de voltaje y amperaje esto con la conexión de un bombillo de 12 DC y posteriormente poder hacer los cálculos para hallar la energía aprovechada en el frenado regenerativo. Se establecen unos parámetros para la obtención de resultados en la hoja de cálculos estos parámetros fueron calculados en la sección [4.1.3](#).

Vuelta =	6,2832	rad
1 hora =	3600	seg
Momento de inercia volante	0,22	Kg*m ²
1 km	1000	m
Energía por vuelta	6,5	J

Tabla 11: Parámetros para cálculos y experimentación rueda de regeneración

Con estos parámetros se procede a hacer 5 tabulaciones o pruebas como se muestra en el [\(Anexo D.2\)](#) y de ahí se promedia los datos y resultados, quedando la siguiente tabla

Velocidad predeterminada [Km/h]	Vel. MAX. Volante inercia(MXS) [Km/h]	Vel. PROM. Volante de inercia(AVS) [Km/h]	Velocidad angular inercia PROM. Volante de inercia[rad/s]	Vel. MAX. Rueda regeneradora (MXS)[Km/h]	Vel. PROM. Rueda regeneradora(AVS)[Km/h]	Velocidad angular inercia PROM. Rueda regeneradora [rad/s]	Voltaje de regeneración MAX. [V]	Amperaje de regeneración MAX. [A]	Recorrido rueda regeneradora(DTS) [m]	Tiempo rueda regeneradora (TM) [s]	Vueltas rueda regeneradora	Energía aprovechada rueda reg.[J]	Energía de inercia experimental volante[J]	% regeneración
5	7,94	4,54	5,38	3,54	1	0,84	3,22	#VALOR!	0,4	3	1,90	0,03	3,19	0,98
10	12,38	7,12	8,44	4,08	1,66	1,40	4,72	0,552	1,6	4,8	7,60	0,13	7,84	1,59
15	18,66	8,46	10,03	6,76	2,7	2,28	7,22	0,636	3	4,2	14,25	0,23	11,07	2,12
20	22,28	12,72	15,09	8,06	3,38	2,85	10,32	0,752	3,2	4	15,20	0,25	25,03	1,00
25	26,34	13,8	16,37	10,22	4,08	3,44	11,32	0,752	4,8	4,8	22,80	0,38	29,46	1,27
30	31,96	17,32	20,54	13,04	5,3	4,47	14,78	0,796	6,6	6,6	31,35	0,52	46,41	1,11
35	36,9	18,9	22,41	16,76	5,88	4,96	17,54	0,954	9,2	7,4	43,71	0,72	55,27	1,30
Promedio														1,34

Tabla 12: Cálculos de experimentación promedio de 5 pruebas de volante de inercia y rueda regeneradora.

Ya con estas tablas se puede proceder a hacer un análisis de resultados.

7.2 Análisis de resultados

7.2.1 Análisis de resultados experimentación volante de inercia

La experimentación con solo el volante de inercia se encuentra en la **Tabla 10:** Cálculos de experimentación para energía cinética rotacional , y en ella se puede observar como es de casi un 90% en promedio el resultado experimental del teórico como se puede apreciar en la siguiente tabla:

Energía de inercia teórica[J]	Energía de inercia experimental[J]	% energía inercial
3,26	2,98	91,49
5,92	5,25	88,72
10,76	10,15	94,34
16,78	15,33	91,38
22,61	19,38	85,70
28,31	24,91	87,99
33,81	29,83	88,22
Promedio		89,69

Tabla 13. Porcentaje promedio de volante en inercia libremente.

Al hacer una comparación de velocidad angular con del tiempo de recorrido entre el volante con el motor impulsándolo y el volante en inercia, se puede observar como la gráfica del el volante con el motor impulsándolo tiende a ver exponencial y con el volante en inercia tiende a ser lineal. Entonces se puede sacar un análisis diciendo que hay más aceleración cuando el volante lo impulsa el motor y una aceleración menor pero constante cuando el volante entra en inercia, esto se puede ver la siguiente figura:

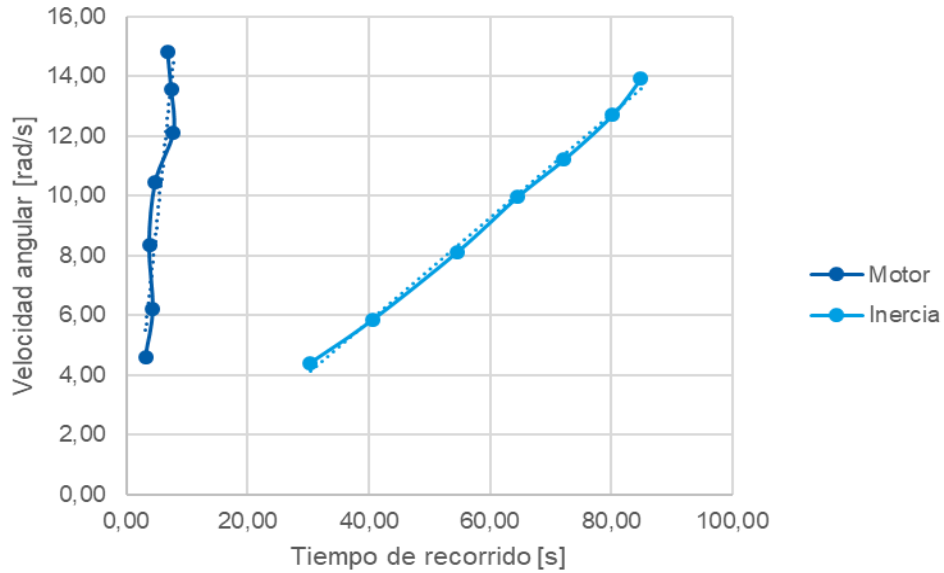


Figura 60. Comparación de gráficos velocidad angular contra tiempo recorrido.

En la comparación de la energía cinética rotacional que se calculó que puede brindar el volante en un caso ideal y siguiendo la teoría con la energía que arrojó el prototipo en la experimentación, se puede ver un aprovechamiento del 90% de experimentación con respecto a la ideal o la teórica que puede brindar el prototipo. Al ser de un 90% se puede ver que los gráficos de energía contra velocidad angular de la energía teórica con la experimental son similares como se puede observar a continuación en la siguiente figura:

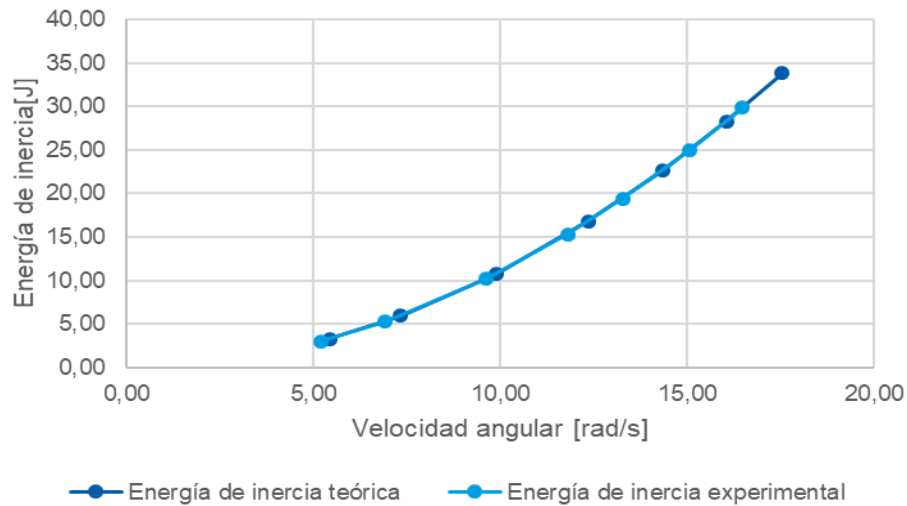


Figura 61. Comparación de gráficos energía de inercia contra velocidad angular.

7.2.2 Análisis de resultados experimentación volante de inercia y rueda regeneradora

La experimentación con el volante de inercia y la rueda regeneradora se encuentra en **Tabla 12**: Cálculos de experimentación promedio de 5 pruebas de volante de inercia y rueda regeneradora, y en esta se puede ver cuánto amperaje y voltaje se produce con el motor de 24/12 V cuando se utiliza la frenada regenerativa, en esto se puede notar que la rueda regeneradora solo utiliza menos de un 2% de la energía cinética de inercia, y esto se puede basar a una fuerza de fricción que aumenta a mayor velocidad, la fuerza para mover el eje del motor y a la energía que utiliza el volante para mantenerse girando mientras cede energía a el sistema de regeneración.

Energía aprovechada rueda reg. [J]	Energía de inercia experimental volante [J]	% regeneración
0,03	3,19	0,98
0,13	7,84	1,59
0,23	11,07	2,12
0,25	25,03	1,00
0,38	29,46	1,27
0,52	46,41	1,11
0,72	55,27	1,30
Promedio		1,34

Tabla 14: Porcentaje promedio de volante en inercia con frenado regenerativo.

Se puede analizar también que el gráfico que la relación de voltaje de regeneración máxima por velocidad angular promedio tiende a ser lineal como se puede ver en la siguiente figura:

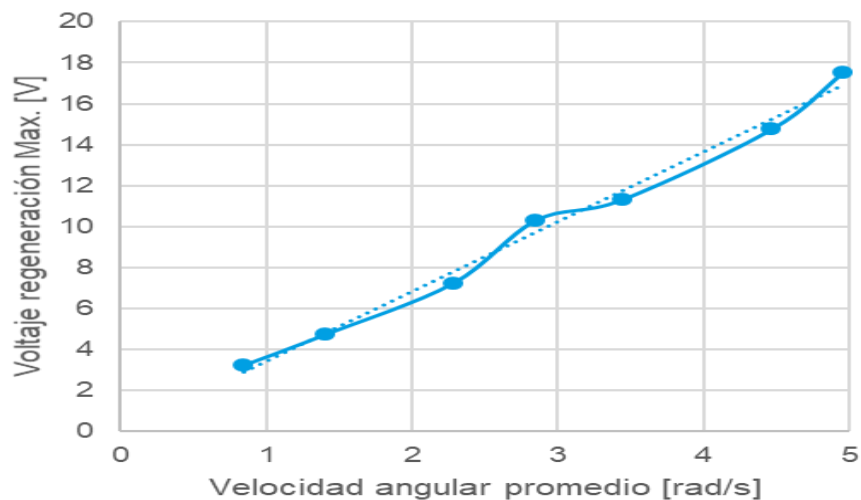


Figura 62: Voltaje de regeneración Max. Contra velocidad angular promedio.

En la regeneración se amperaje del prototipo se puede analizar que tiende a aumentar a medida que la velocidad angular aumenta y tiende a ser lineal su grafica como se puede observar en la siguiente figura:

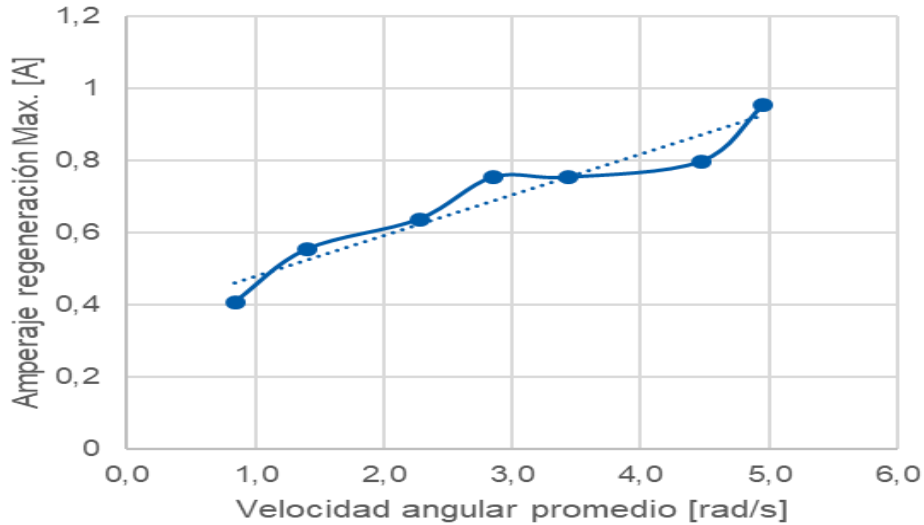


Figura 63. Amperaje de regeneración Max. Contra velocidad angular promedio.

En la comparación de los gráficos de velocidad angular contra velocidad predeterminada del volante en inercia con la rueda regeneradora cuando esta acoplada al volante se puede observar que a mayor velocidad del volante de inercia se aleja la proporcionalidad de diferencia de velocidad angular y su distancia va aumentado considerablemente, esto se produce ya que a mayor velocidad se producen más pérdidas de energía de tipo mecánicas por fugaz de energía en el acople, rozamiento, la fricción de los mecanismos móviles, las características del fluido lubricante, etc.

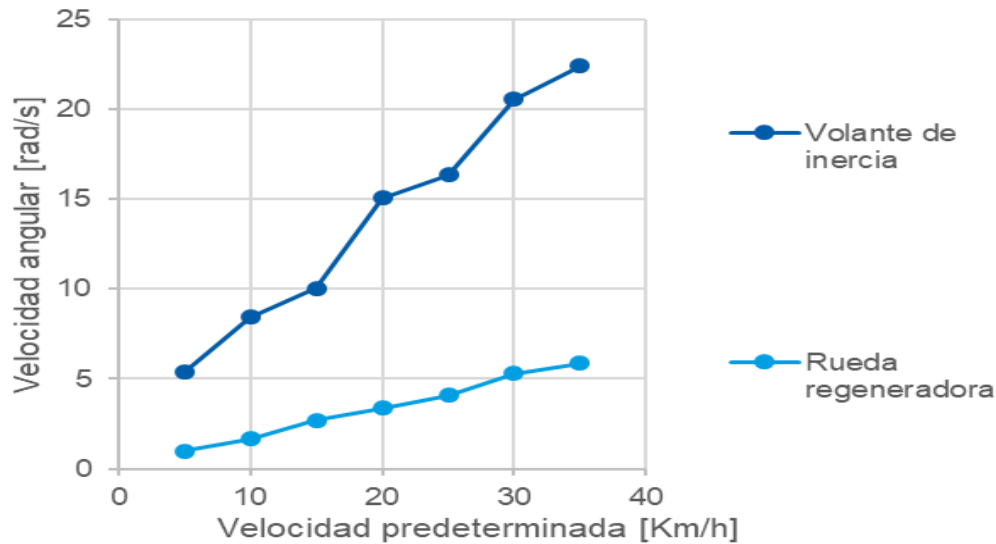


Figura 64. Comparación de gráficos de velocidad angular contra velocidad predeterminada.

8. Conclusiones y recomendaciones

8.1 Conclusiones

Para el planteamiento y análisis del diseño preliminar del prototipo de freno regenerativo, se realizó investigaciones de trabajos y documentos relacionados con dispositivos de freno regenerativa y material didáctico relacionado a este, y gracias a esta profundización en el tema se pudieron estructurar varios planteamientos iniciales para comenzar el abordaje del diseño adecuadamente, lo cual el primero fue su diseño preliminar de estructuración de un prototipo didáctico y luego se procedió a dar selección de sus componentes para sacar unas comparativas iniciales y escoger la mejor por sus características cualitativas y cuantitativas con el objetivo de seleccionar la mejor en costo-beneficio. A lo cual a lo largo del proceso de diseño tuvo algunas variables de cambio, para ir optimizando lo mejor posible, asimismo lograr un ciclo de vida largo.

Gracias a los cálculos realizados en este trabajo para evitar cualquier problema de seguridad en el funcionamiento, se puede proceder a la interacción y experimentación con el prototipo

en su puesta a punto, para poder comprobar la seguridad funcional de este, funcionando de manera adecuada como se esperaba en diseño, por tal motivo se cumplió el objetivo de tener una manipulación y operación de forma controlada al seguir las especificaciones del manual de usuario hechas y planteadas para este mecanismo. Se implementó unas carcasas y acrílicos de protección, para dar una seguridad funcional más óptima al usuario.

Los análisis y cálculos del programa CAD SolidWorks en este trabajo ayudaron a dar certeza y confiabilidad a los cálculos hechos a mano al comparar estos y ser similares. También con ayuda del programa CAD se pudieron realizar los planos y ensambles del prototipo dando unas ideas más concisas de como optimizar el prototipo, minimizando el error en el montaje y fabricación final para puesta a punto.

En la experimentación se pudieron detectar algunos fallos que en los cálculos no se reflejaron, como el largo de la cadena de transmisión de potencia, ya que por su largo se generaban vibraciones o no se acoplaba bien con el sistema, saliéndose está de sus piñones por tanto se procedió a tomar una distancia donde esta trabaje en optima condición, superando estos percances se pudo cumplir el objetivo de la puesta a punto del prototipo. Se experimenta con una velocidad promedio máxima diseñada de 35 Km/h a 40 Km/h la cual puede generar un voltaje máximo promedio de 17.5 V y un amperaje máximo promedio de 0.95 A en el prototipo, y podría darse más, pero al aumentar esta velocidad el prototipo comienza a vibrar considerablemente.

Al ser un objetivo de este trabajo la fomentación del aprendizaje de la temática de reciclaje de energía por medio del frenado regenerativo, se diseñan 2 prácticas de laboratorio y el manual de usuario, a los usuarios o estudiantes que interactúen con el prototipo, para poner en práctica los conocimientos teóricos y consolidarlos para tener una experiencia más cercana con máquinas cotidianas con esta temática

8.2 Recomendaciones

En el proceso de diseño, fabricación y puesta a punto se pudieron plantear algunas conclusiones para poder mejorar el prototipo de frenado regenerativo planteando otros aspectos preliminares similares donde se presentan los siguientes casos:

- Se puede concluir que se puede mejorar el diseño y fabricación para un coste-beneficio más favorable, como implementarle un sistema de transmisión de potencia de pedaleo por el usuario en vez de un motor, pero el prototipo queda como referencia de donde se puede partir si se desea optimizar o realizar proyectos similares.
- Se puede concluir del proyecto y del prototipo que se puede sacar muchos más análisis para estudiar a fondo este tipo planteamiento de reciclajes de energía. En la parte de

experimentación se puede decir que se pueden hacer muchos tipos de gráficos para comparar más resultados, pero ese no es objetivo de este proyecto sino dejar esta inquietud a los estudiantes que quieran interactuar con el prototipo para poder conocer más del tema de frenado regenerativo.

- En el transcurso de la elaboración del proyecto se analizó y planteó hacer un sistema de carga para el prototipo pero al no ser un tipo de generador eléctrico de tiempo constante, como los generadores eólicos o los paneles solares, y el tiempo de carga de una batería debería ser de 8 horas mínimo a carga constante para no afectar esta, y con la experimentación se confirmó que el prototipo no brinda una carga constante y su proceso de regeneración dura pocos segundos, para hacer un sistema de carga para el prototipo elevaría considerablemente al costo de éste. Al tener como objetivo específico un costo-beneficio con el objetivo general de ser un prototipo didáctico, se concluye que es más práctico que el usuario del prototipo se dé cuenta de cómo se transforma la energía cinética inercial en energía eléctrica, por medio de un consumidor que en este caso es un bombillo o un motor, con la intensidad que éste da en su funcionamiento al darle energía a diferentes velocidades con el volante de inercia y el frenado regenerativo.

9. Bibliografía

- [1] Z. e. hyunda, «www.hyundai.com,» 28 12 2020. [En línea]. Available: <https://www.hyundai.com/es/zonaeco/eco-drive/tecnologia/frenada-regenerativa> . [Último acceso: 19 01 2021].
- [2] «www.motor.mapfre.es,» [En línea]. Available: <https://www.motor.mapfre.es/coches/noticias-coches/que-es-freno-regenerativo-por-que-mas-eficiente/#:~:text=aumenta%20su%20autonom%C3%ADa,-,Principio%20de%20funcionamiento%20del%20freno%20regenerativo,que%20las%20ruedas%20sigan%20girando.&text=Este%20meca>. [Último acceso: 18 01 2021].
- [3] «motor.es,» [En línea]. Available: <https://www.motor.es/que-es/kers-freno-regenerativo>. [Último acceso: 17 10 2020].
- [4] documentacion.ideam.gov.co, «documentacion.ideam.gov.co,» [En línea]. Available: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/001083/Course2/Lecturas/Vehiculos/chapter2.pdf>. [Último acceso: 27 10 2020].
- [5] Nissan Motor Co., Ltd, «divesan.com,» [En línea]. Available: <https://divesan.com/actualidad/sistema-frenado-regenerativo>. [Último acceso: 7 10 2020].
- [6] E. J. Domínguez Soriano y J. Ferrer Ruiz, «sistema de freno regenerativo y sistemas de freno inteligente,» de *Sistemas de transmision y frenado, transporte y mantenimiento de vehículos,*, Editex, 2018, pp. 373-382.
- [7] Sociedad de Tecnicos de Automoción STA, *El Vehículo Eléctrico. Desafíos tecnológicos, infraestructuras y oportunidades de negocio.*, Barcelona: libbooks, 2011.
- [8] Escuela de organizacion industrial , «Master en energías renovables y mercado energético, Madrid,» 02 06 2016. [En línea]. Available: <https://www.eoi.es/blogs/merme/page/8/>. [Último acceso: 03 03 2021].

- [9] h. D. Vallejo y I. h. Rodríguez, Saber electrónica Autos Eléctricos, Argentina-México: Quark, 2020.
- [10] O. R. M. J. A. BARRERA DOBLADO, Vehículos eléctricos e híbridos, Ediciones Paraninfo, S.A, 2017.
- [11] E. Molero Piñeiro y A. Pozo Ruz, El vehículo eléctrico y su infraestructura de carga, Marcombo, 2013.
- [12] A. Singh, Electric Vehicles And the End of ICE Age, Adhyyan, 2019.
- [13] S. S. Acebes, motores, EDITEX, 2017, pp. 380-390.
- [14] J. T. Montecelos, Vehículos eléctricos, Madrid: Paraninfo.es, 2019.
- [15] C. N. D. AUTOESCUELAS, «cnae.com,» blog CNAE, 29 01 2020. [En línea]. Available: <http://www.cnae.com/blog/index.php/vehiculos-hidrogeno-funcionan-pros-contras/>. [Último acceso: 25 03 2021].
- [16] I. L. Kosow, Control de máquinas eléctricas, New York: REVERTÉ, 1977.
- [17] T. Denton, Electric and hybrid vehicles, New York: Routledge, 2020.
- [18] M. W. M. Alarcon, Estudio, simulación y pruebas experimentales de un freno, Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa María, 2020.
- [19] R. L. Norton, DISEÑO DE MAQUINAS, México: Pearson, 2011.
- [20] R. L. Mott, Diseño de elementos de máquinas, México: Pearson, 2006.
- [21] C. C. Suarez, «análisis de vibraciones torsionales utilizado el método de elementos finitos (MEF),» TECSUP, PERU.
- [22] www.semapi.com, «herramientas para detectar frecuencia natural».
- [23] J. K. N. y R. G. Budynas, Diseño de elementos de máquinas Shigley ed. octava, Mc Graw Hill, 2008.
- [24] Acesco, «www.acesco.com.co,» Acesco, [En línea]. Available: <https://www.acesco.com.co/descargas/fichastecnicas/ficha-tecnica-metaltub.pdf>. [Último acceso: 10 09 2021].

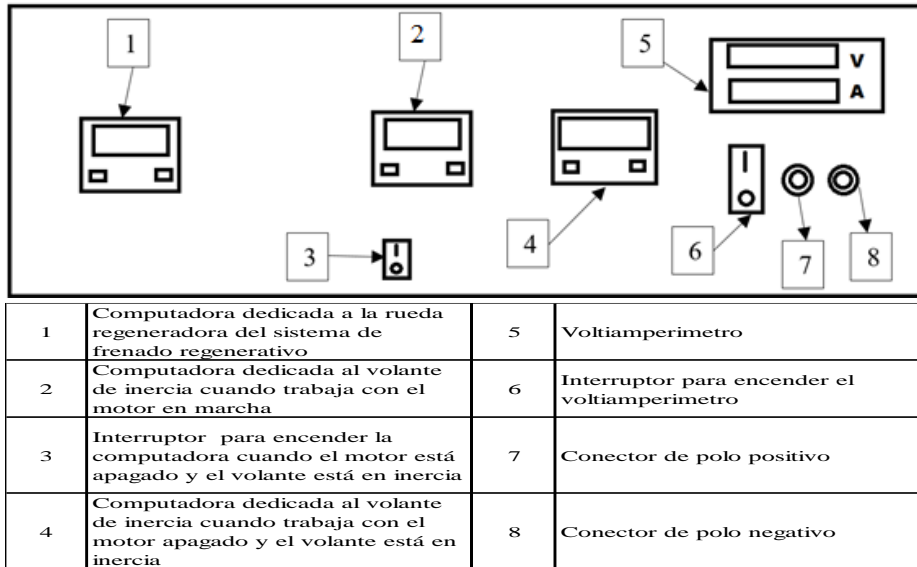
[25] CarBikeTech, «<https://carbiketech.com>,» 11 4 2020. [En línea]. Available: <https://carbiketech.com/regenerative-braking-working/>. [Último acceso: 18 01 2021].

ANEXOS

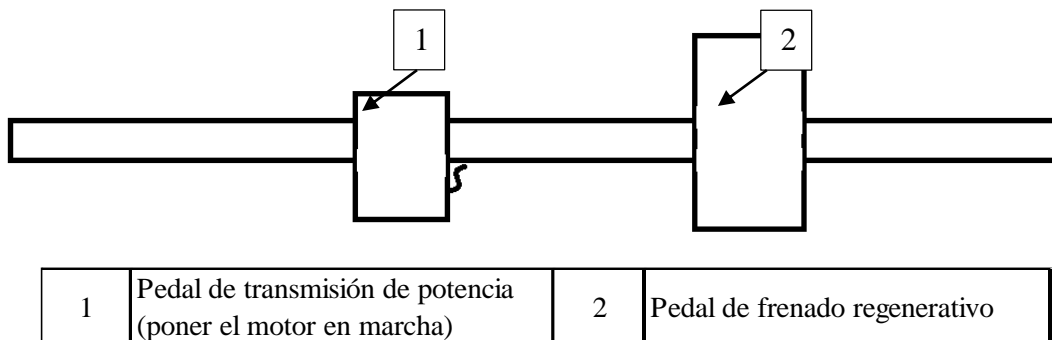
Anexo A: Manual de usuario

MANUAL DE USUARIO PROTOTIPO FRENO REGENERATIVO

PANEL DE CONTROL



PEDALES DE MANEJO



En la parte inferior del prototipo de freno regenerativo se encuentran 2 pedales el izquierdo es para arrancar el motor de transmisión de potencia que le da movimiento al volante de inercia y el pedal de la izquierda es el de frenado regenerativo este se encarga de acoplar la rueda de regeneración al volante de inercia para poder así hacer rotar el motor de generación anclado a esta y reciclar esa energía de inercia que le paso el volante.

MANEJO DE LAS COMPUTADORAS



1. Para configurar los parámetros de medición de las computadoras se deben tener los 2 botones de la computadora presionados por 5 segundos hasta que cambie de interfaz y comienza a titilar la opción mostrado 4 números y el ultimo a cambia, este es el perímetro de la circunferencia a medir



2. Para la circunferencia de las computadoras dedicadas al volante de inercia de deja en 1570 y para la computadora de la rueda regeneradora se deja los parámetros en 0215, esto se logra con el botón derecho para aumentar de número y con el izquierdo para cambiar de numero a configurar.



3. Para las opciones que siguen se deja en km y 200 km



4. ya configuradas estas opciones las computadoras están listas para trabajar
5. para mostrar las opciones que necesitamos se cambia con el botón derecho y están son:



- ODO: Esta opción marca el total de recorrido de prototipo y sirve para establecer los mantenimientos
- DST: esta opción arroja el recorrido de cada medida tomada
- MXS: esta opción marca la velocidad máxima de la medida tomada
- AVS: esta opción marca la velocidad promedio que se dio en el recorrido de la medida tomada
- TM: esta opción marca el tiempo del recorrido



Una vez explicado los anteriores valores se puede proceder a la toma de medidas por velocidades

6. Una vez tomada la medida se procede a reiniciar los valores para la siguiente medida oprimiendo el botón izquierdo hasta que todos los valores DTS, MXS, AVS y TM marquen cero en la computadora

TOMA DE MEDIDAS Y DATOS DEL PROTOTIPO DE FRENO REGENERATIVO

1. Conecte el prototipo a la red eléctrica (conectar el enchufe a una toma corriente)
2. Encender el interruptor rojo que es el del voltíampermetro. Debe estar en la opción línea o circuito cerrado.
3. Fijarse que la opción del interruptor negro este apagado. Debe estar en la opción del círculo que significa que el sistema está abierto.
4. Comprobar que todas las computadoras están con carga y funcionales. Que arroje algún dato en su pantalla
5. Se comprueba que las opciones DTS, MXS, AVS y TM de las computadoras estén en ceros, esto se logra cambiando las opciones con el botón derecho, hasta llegar a la opción MXS, entonces se debe proceder a oprimir el botón izquierdo por 5 segundos o hasta que la opción marque 0.

6. Ya teniendo el prototipo con todas sus características listas para trabajar se procede a tomar las muestras de velocidades cercanas de 5, 10, 15, 20, 25,30 y 35 km/h respectivamente. Para dicho propósito se pisa el pedal de transmisión de potencia y se deja de pisar cuando la computadora dedica al volante de inercia cuando esta arroje que se alcanzó la velocidad, se puede pasar o no alcanzar esta velocidad. Ejemplo se pisó el pedal de transmisión de potencia y se vio que llego a 8 Km/h, entonces se dejó de pisar la medida es válida lo mismo para 4 km/h.
7. Utilizar el pedal de regeneración se debe tener el pie derecho en este y el pie izquierdo en el pedal de transmisión de potencia al tiempo para tener una medida lo más exacta posible
8. Encender el interruptor negro que es el de regeneración
9. Entonces cuando se deje de presionar el pedal de potencia y el volante entre en inercia, se presiona con el pie derecho el pedal de regeneración y este proceda a acoplar la rueda de regeneración con el volante de inercia y arroje los resultados a la computadora dedicada a la rueda de regeneración.
10. Para el voltíamperímetro se puede tomar la medida de dos maneras conectando un dispositivo de 12 a 24 voltios máximo un consumidor de energía a las tomas negativa y positivas para obtener el voltaje y el amperaje que consume, y la otra maneja no conectado nada y el voltíamperímetro solo arroja el voltaje producido en la frenada regenerativa.
11. Por tanto, un ejemplo de cómo deben quedar las tablas de toma de datos debería ser como se muestra a continuación:

velocidad predeter minada [Km/h]	Velocidad MAX con motor(MXS) [Km/h]	Velocidad MAX inercia(MXS) [Km/h]	Distancia recorrida con motor(DTS) [m]	Distancia recorrida inercia(DTS) [m]	tiempo total(TM) [s]	tiempo con inercia(TM) [s]	tiempo con motor [s]	velocidad promedio motor(AVS) [Km/h]	velocidad promedio inercia(AVS) [Km/h]
5	8,2	7,2	calcular	23	28	21	7	3,97	4
10	11,34	10,7	calcular	39	42	26	16	5,8	5,4
15	16,5	15,4	calcular	72	50	35	15	7	7,4
20	20,37	19,9	calcular	109	58	43	15	10,6	9,2
25	25,83	24,1	calcular	147	69	49	20	12,3	10,8
30	31,4	29,8	calcular	199	71	55	16	13,9	13,4
35	35,71	33,2	calcular	230	70	60	10	14,5	13,9
velocidad promedio motor[m/s]	velocidad promedio inercia[m/s]	vuelatas con motor	vuelatas con inercia	Velocidad angular motor [rad/s]	Velocidad angular inercia [rad/s]	energía de inercia teórica[J]	energía de inercia experi mental[J]	% energía inercial	
calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	
calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	
calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	
calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	
calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	
calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	
calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	calcular	
						Promedio		calcular	

velocidad predeterminada [Km/h]	Vel. MAX. Volante inercia(MXS) [Km/h]	Vel. MAX. Rueda regeneradora [Km/h]	voltaje de regeneración MAX. [V]	amperaje de regeneración MAX. [A]	recorrido rueda generadora(DTS)	tiempo (TM) [s]	vel. PROM.(AVS) [m/s]	vuelas rueda generadora	energía aprovechada rueda reg.[J]	energía de inercia experimental volante[J]	% regeneración
5	8,2	3,7	1,3	0,28	0,3	0,5	0,6	calcular	calcular	calcular	calcular
10	11,34	5,5	4,1	0,5	4	4	1	calcular	calcular	calcular	calcular
15	16,5	7,3	5,6	0,832	2	4	0,5	calcular	calcular	calcular	calcular
20	20,37	10,2	8,1	0,88	5	8	0,625	calcular	calcular	calcular	calcular
25	25,83	11,1	10	0,7	5	5	1	calcular	calcular	calcular	calcular
30	31,4	13,9	13,9	1,1	6	4	1,5	calcular	calcular	calcular	calcular
35	35,71	14,4	15,7	0,97	8	13	0,6154	calcular	calcular	calcular	calcular
promedio											calcular

Anexo B: Guía de mantenimiento

GUIA DE MANTENIMIENTO PROTOTIPO FRENO REGENERATIVO BANCO DIDACTICO

Para el mantenimiento se establece hacerse cada 200km este parámetro lo anunciara el computador del volante de inercia motor que está programada para esto y se deben revisar los siguientes apartados

APARTADO ELECTRICO

- Estado de los carbones de los motores
- Estado de las baterías de las computadoras y el voltíamperímetro
- Estado de los cables del prototipo

APARTADO MECANICO

- Lubricación por aceite la cadena de transmisión de potencia
- Engrase de manzana del volante de inercia
- Engrase de las chumaceras
- Lubricación de los fulcros pedal de regeneración y barra palanca de regeneración

PARTES QUE SE DESGASTAN

Se deben revisar los siguientes componentes y tomar la decisión de cambiar por desgaste, mal funcionamiento, juego o holgura excesiva en un funcionamiento u otras razones que ameriten el cambio para el adecuado funcionamiento del prototipo.

- Chumaceras
- Cadena
- Coraza o llanta del volante
- Coraza o papel lija de la rueda de regeneración
- Fulcros
- Piñones de transmisión de potencia

PARTES A REVIZAR PARA SU OPTIMO FUNCIONAMIENTO

Una revisión rápida antes de poner a funcionar el prototipo se puede hacer a los siguientes componentes:

- Cadena de pedal
- Tornillo limitador de potencia en el pedal
- Tornillo limitador de fuerza para el pedal e regeneración
- Rebote de pedales y de barra palanca

PROCEDIMIENTO PARA PROCEDER A DESMONTE

1. Retirar las tapas acrílicas transparentes con un destornillador
2. Retiras los tornillos hexagonales de las chumaceras
3. mover el volante de inercia hacia el motor de potencia hasta que la cadena esta destencionada y de pueda retirar el volante
4. Retirar la cadena del motor

5. Retirar la cadena del pedal y barra palanca del sistema de frenado regenerativo
6. Proceder a retirar los tornillos hexagonales de los 2 fulcros de la barra palanca (tener cuidado con el sensor de la rueda de regeneración y sus respectivos cables)
7. Retirar la lámina que asegura el motor de regeneración con un destornillador
8. Retire la tapa lamina del motor con un destornillador
9. Retira la lámina que asegura el motor de potencia (tener cuidado con el cableado)
10. Retirar las lamina y fulcros que aseguran los pedales del prototipo con un destornillador y llave hexagonal respectivamente recomendación poner un elemento que eleve un poco la estructura para más facilidad de desmontaje
11. Retirarla lamina tope del pedal de regeneración con un destornillador
12. Retire los tornillos del travesaño que asegura los pedales

Anexo C: Guías de experimentación estudiantil

Guía o practica de experimentación No. 1



Una Universidad con Presencia
Nacional y Vocación Regional

FACULTAD DE INGENIERÍA FIMED

PRÁCTICA No. 1 TRANSFORMACION DE ENERGÍA DE INERCIA EN ENERGIA ELÉCTRICA

PROGRAMA	Ingeniería FIMED
ASIGNATURA	
NOMBRE DEL PROFESOR	
NOMBRE DE LOS ESTUDIANTES- CODIGO	- - -
FECHA	

INTRODUCCIÓN

La eficiencia y el reciclaje de energía es un tema que está en auge en el planeta ya que los recursos cada vez son más limitados y la contaminación por combustibles fósiles y las carreras ingenieriles deben relacionarse con este tema, por tanto, el prototipo de frenado regenerativo dispone a hacer una simulación de cómo funciona este tema en autos eléctricos e híbridos. El concepto de frenado regenerativo en vehículos se basa que en vez de utilizar elementos de frenado convencional como pastillas y tambores de frenado por fricción para detener el vehículo y transformar la energía de inercia en calor, se aprovecha dicha energía acoplado un sistema o un motor para transformar esa energía de inercia en energía eléctrica que posteriormente puede utilizar el vehículo.

La energía de inercia se da cuando un cuerpo con determinada masa este movimiento, ya que la energía no se crea ni se destruye la energía de inercia se puede transformar en energía eléctrica.

En el prototipo para desarrollar la practica ayuda al estudiante que interactúe con este a comprender los conceptos de inercia, transformación de energía, eficiencia, frenado regenerativo, física cinética.



OBJETIVO

1. Profundizar o crear un concepto de cómo funciona la inercia rotacional
2. entender y verificar el funcionamiento de un freno regenerativo
3. Repetir las pruebas para diferentes velocidades y así determinar el cambio de inercia y energía que brinda el sistema
4. demostrar y situar por medio del prototipo de freno regenerativo al estudiante con aplicaciones de reciclaje y eficiencia energética
- 5- Conclusiones del procedimiento realizado.

MARCO CONCEPTUAL

Velocidad lineal

La cinemática es la rama de la física que estudia el movimiento de los cuerpos, pero sin tener en cuenta la causa que los produce y analiza el movimiento de un objeto a lo largo de una línea recta. Uno de estos movimientos es el Movimiento Rectilíneo Uniforme en el cual se considera una partícula que se mueve con una velocidad constante [1] [2]. El modelo de partícula bajo velocidad constante se aplica a cualquier situación en la que una entidad que se pueda representar como partícula se mueva con velocidad constante. Esta situación ocurre con frecuencia, de modo que este modelo es importante. Si la velocidad de una partícula es constante, su velocidad instantánea en cualquier instante de su recorrido durante un intervalo de tiempo es la misma que la velocidad promedio durante el intervalo y su velocidad se podrá determinar mediante la expresión:

$$v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (1)$$

Donde V_x es la velocidad lineal, Δx es el recorrido desplazado y Δt el tiempo.

Velocidad angular

El periodo de una partícula en movimiento circular uniforme es una medida del número de segundos para una revolución de la partícula alrededor del círculo. El inverso del periodo es la razón de rotación y se mide en revoluciones por segundo [1]. Ya que una revolución completa de la partícula alrededor del círculo corresponde a un ángulo de 2π radianes, el producto de 2π y la razón de rotación da la velocidad angular ω de la partícula, medido en radianes/s o s^{-1} :

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (2)$$



Donde ω es la velocidad angular, v es la velocidad lineal y r es el radio de la rueda o en este caso el volante de inercia

Momento de inercia rotacional

Este se da cuando un cuerpo con cierta masa gira entorno a un eje de referencia produciéndose así una magnitud vectorial [1]. En para cada forma de cuerpo se posee una ecuación para hallar dicho momento de inercia rotacional la principal de donde parten las demás es:

$$I_m = \frac{1}{2}mr^2 \quad (3)$$

En el caso de una rueda de bicicleta se trata como un cilindro hueco y su fórmula es:

$$I_m = \frac{1}{2}m(r_1^2 + r_2^2) \quad (4)$$

Donde I_m es el momento de inercia, r_1 es el radio a la pared interior de la rueda y r_2 es el radio del eje de rotación a la pared exterior de la rueda.

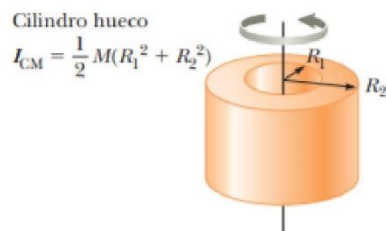


Figura 1. Momento de inercia cilindro hueco [1]

Energía cinética rotacional

las partículas individuales que conforman el objeto en rotación se mueven a través del espacio; siguen trayectorias circulares. En consecuencia, con el movimiento rotacional hay energía cinética asociada. Considere un objeto como un sistema de partículas y suponga que da vueltas en torno a un eje fijo z con una rapidez angular v [1]. La figura a continuación muestra al objeto en rotación e identifica una partícula sobre el objeto ubicada a una distancia r_i del eje de rotación. Si la masa de la i -ésima partícula es m_i y su rapidez tangencial es v_i , su energía cinética es:



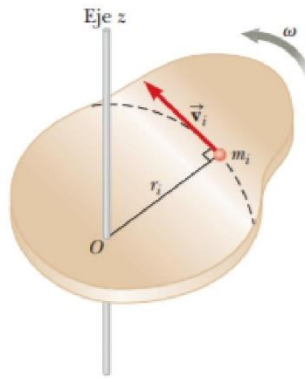


Figura 2. Partícula de un cuerpo en rotación [1].

$$Ek = \frac{1}{2} m * v^2 \quad (5)$$

Reemplazamos v de la ecuación (2) en la ecuación (5) y queda

$$Ek = \frac{1}{2} m * (\omega * r)^2 \quad (6)$$

Reemplazando la ecuación(3) en la ecuación(6) se obtiene

$$Ek = \frac{1}{2} Im * \omega^2 \quad (7)$$

TRABAJO ROTACIONAL

El trabajo lineal en física se define como la fuerza ejercida en un intervalo de distancia, por tanto, el trabajo rotacional es similar pero ahora se utiliza el radio y el recorrido en radianes como se presenta en la siguiente ecuación [2]:

$$W_{lineal} = F * \Delta x \quad (8)$$

Donde W_{lineal} es el trabajo lineal, F la fuerza que se ejerce y Δx la variación de distancia o el recorrido lineal. Ahora podemos decir que Δx se asemeja al recorrido de una partícula de un cuerpo en recorrer su circunferencia para esto se debe multiplicar el radio de la circunferencia por la distancia en radianes recorrida:

$$\Delta x = r * \theta \quad (9)$$



Donde r es el radio de la rueda y θ es los radianes de recorrido por ejemplo una vuelta es 2π por tanto despejando la ecuación queda:

$$W_{rotacional} = F * r * \theta \quad (10)$$

Donde Rotacional es el trabajo rotacional. Teniendo en cuenta que fuerza por radio es torque:

$$\tau = F * r \quad (11)$$

Donde τ es torque. La ecuación de trabajo rotacional queda:

$$W_{rotacional} = \tau * \theta \quad (12)$$

Porcentaje de aprovechamiento de energía inercial

La teoría dice que utilizando la ecuación de energía cinética rotacional obtendremos un resultado, pero al momento de proceder a comparar con los datos experimentales no concuerda esto se debe a que para hacer un cálculo más aproximado a lo teórico se debe tener en cuenta distintos factores que afectan a la práctica como lo puede ser perdidas por fricción, vibraciones, ambiente y demás factores que afectan la práctica. Para saber el porcentaje que aprovechamiento de energía de la forma más básica se utiliza la ecuación [3]:

$$\% \text{aprovechamiento} = \frac{\text{energía aprovechada}}{\text{energía inercia}} * 100\% \quad (13)$$

METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Realizar el siguiente procedimiento:

- 1- Verifique que el prototipo esté conectado a la red eléctrica.
- 2- Verifique que el voltiampermetro este encendido con el interruptor rojo en la opción línea.
- 3- Verifique que todas las computadoras estén en cero sus parámetros DTS, MXS, AVS, y TM.
- 4- Verifique o conecte un dispositivo puede ser un motor o bombillo de 12 o 24 voltios a los conectores positivo(rojo) y negativo(negro) del prototipo
- 5- Plantee una velocidad predeterminada por ejemplo 5km/h, entonces proceda a pisar el pedal de transmisión de potencia, hasta que la computadora del



volante de inercia para motor en marcha indique una velocidad aproximada y deje de pisar el pedal

- 6- Al instante de dejar de pisar el pedal de transmisión de potencia con el pie izquierdo, pise el pedal de frenado regenerativo con el pie derecho al mismo tiempo hasta que el volante de inercia deje de rotar.
- 7- Una vez el sistema esté en reposo proceda a anotar los parámetros de DTS, MXS, AVS, y TM, de las computadoras del volante de inercia para motor en marcha y la computadora de la rueda regeneradora en el cuadro que aparece en datos y resultados.
- 8- Con ayuda de 2 dos compañeros uno que se encargue de vigilar y anotar el voltaje máximo que arroje el voltiampermetro y el otro que vigile y anote el amperaje máximo que arroje el voltiampermetro a la velocidad predeterminada.
- 9- Realice los pasos anteriores con las velocidades predeterminadas que aparecen el cuadro de la sección de datos y resultados hasta completar los espacios
- 10- Calcule los demás parámetros que están en la tabla con ayuda del marco conceptual y los siguientes parámetros hasta completarla:

Parámetro	Valor	Unidades
vuelta de rueda generadora	0,2105	m/vuelta
energía por vuelta	0,1034	J
Vuelta de volante =	1,477	m/vuelta
Vuelta =	6,2832	rad
1 hora =	3600	seg
Momento de inercia volante	0,22	Kg*m ²
1 km	1000	m
Energía por vuelta	6,5	J

- 11- Resuelva y realiza la sección cuestionario

MATERIALES Y EQUIPOS

Equipos e instrumentos de medición:

- 1- Prototipo de freno regenerativo
- 2- Multímetro

MEDIDAS DE SEGURIDAD



Recomendaciones de seguridad en la manipulación de equipos y materiales.

1. Aplicar todas las recomendaciones planteadas para el uso del prototipo.

DATOS Y RESULTADOS

1. Registrar los datos tomados de las computadoras MXS, AVS, DTS Y TM, y calcular los datos para llenar la tabla:

velocidad predeterminada [Km/h]	Vel. MAX. Volante inercia(MXS) [Km/h]	Vel. PROM. Volante de inercia(AVS) [Km/h]	Velocidad angular inercia PROM. Volante de inercia[rad/s]	Vel. MAX. Rueda regeneradora (MXS) [Km/h]	Vel. PROM. Rueda generadora(AVS) [Km/h]	Velocidad angular inercia PROM. Rueda regeneradora [rad/s]	Voltaje de regeneración MAX. [V]	Amperaje de regeneración MAX. [A]	Recorrido rueda generadora(DTS) [m]	Tiempo rueda regeneradora (TM) [s]	Vueltas rueda generadora	Energía aprovechada rueda reg.[J]	Energía de inercia experimental volante[J]	% regeneración
5														
10														
15														
20														
25														
30														
35														
													Promedio	

1. Elabore graficas Voltaje de regeneración MAX. Vs Velocidad de inercia PROM.
2. Elabore graficas amperaje de regeneración MAX. Vs Velocidad de inercia PROM.
3. Elabore las gráficas de Energía aprovechada rueda reg. Vs Velocidad angular inercial PROM y Energía de inercia experimental. Vs Velocidad angular inercial PROM en una sola para comparar

CUESTIONARIO

1. Explique cómo puede determinar la velocidad promedio en Km/h con Tiempo(TM) [s] y Recorrido rueda generadora(DTS) [m].
2. Realice un ejemplo del punto anterior con un tiempo de 20 segundos y un recorrido de 1000 metros.
3. Explique si se puede obtener más inercia si el peso del volante aumenta.



4. Explique si se puede implementar el sistema de frenado regenerativo en otro mecanismo de uso común además de vehículos eléctricos y como lo implementaría tomando de referencia el prototipo de la práctica.
5. Explique como el prototipo puede brindar un voltaje y amperaje constante por unos segundos.
6. Realice conclusiones de la práctica.

Referencias

- [1] J. Raymond A. Serway - John W. Jewett, Física para ciencias e ingeniería, Mexico: cengage learning, 2015.
- [2] U. a. Nariño, «LABORATORIO VIRTUAL,» Universidad Antonio Nariño, Bogota, D. c., 2015.
- [3] J. d. Wilson y A. J. Buffa, Física 5a. edición, Mexico: PEARSON EDUCACIÓN, 2002.
- [4] J. . M. Ortega Joya , «Diseño y fabricación de un prototipo funcional de un sistema de freno regenerativo para la generación de energía en vehículos para la Universidad Antonio Nariño,» Universidad Antonio Nariño, Bogota D.c., 2021.



Guía o practica de experimentación No.2



Una Universidad con Presencia
Nacional y Vocación Regional

FACULTAD DE INGENIERÍA FIMED

PRÁCTICA No. 2 ENERGÍA DE INERCIA EN VOLANTE O RUEDA GIRATORIA

PROGRAMA	Ingeniería FIMED
ASIGNATURA	
NOMBRE DEL PROFESOR	
NOMBRE DE LOS ESTUDIANTES	- - - -
FECHA	

INTRODUCCIÓN

La eficiencia y el reciclaje de energía es un tema que está en auge en el planeta ya que los recursos cada vez son más limitados y la contaminación por combustibles fósiles y las carreras ingenieriles deben relacionarse con este tema, por tanto, el prototipo de frenado regenerativo dispone a hacer una simulación de cómo funciona este tema en autos eléctricos e híbridos. El concepto de frenado regenerativo en vehículos se basa que en vez de utilizar elementos de frenado convencional como pastillas y tambores de frenado por fricción para detener el vehículo y transformar la energía de inercia en calor, se aprovecha dicha energía acoplado un sistema o un motor para transformar esa energía de inercia en energía eléctrica que posteriormente puede utilizar el vehículo.

La energía de inercia se da cuando un cuerpo con determinada masa este movimiento, ya que la energía no se crea ni se destruye la energía de inercia se puede transformar en energía eléctrica.

En el prototipo para desarrollar la practica ayuda al estudiante que interactúe con este a comprender los conceptos de inercia, transformación de energía, eficiencia, frenado regenerativo, física cinética.



OBJETIVO

1. Profundizar o crear un concepto de cómo funciona la inercia rotacional
2. entender y verificar el funcionamiento de un freno regenerativo
3. Repetir las pruebas para diferentes velocidades y así determinar el cambio de inercia y energía que brinda el sistema
4. demostrar y situar por medio del prototipo de freno regenerativo al estudiante con aplicaciones de reciclaje y eficiencia energética
- 5- Conclusiones del procedimiento realizado.

MARCO CONCEPTUAL

Velocidad lineal

La cinemática es la rama de la física que estudia el movimiento de los cuerpos, pero sin tener en cuenta la causa que los produce y analiza el movimiento de un objeto a lo largo de una línea recta. Uno de estos movimientos es el Movimiento Rectilíneo Uniforme en el cual se considera una partícula que se mueve con una velocidad constante [1] [2]. El modelo de partícula bajo velocidad constante se aplica a cualquier situación en la que una entidad que se pueda representar como partícula se mueva con velocidad constante. Esta situación ocurre con frecuencia, de modo que este modelo es importante. Si la velocidad de una partícula es constante, su velocidad instantánea en cualquier instante de su recorrido durante un intervalo de tiempo es la misma que la velocidad promedio durante el intervalo y su velocidad se podrá determinar mediante la expresión:

$$v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (1)$$

Donde V_x es la velocidad lineal, Δx es el recorrido desplazado y Δt el tiempo.

Velocidad angular

El periodo de una partícula en movimiento circular uniforme es una medida del número de segundos para una revolución de la partícula alrededor del círculo. El inverso del periodo es la razón de rotación y se mide en revoluciones por segundo [1]. Ya que una revolución completa de la partícula alrededor del círculo corresponde a un ángulo de 2π radianes, el producto de 2π y la razón de rotación da la velocidad angular ω de la partícula, medido en radianes/s o s^{-1} :

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (2)$$



Donde ω es la velocidad angular, v es la velocidad lineal y r es el radio de la rueda o en este caso el volante de inercia

Momento de inercia rotacional

Este se da cuando un cuerpo con cierta masa gira entorno a un eje de referencia produciéndose así una magnitud vectorial [1]. En para cada forma de cuerpo se posee una ecuación para hallar dicho momento de inercia rotacional la principal de donde parten las demás es:

$$I_m = \frac{1}{2}mr^2 \quad (3)$$

En el caso de una rueda de bicicleta se trata como un cilindro hueco y su fórmula es:

$$I_m = \frac{1}{2}m(r_1^2 + r_2^2) \quad (4)$$

Donde I_m es el momento de inercia, r_1 es el radio a la pared interior de la rueda y r_2 es el radio del eje de rotación a la pared exterior de la rueda.

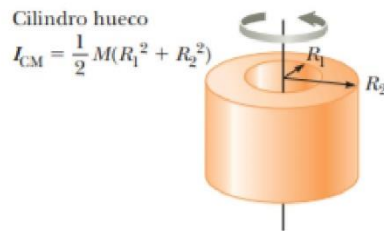


Figura 1. Momento de inercia cilindro hueco [1]

Energía cinética rotacional

las partículas individuales que conforman el objeto en rotación se mueven a través del espacio; siguen trayectorias circulares. En consecuencia, con el movimiento rotacional hay energía cinética asociada. Considere un objeto como un sistema de partículas y suponga que da vueltas en torno a un eje fijo z con una rapidez angular v [1]. La figura a continuación muestra al objeto en rotación e identifica una partícula sobre el objeto ubicada a una distancia r_i del eje de rotación. Si la masa de la i -ésima partícula es m_i y su rapidez tangencial es v_i , su energía cinética es:



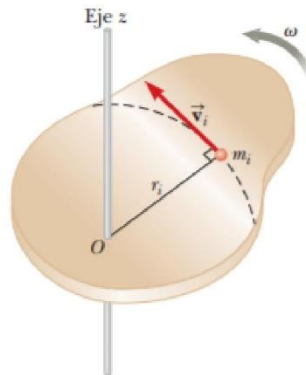


Figura 2. Partícula de un cuerpo en rotación [1].

$$Ek = \frac{1}{2} m * v^2 \quad (5)$$

Reemplazamos v de la ecuación (2) en la ecuación (5) y queda

$$Ek = \frac{1}{2} m * (\omega * r)^2 \quad (6)$$

Reemplazando la ecuación(3) en la ecuación(6) se obtiene

$$Ek = \frac{1}{2} Im * \omega^2 \quad (7)$$

TRABAJO ROTACIONAL

El trabajo lineal en física se define como la fuerza ejercida en un intervalo de distancia, por tanto, el trabajo rotacional es similar pero ahora se utiliza el radio y el recorrido en radianes como se presenta en la siguiente ecuación [2]:

$$W_{lineal} = F * \Delta x \quad (8)$$

Donde W_{lineal} es el trabajo lineal, F la fuerza que se ejerce y Δx la variación de distancia o el recorrido lineal. Ahora podemos decir que Δx se asemeja al recorrido de una partícula de un cuerpo en recorrer su circunferencia para esto se debe multiplicar el radio de la circunferencia por la distancia en radianes recorrida:

$$\Delta x = r * \theta \quad (9)$$



Donde r es el radio de la rueda y θ es los radianes de recorrido por ejemplo una vuelta es 2π por tanto despejando la ecuación queda:

$$W_{rotacional} = F * r * \theta \quad (10)$$

Donde Rotacional es el trabajo rotacional. Teniendo en cuenta que fuerza por radio es torque:

$$\tau = F * r \quad (11)$$

Donde τ es torque. La ecuación de trabajo rotacional queda:

$$W_{rotacional} = \tau * \theta \quad (12)$$

Porcentaje de aprovechamiento de energía inercial

La teoría dice que utilizando la ecuación de energía cinética rotacional obtendremos un resultado, pero al momento de proceder a comparar con los datos experimentales no concuerda esto se debe a que para hacer un cálculo más aproximado a lo teórico se debe tener en cuenta distintos factores que afectan a la práctica como lo puede ser perdidas por fricción, vibraciones, ambiente y demás factores que afectan la práctica. Para saber el porcentaje que aprovechamiento de energía de la forma más básica se utiliza la ecuación [3]:

$$\% \text{aprovechamiento} = \frac{\text{energía aprovechada}}{\text{energía inercia}} * 100\% \quad (13)$$

METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Realizar el siguiente procedimiento:

- 1- Verifique que el prototipo esté conectado a la red eléctrica.
- 2- Verifique que todas las computadoras estén en cero sus parámetros DTS, MXS, AVS, y TM.
- 3- Plantee una velocidad predeterminada por ejemplo 5km/h, entonces proceda a pisar el pedal de transmisión de potencia, hasta que la computadora del volante de inercia para motor en marcha indique una velocidad aproximada y deje de pisar el pedal
- 4- Al instante de dejar de pisar el pedal de transmisión de potencia con el pie izquierdo, encienda el interruptor negro en la opción línea o circuito cerrado



para encender la computadora que mide la inercia después de detener el motor.

- 5- Una vez el sistema esté en reposo proceda a anotar los parámetros de DTS, MXS, AVS, y TM, de las computadoras del volante de inercia para motor en marcha y la computadora de inercia en el cuadro que aparece en datos y resultados (para calcular el tiempo de motor en la tabla se debe tomar el tiempo de recorrido y restársele el tiempo de inercia, así para la distancia recorrida).
- 6- Apague el interruptor negro dejándolo en la opción círculo o circuito abierto
- 7- Realice los pasos anteriores con las velocidades predeterminadas que aparecen el cuadro de la sección de datos y resultados hasta completar los espacios
- 8- Calcule los demás parámetros que están en la tabla con ayuda del marco conceptual y los siguientes parámetros hasta completarla:

Parámetro	Valor	Unidades
vuelta de rueda generadora	0,2105	m/vuelta
energía por vuelta	0,1034	J
Vuelta de volante =	1,477	m/vuelta
Vuelta =	6,2832	rad
1 hora =	3600	seg
Momento de inercia volante	0,22	Kg*m ²
1 km	1000	m
Energía por vuelta	6,5	J

- 9- Resuelva y realiza la sección cuestionario

MATERIALES Y EQUIPOS

Equipos e instrumentos de medición:

- 1- Prototipo de freno regenerativo
- 2- Multímetro

MEDIDAS DE SEGURIDAD

Recomendaciones de seguridad en la manipulación de equipos y materiales.

1. Aplicar todas las recomendaciones planteadas para el uso del prototipo.



DATOS Y RESULTADOS

- Registrar los datos tomados de las computadoras MXS, AVS, DTS Y TM, y calcular los datos para llenar la tabla:

velocidad predeterminada [Km/h]	Velocidad MAX con motor(MXS) [Km/h]	Velocidad MAX inercia(MXS) [Km/h]	Distancia total recorrida(DTS)[m]	Distancia recorrida con motor[m]	Distancia recorrida inercia(DTS) [m]	tiempo total(TM) [s]	tiempo con inercia(TM)[s]	tiempo con motor[s]	velocidad promedio motor(AVS)[Km/h]
5									
10									
15									
20									
25									
30									
35									
velocidad promedio inercia(AVS) [Km/h]	velocidad promedio motor[m/s]	velocidad promedio inercia[m/s]	vueltas con motor	vueltas con inercia	Velocidad angular promedio motor [rad/s]	Velocidad angular promedio inercia [rad/s]	energía de inercia teórica[J]	energía de inercia experimental[J]	% energía inercial
Promedio									

- Elabore la gráfica Energía de inercia teórica Vs Velocidad angular promedio motor.
- Elabore la gráfica Energía de inercia experimental Vs Velocidad angular promedio inercia.
- Elabore una gráfica de Vueltas con inercia Vs Vueltas con motor

CUESTIONARIO

- Explique cómo puede determinar el recorrido en [Km] con la velocidad angular promedio inercia [rad/s] y con Tiempo con inercia (TM) [s] sabiendo que una vuelta del volante de inercia equivale a 1.477 metros.
- Realice un ejemplo del punto anterior con un tiempo de 20 segundos y una velocidad angular de 100 radianes sobre segundo.
- Explique si se puede obtener más inercia si el peso del volante aumenta.



4. Explique si se puede implementar el sistema de frenado regenerativo en otro mecanismo de uso común además de vehículos eléctricos y como lo implementaría tomando de referencia el prototipo de la práctica.
5. Realice conclusiones de la práctica.

Referencias

- [1] J. Raymond A. Serway - John W. Jewett, Física para ciencias e ingeniería, Mexico: cengage learning, 2015.
- [2] U. a. Nariño, «LABORATORIO VIRTUAL,» Universidad Antonio Nariño, Bogotá, D. c., 2015.
- [3] J. d. Wilson y A. J. Buffa, Física 5a. edición, Mexico: PEARSON EDUCACIÓN, 2002.
- [4] J. . M. Ortega Joya , «Diseño y fabricación de un prototipo funcional de un sistema de freno regenerativo para la generación de energía en vehículos para la Universidad Antonio Nariño,» Universidad Antonio Nariño, Bogotá D.c., 2021.



Anexo D: Resultados de experimentación

D.1 Experimentación de la energía cinética rotacional entregada por el prototipo

Vuelta de volante =	1,477	m/vuelta
Vuelta =	6,2832	rad
1 hora =	3600	seg
Momento de inercia volante	0,22	Kg*m ²
1 km	1000	m

Tabla 15: Parámetros para experimentación energía cinética entregada por el prototipo.

PRUEBA No. 1									
velocidad predeterminada [Km/h]	Velocidad MAX con motor(MXS) [Km/h]	Velocidad MAX inercia(MXS) [Km/h]	velocidad promedio motor(AVS)[K m/h]	velocidad promedio inercia(AVS) [Km/h]	tiempo total(TM) [s]	tiempo con inercia(TM)[s]	tiempo con motor[s]	Distancia total recorrida(DTS) [m]	Distancia recorrida inercia(DTS) [m]
5	8,2	8,6	4,6	4,5	37	30	7	47	37
10	21,3	12,3	6,5	6,1	43	38	5	78	64
15	19,6	19,5	9,3	8,7	57	54	3	147	131
20	21,5	21,4	10,3	9,7	61	55	6	174	147
25	27,8	27,8	12,1	11,6	75	70	5	252	226
30	30,7	31,1	13,4	12,2	83	74	9	309	251
35	36,1	35,7	14,8	13,7	88	80	8	362	304
Distancia recorrida con motor[m]	velocidad promedio motor[m/s]	velocidad promedio inercia[m/s]	vuelatas con motor	vuelatas con inercia	Velocidad angular promedio motor [rad/s]	Velocidad angular promedio inercia [rad/s]	energía de inercia teórica[J]	energía de inercia experimental[J]	% energía inercial
10,00	1,28	1,25	6,77	25,05	5,44	5,32	3,26	3,12	95,70
14,00	1,81	1,70	9,48	43,33	7,69	7,22	6,50	5,73	88,07
16,00	2,59	2,42	10,83	88,69	11,00	10,29	13,31	11,65	87,51
27,00	2,86	2,70	18,28	99,53	12,18	11,47	16,33	14,48	88,69
26,00	3,36	3,22	17,60	153,01	14,31	13,72	22,54	20,71	91,91
58,00	3,73	3,39	39,27	169,94	15,85	14,43	27,64	22,91	82,89
58,00	4,11	3,81	39,27	205,82	17,51	16,21	33,72	28,89	85,69
							Promedio		88,64

Tabla 16: Prueba No.1 de experimentación energía cinética entregada por el prototipo.

PRUEBA No. 2									
velocidad predeterminada [Km/h]	Velocidad MAX con motor(MXS) [Km/h]	Velocidad MAX inercia(MXS) [Km/h]	velocidad promedio motor(AVS)[K m/h]	velocidad promedio inercia(AVS) [Km/h]	tiempo total(TM) [s]	tiempo con inercia(TM)[s]	tiempo con motor[s]	Distancia total recorrida(DTS) [m]	Distancia recorrida(DTS) [m]
5,00	6,20	5,30	3,50	3,20	24,00	21,00	3,00	23,00	18,00
10,00	10,10	10,30	5,50	5,30	39,00	36,00	3,00	59,00	53,00
15,00	17,50	17,40	8,00	8,00	59,00	54,00	5,00	138,00	120,00
20,00	24,70	24,50	10,60	10,60	72,00	66,00	6,00	219,00	194,00
25,00	27,50	27,30	11,90	11,30	78,00	72,00	6,00	259,00	227,00
30,00	33,60	33,60	13,50	13,00	85,00	82,00	3,00	320,00	296,00
35,00	36,10	35,70	15,20	13,90	93,00	83,00	10,00	394,00	320,00
Distancia recorrida con motor[m]	velocidad promedio motor[m/s]	velocidad promedio inercia[m/s]	vuelatas con motor	vuelatas con inercia	Velocidad angular promedio motor [rad/s]	Velocidad angular promedio inercia [rad/s]	energía de inercia teórica[J]	energía de inercia experimental[J]	% energía inercial
5,00	0,97	0,89	3,39	12,19	4,14	3,79	1,89	1,58	83,59
6,00	1,53	1,47	4,06	35,88	6,51	6,27	4,66	4,32	92,86
18,00	2,22	2,22	12,19	81,25	9,46	9,46	9,85	9,85	100,00
25,00	2,95	2,95	16,93	131,35	12,54	12,54	17,30	17,30	100,00
32,00	3,31	3,14	21,67	153,69	14,08	13,37	21,80	19,66	90,17
24,00	3,75	3,61	16,25	200,41	15,97	15,38	28,06	26,02	92,73
74,00	4,23	3,86	50,10	216,66	17,98	16,44	35,57	29,74	83,63
Promedio									91,85

Tabla 17: Prueba No.2 de experimentación energía cinética entregada por el prototipo.

PRUEBA No. 3									
velocidad predeterminada [Km/h]	Velocidad MAX con motor(MXS) [Km/h]	Velocidad MAX inercia(MXS) [Km/h]	velocidad promedio motor(AVS)[K m/h]	velocidad promedio inercia(AVS) [Km/h]	tiempo total(TM) [s]	tiempo con inercia(TM)[s]	tiempo con motor[s]	Distancia total recorrida(DTS) [m]	Distancia recorrida(DTS) [m]
5,00	7,90	8,20	4,60	4,30	33,00	31,00	2,00	42,00	37,00
10,00	13,10	13,20	6,70	6,40	51,00	47,00	4,00	95,00	83,00
15,00	18,30	18,50	8,80	8,70	59,00	56,00	3,00	144,00	135,00
20,00	24,50	24,50	10,90	10,40	73,00	69,00	4,00	221,00	199,00
25,00	26,70	26,50	11,70	10,90	79,00	72,00	7,00	257,00	219,00
30,00	31,80	31,40	13,60	12,50	90,00	80,00	10,00	342,00	277,00
35,00	35,70	35,20	14,10	13,60	86,00	82,00	4,00	335,00	309,00
Distancia recorrida con motor[m]	velocidad promedio motor[m/s]	velocidad promedio inercia[m/s]	vuelatas con motor	vuelatas con inercia	Velocidad angular promedio motor [rad/s]	Velocidad angular promedio inercia [rad/s]	energía de inercia teórica[J]	energía de inercia experimental[J]	% energía inercial
5,00	1,28	1,20	3,39	25,05	5,44	5,09	3,26	2,85	87,38
12,00	1,86	1,78	8,12	56,19	7,93	7,57	6,91	6,31	91,25
9,00	2,45	2,42	6,09	91,40	10,41	10,29	11,92	11,65	97,74
22,00	3,03	2,89	14,90	134,73	12,89	12,30	18,29	16,65	91,04
38,00	3,25	3,03	25,73	148,27	13,84	12,89	21,07	18,29	86,79
65,00	3,78	3,48	44,01	187,54	16,09	14,79	28,47	24,05	84,48
26,00	3,92	3,78	17,60	209,21	16,68	16,09	30,60	28,47	93,03
Promedio									90,24

Tabla 18: Prueba No.3 de experimentación energía cinética entregada por el prototipo.

PRUEBA No. 4									
velocidad predeterminada [Km/h]	Velocidad MAX con motor(MXS) [Km/h]	Velocidad MAX inercia(MXS) [Km/h]	velocidad promedio motor(AVS)[K m/h]	velocidad promedio inercia(AVS) [Km/h]	tiempo total(TM) [s]	tiempo con inercia(TM)[s]	tiempo con motor[s]	Distancia total recorrida(DTS) [m]	Distancia recorrida inercia(DTS) [m]
5,00	9,00	9,30	5,00	4,80	37,00	35,00	2,00	51,00	47,00
10,00	10,50	10,40	6,00	5,50	44,00	37,00	7,00	73,00	56,00
15,00	16,50	16,30	8,00	7,60	60,00	54,00	6,00	133,00	114,00
20,00	21,90	21,20	10,10	9,50	68,00	64,00	4,00	191,00	196,00
25,00	27,30	26,70	12,40	11,30	81,00	72,00	9,00	279,00	226,00
30,00	34,80	34,00	13,90	13,40	86,00	83,00	3,00	346,00	305,00
35,00	40,10	39,60	15,20	14,80	96,00	91,00	5,00	406,00	373,00
Distancia recorrida con motor[m]	velocidad promedio motor[m/s]	velocidad promedio inercia[m/s]	vueltas con motor	vueltas con inercia	Velocidad angular promedio motor [rad/s]	Velocidad angular promedio inercia [rad/s]	energía de inercia teórica[J]	energía de inercia experimental[J]	% energía inercial
4,00	1,39	1,33	2,71	31,82	5,91	5,68	3,85	3,55	92,16
17,00	1,67	1,53	11,51	37,91	7,10	6,51	5,54	4,66	84,03
19,00	2,22	2,11	12,86	77,18	9,46	8,99	9,85	8,89	90,25
-5,00	2,81	2,64	-3,39	132,70	11,95	11,24	15,70	13,89	88,47
53,00	3,45	3,14	35,88	153,01	14,67	13,37	23,67	19,66	83,05
41,00	3,86	3,73	27,76	206,50	16,44	15,85	29,74	27,64	92,94
33,00	4,23	4,11	22,34	252,54	17,98	17,51	35,57	33,72	94,81
								Promedio	89,39

Tabla 19: Prueba No.4 de experimentación energía cinética entregada por el prototipo.

PRUEBA No. 5									
velocidad predeterminada [Km/h]	Velocidad MAX con motor(MXS) [Km/h]	Velocidad MAX inercia(MXS) [Km/h]	velocidad promedio motor(AVS)[K m/h]	velocidad promedio inercia(AVS) [Km/h]	tiempo total(TM) [s]	tiempo con inercia(TM)[s]	tiempo con motor[s]	Distancia total recorrida(DTS) [m]	Distancia recorrida inercia(DTS) [m]
5,00	9,70	10,00	5,30	5,20	37,00	35,00	2,00	58,00	53,00
10,00	12,20	12,00	6,30	5,90	48,00	45,00	3,00	84,00	73,00
15,00	15,90	16,20	7,70	7,60	57,00	55,00	2,00	122,00	116,00
20,00	22,60	22,60	10,30	9,70	73,00	69,00	4,00	208,00	186,00
25,00	26,50	26,30	12,50	11,00	87,00	75,00	12,00	301,00	229,00
30,00	31,80	31,40	13,40	12,50	94,00	82,00	12,00	350,00	285,00
35,00	36,10	35,20	14,80	13,60	95,00	88,00	7,00	389,00	332,00
Distancia recorrida con motor[m]	velocidad promedio motor[m/s]	velocidad promedio inercia[m/s]	vueltas con motor	vueltas con inercia	Velocidad angular promedio motor [rad/s]	Velocidad angular promedio inercia [rad/s]	energía de inercia teórica[J]	energía de inercia experimental[J]	% energía inercial
5,00	1,47	1,45	3,39	35,88	6,27	6,15	4,32	4,16	96,26
11,00	1,75	1,64	7,45	49,42	7,45	6,98	6,11	5,36	87,70
6,00	2,14	2,11	4,06	78,54	9,11	8,99	9,13	8,89	97,42
22,00	2,86	2,70	14,90	125,93	12,18	11,47	16,33	14,48	88,69
72,00	3,48	3,06	48,75	155,04	14,79	13,01	24,05	18,63	77,44
65,00	3,73	3,48	44,01	192,96	15,85	14,79	27,64	24,05	87,02
57,00	4,11	3,78	38,59	224,78	17,51	16,09	33,72	28,47	84,44
								Promedio	88,42

Tabla 20: Prueba No.5 de experimentación energía cinética entregada por el prototipo.

Valores y resultados promedio de 5 pruebas									
velocidad predeterminada [Km/h]	Velocidad MAX con motor(MXS) [Km/h]	Velocidad MAX inercia(MXS) [Km/h]	velocidad promedio motor(AVS)[K m/h]	velocidad promedio inercia(AVS) [Km/h]	tiempo total(TM) [s]	tiempo con inercia(TM)[s]	tiempo con motor[s]	Distancia total recorrida(DTS) [m]	Distancia recorrida inercia(DTS) [m]
5,00	8,20	8,28	4,60	4,40	33,60	30,40	3,20	44,20	38,40
10,00	13,44	11,64	6,20	5,84	45,00	40,60	4,40	77,80	65,80
15,00	17,56	17,58	8,36	8,12	58,40	54,60	3,80	136,80	123,20
20,00	23,04	22,84	10,44	9,98	69,40	64,60	4,80	202,60	184,40
25,00	27,16	26,92	12,12	11,22	80,00	72,20	7,80	269,60	225,40
30,00	32,54	32,30	13,56	12,72	87,60	80,20	7,40	333,40	282,80
35,00	36,82	36,28	14,82	13,92	91,60	84,80	6,80	377,20	327,60
Distancia recorrida con motor[m]	velocidad promedio motor[m/s]	velocidad promedio inercia[m/s]	vueltas con motor	vueltas con inercia	Velocidad angular promedio motor [rad/s]	Velocidad angular promedio inercia [rad/s]	energía de inercia teórica[J]	energía de inercia experimental[J]	% energía inercial
5,80	1,28	1,22	3,93	26,00	5,44	5,21	3,26	2,98	91,49
12,00	1,72	1,62	8,12	44,55	7,33	6,91	5,92	5,25	88,72
13,60	2,32	2,26	9,21	83,41	9,89	9,61	10,76	10,15	94,34
18,20	2,90	2,77	12,32	124,85	12,35	11,81	16,78	15,33	91,38
44,20	3,37	3,12	29,93	152,61	14,34	13,27	22,61	19,38	85,70
50,60	3,77	3,54	34,26	191,47	16,04	15,05	28,31	24,91	87,99
49,60	4,12	3,87	33,58	221,80	17,53	16,47	33,81	29,83	88,22
Promedio									89,69

Tabla 21: Promedio de valores y resultados de 5 pruebas de la Tabla 16 a Tabla 20

D.2 Experimentación de la energía cinética rotacional entregada por el prototipo con frenado regenerativo

Para proceder a la experimentación se toman los siguientes parámetros

Vuelta =	6,2832	rad
1 hora =	3600	seg
Momento de inercia volante	0,22	$Kg \cdot m^2$
1 km	1000	m
vuelta de rueda generadora	0,2105	m/vuelta
energía por vuelta rueda regeneradora	0,0165	J

Tabla 22: Parámetros para experimentación frenado regenerativo del prototipo.

PRUEBA 1														
velocidad predeterminada [Km/h]	Vel. MAX. Volante inercia(MXS) [Km/h]	Vel. PROM. Volante de inercia(AVS) [Km/h]	Velocidad angular inercia PROM. Volante de inercia[rad/s]	Vel. MAX. Rueda regeneradora (MXS)[Km/h]	Vel. PROM. Rueda regeneradora(AVS)[Km/h]	Velocidad angular inercia PROM. Rueda regeneradora [rad/s]	Voltaje de regeneración MAX. [V]	Amperaje de regeneración MAX. [A]	Recorrido rueda regeneradora(DTS) [m]	Tiempo rueda regeneradora (TM) [s]	Vueltas rueda regeneradora	Energía aprovechada rueda reg.[J]	Energía de inercia experimental volante[J]	% regeneración
5	7.6	4.8	5.69	4.3	0.8	0.67	3.2	0.28	0	3	0.00	0.00	3.56	0.00
10	12.9	7.4	8.78	4.6	1.5	1.26	5.2	0.52	3	8	14.25	0.23	8.47	2.77
15	18.5	8	9.49	6	2.7	2.28	6.7	0.59	3	4	14.25	0.23	9.90	2.37
20	20.9	12.1	14.35	7.9	3.1	2.61	8.5	0.81	3	4	14.25	0.23	22.65	1.03
25	26	15.7	18.62	11	4.6	3.88	10.2	0.71	5	4	23.75	0.39	38.14	1.02
30	34.8	15.4	18.26	15.2	6.2	5.23	14.5	0.87	8	5	38.00	0.63	36.69	1.70
35	36.1	14.6	17.31	16.3	6.4	5.39	18.4	0.86	8	5	38.00	0.63	32.98	1.90
Promedio													1.54	

Tabla 23: Prueba No.1 de experimentación energía frenado regenerativo por el prototipo.

PRUEBA 2														
velocidad predeterminada [Km/h]	Vel. MAX. Volante inercia(MXS) [Km/h]	Vel. PROM. Volante de inercia(AVS) [Km/h]	Velocidad angular inercia PROM. Volante de inercia[rad/s]	Vel. MAX. Rueda regeneradora (MXS)[Km/h]	Vel. PROM. Rueda regeneradora(AVS)[Km/h]	Velocidad angular inercia PROM. Rueda regeneradora [rad/s]	Voltaje de regeneración MAX. [V]	Amperaje de regeneración MAX. [A]	Recorrido rueda regeneradora(DTS) [m]	Tiempo rueda regeneradora (TM) [s]	Vueltas rueda regeneradora	Energía aprovechada rueda reg.[J]	Energía de inercia experimental volante[J]	% regeneración
5	7.9	4.9	5.81	4.2	1	0.84	2	0.48	0	3	0.00	0.00	3.71	0.00
10	10.1	6	7.12	3.9	1.6	1.35	2.8	0.44	1	3	4.75	0.08	5.57	1.40
15	15.6	10.3	12.22	5.7	1.3	1.10	6.3	0.57	3	6	14.25	0.23	16.41	1.43
20	22.7	12.8	15.18	8.2	3.3	2.78	10.3	0.81	3	4	14.25	0.23	25.35	0.92
25	26.5	12.2	14.47	10.1	4.4	3.71	13.7	0.69	4	4	19.00	0.31	23.03	1.36
30	30.4	21.6	25.62	12.7	5.6	4.72	15.5	0.77	6	4	28.50	0.47	72.18	0.65
35	36.1	24.4	28.94	16.5	3.9	3.29	17.8	0.82	10	12	47.51	0.78	92.11	0.85
Promedio													0.94	

Tabla 24: Prueba No.2 de experimentación energía frenado regenerativo por el prototipo.

PRUEBA 3														
velocidad predeterminada [Km/h]	Vel. MAX. Volante inercia(MXS) [Km/h]	Vel. PROM. Volante de inercia(AVS) [Km/h]	Velocidad angular inercia PROM. Volante de inercia[rad/s]	Vel. MAX. Rueda regeneradora (MXS)[Km/h]	Vel. PROM. Rueda regeneradora(AVS)[Km/h]	Velocidad angular inercia PROM. Rueda regeneradora [rad/s]	Voltaje de regeneración MAX. [V]	Amperaje de regeneración MAX. [A]	Recorrido rueda regeneradora(DTS) [m]	Tiempo rueda regeneradora (TM) [s]	Vueltas rueda regeneradora	Energía aprovechada rueda reg.[J]	Energía de inercia experimental volante[J]	% regeneración
5	9	4.9	5.81	5.3	1.6	1.35	5	0.78	1	3	4.75	0.08	3.71	2.10
10	14	8.4	9.96	4.1	2.1	1.77	6.8	0.8	2	4	9.50	0.16	10.92	1.43
15	19.6	5.7	6.76	6.7	2.9	2.44	7.6	0.72	3	4	14.25	0.23	5.03	4.66
20	23.3	12.3	14.59	9.4	4.1	3.46	12.3	0.64	4	4	19.00	0.31	23.41	1.34
25	26.7	15.1	17.91	9.9	3	2.53	9.5	0.74	6	7	28.50	0.47	35.28	1.33
30	32.1	19.6	23.24	12.3	3.3	2.78	16.1	0.78	7	16	33.25	0.55	59.44	0.92
35	36.6	20.5	24.31	15.8	7.2	6.07	18.1	1.07	7	4	33.25	0.55	65.02	0.84
Promedio													1.80	

Tabla 25: Prueba No.3 de experimentación energía frenado regenerativo por el prototipo.

PRUEBA 4														
velocidad predeterminada [Km/h]	Vel. MAX. Volante inercia(MXS) [Km/h]	Vel. PROM. Volante de inercia(AVS) [Km/h]	Velocidad angular inercia PROM. Volante de inercia[rad/s]	Vel. MAX. Rueda regeneradora (MXS)[Km/h]	Vel. PROM. Rueda regeneradora(AVS)[Km/h]	Velocidad angular inercia PROM. Rueda regeneradora [rad/s]	Voltaje de regeneración MAX. [V]	Amperaje de regeneración MAX. [A]	Recorrido rueda regeneradora(DTS) [m]	Tiempo rueda regeneradora (TM) [s]	Vueltas rueda regeneradora	Energía aprovechada rueda reg.[J]	Energía de inercia experimental volante[J]	% regeneración
5	9.1	4.2	4.98	3.9	1.6	1.35	4.2	0.36	1	3	4.75	0.08	2.73	2.86
10	13.3	7.8	9.25	4.5	2.1	1.77	6.1	0.42	1	3	4.75	0.08	9.41	0.83
15	22	11.7	13.88	9.2	3.7	3.12	8.8	0.78	4	4	19.00	0.31	21.18	1.48
20	21.9	13.6	16.13	7.2	3.1	2.61	9.7	0.86	3	4	14.25	0.23	28.62	0.82
25	26.5	14.1	16.72	10.7	4.1	3.46	10.9	0.83	5	5	23.75	0.39	30.76	1.27
30	30.4	14.7	17.43	12.7	5.6	4.72	12.2	0.78	6	4	28.50	0.47	33.43	1.40
35	39.1	14.8	17.55	18	4.3	3.62	15.2	0.92	13	12	61.76	1.02	33.89	3.00
Promedio													1.67	

Tabla 26: Prueba No.4 de experimentación energía frenado regenerativo por el prototipo.

PRUEBA 5														
velocidad predeterminada [Km/h]	Vel. MAX. Volante inercia(MXS) [Km/h]	Vel. PROM. Volante de inercia(AVS) [Km/h]	Velocidad angular inercia PROM. Volante de inercia[rad/s]	Vel. MAX. Rueda regeneradora (MXS)[Km/h]	Vel. PROM. Rueda generadora(AVS)[Km/h]	Velocidad angular inercia PROM. Rueda regeneradora [rad/s]	Voltaje de regeneración MAX. [V]	Amperaje de regeneración MAX. [A]	Recorrido rueda generadora(DTS) [m]	Tiempo rueda regeneradora (TM) [s]	Vueltas rueda generadora	Energía aprovechada rueda reg.[J]	Energía de inercia experimental volante[J]	% regeneración
5	6.1	3.9	4.63	0	0	0.00	1.7	0.13	0	3	0.00	0.00	2.35	0.00
10	11.6	6	7.12	3.3	1	0.84	2.7	0.58	1	6	4.75	0.08	5.57	1.40
15	17.6	6.6	7.83	6.2	2.9	2.44	6.7	0.52	2	3	9.50	0.16	6.74	2.32
20	22.6	12.8	15.18	7.6	3.3	2.78	10.8	0.64	3	4	14.25	0.23	25.35	0.92
25	26	11.9	14.11	9.4	4.3	3.62	12.3	0.79	4	4	19.00	0.31	21.91	1.43
30	32.1	15.3	18.15	12.3	5.8	4.89	15.6	0.78	6	4	28.50	0.47	36.22	1.29
35	36.6	20.2	23.96	17.2	7.6	6.41	18.2	1.1	8	4	38.00	0.63	63.13	0.99
Promedio														1.19

Tabla 27: Prueba No.5 de experimentación energía frenado regenerativo por el prototipo.

VALORES Y RESULTADOS PROMEDIO DE 5 PRUEBAS														
velocidad predeterminada [Km/h]	Vel. MAX. Volante inercia(MXS) [Km/h]	Vel. PROM. Volante de inercia(AVS) [Km/h]	Velocidad angular inercia PROM. Volante de inercia[rad/s]	Vel. MAX. Rueda regeneradora (MXS)[Km/h]	Vel. PROM. Rueda generadora(AVS)[Km/h]	Velocidad angular inercia PROM. Rueda regeneradora [rad/s]	Voltaje de regeneración MAX. [V]	Amperaje de regeneración MAX. [A]	Recorrido rueda generadora(DTS) [m]	Tiempo rueda regeneradora (TM) [s]	Vueltas rueda generadora	Energía aprovechada rueda reg.[J]	Energía de inercia experimental volante[J]	% regeneración
5	7.94	4.54	5.38	3.54	1	0.84	3.22	#¡VALOR!	0.4	3	1.90	0.03	3.19	0.98
10	12.38	7.12	8.44	4.08	1.66	1.40	4.72	0.552	1.6	4.8	7.60	0.13	7.84	1.59
15	18.66	8.46	10.03	6.76	2.7	2.28	7.22	0.636	3	4.2	14.25	0.23	11.07	2.12
20	22.28	12.72	15.09	8.06	3.38	2.85	10.32	0.752	3.2	4	15.20	0.25	25.03	1.00
25	26.34	13.8	16.37	10.22	4.08	3.44	11.32	0.752	4.8	4.8	22.80	0.38	29.46	1.27
30	31.96	17.32	20.54	13.04	5.3	4.47	14.78	0.796	6.6	6.6	31.35	0.52	46.41	1.11
35	36.9	18.9	22.41	16.76	5.88	4.96	17.54	0.954	9.2	7.4	43.71	0.72	55.27	1.30
Promedio														1.34

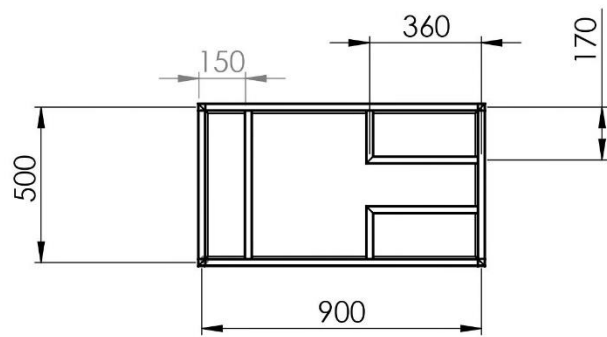
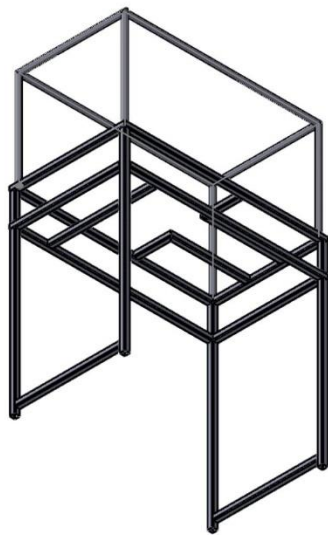
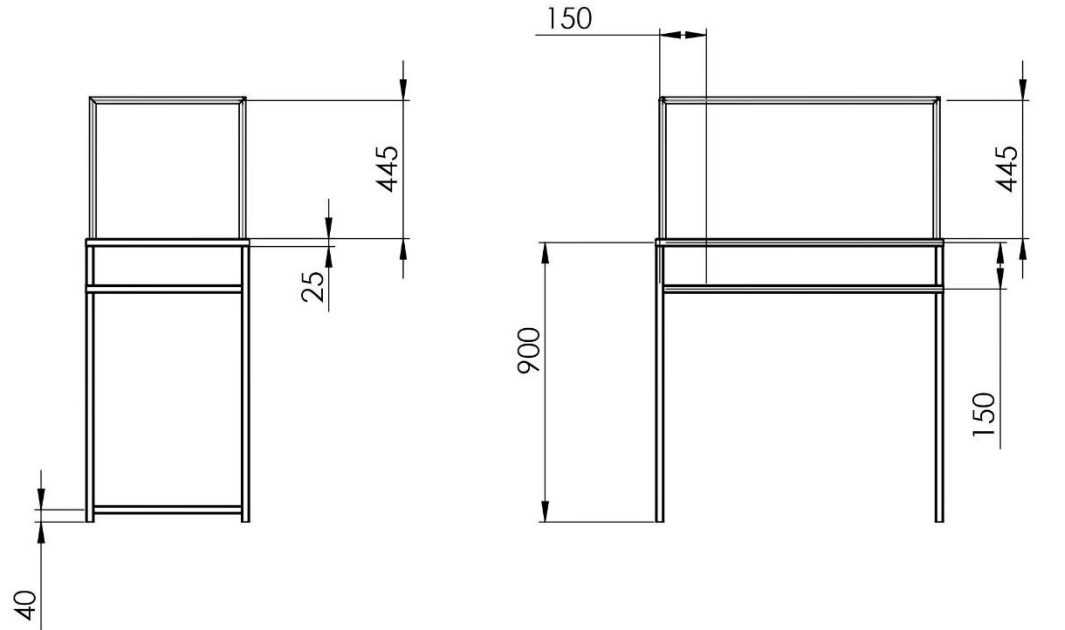
Tabla 28: Promedio de valores y resultados de 5 pruebas de la Tabla 23 a la Tabla 27

Anexo E: Planos del prototipo de freno regenerativo

Planos mecánicos

N.º	N.º DE PIEZA	
1	soporte base de la estructura preliminar	
2	Pieza3^Ensamblaje	
3	rueda ejemplo 57cm	
4	base pedal potencia	
5	eje pedal de potencia	
6	pedal palanca potencia	
7	tornillo pedal potencia	
8	largero para pedales	
9	fulcro pedal rege	
10	tapa pedal de rege	
11	cadena para pedal	
12	s de anclaje pedal	
13	base para motor de potencia	
14	motor de potencia	
15	motor generador	
16	rueda generadora	
17	ruta cadena ensable	
18	piñon pequeño1	
19	eslabon 2	
20	eslabon 1	
21	piñon grande	
22	bulon de separacio	
23	palanca motor rege 2	
24	eje de volante	
25	rodamiento 6 mm	

Material: Acero NTC4526	Soldadura: Tipo E60	Institución: Universidad Antonio Nariño Sede sur
Escala: 1: 20	Hoja: A4	Vista:
Fecha: 15/09/2021	medidas: mm	Título: Ensamble prototipo freno regenerativo
		Creador: Jean Marco Ortega Joya



Material: Acero NTC4526		Soldadura: Tipo E60	Institución: Universidad Antonio Nariño Sede sur
Escala: 1: 20	Hoja: A4	Vista: 	Título Medidas bastidor prototipo freno regenerativo
Fecha: 15/09/2021	medidas: mm	Creador: Jean Marco Ortega Joya	

Anexo F: Diagramas eléctricos del prototipo de freno regenerativo

Diagrama de voltíamperímetro

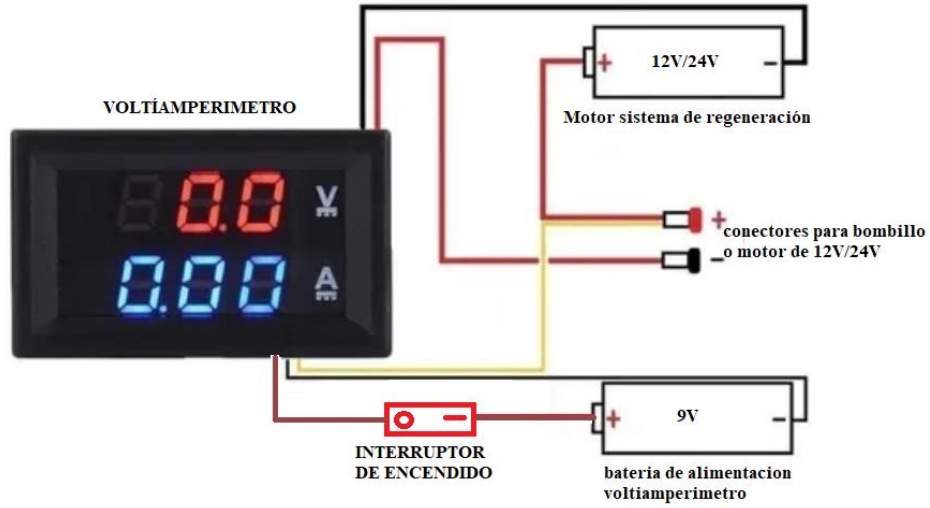
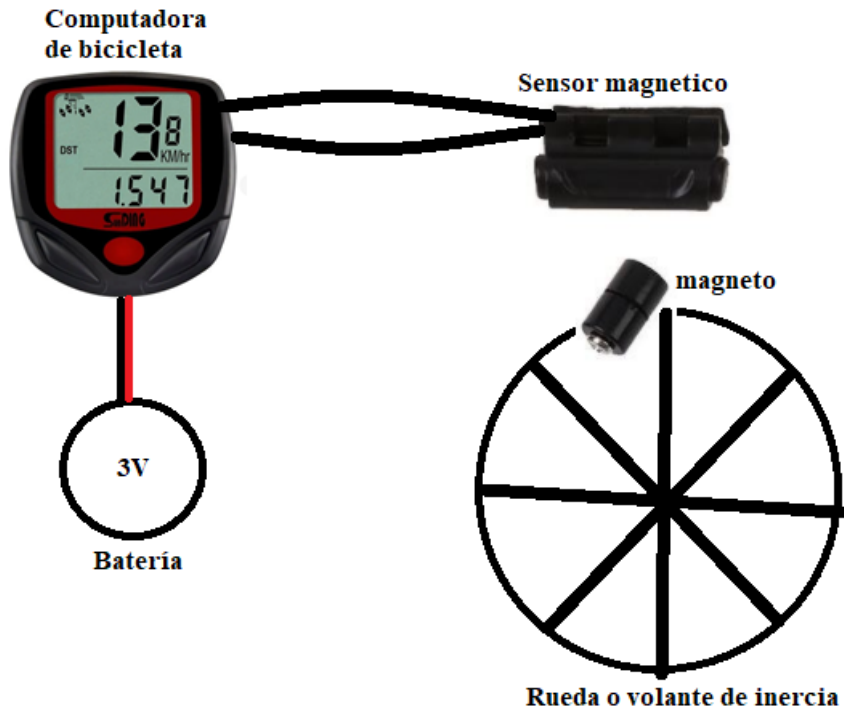


Diagrama eléctrico de una computadora



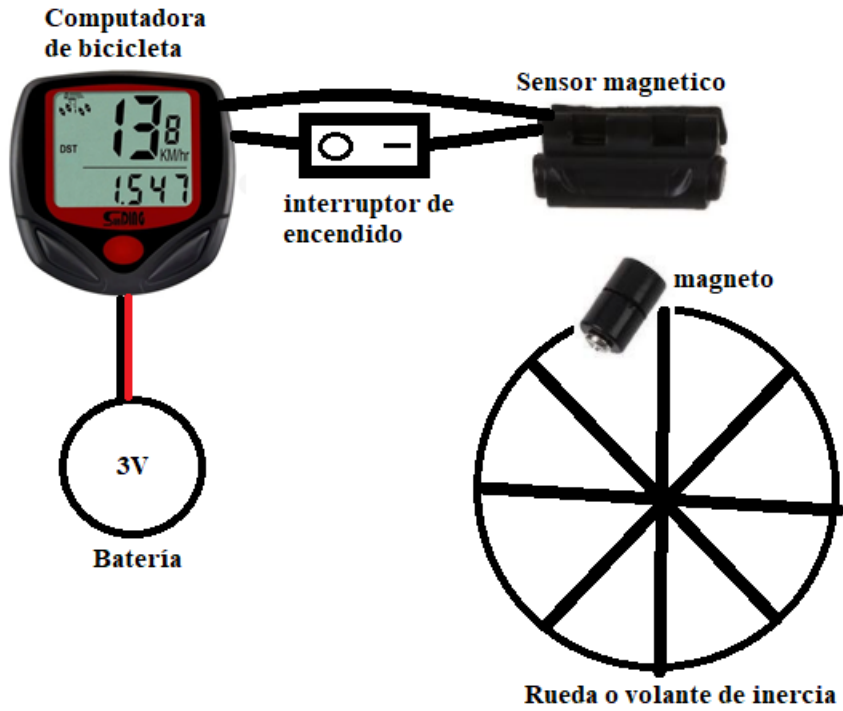


Diagrama de motor de transmisión de potencia

