



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de ingeniería

Maestría en diseño e innovación

Rediseño de un recolector energético de pavimento vial

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en diseño e innovación

Presenta:

Ing. Jadiel Salvador Tapia Nevárez

Dirigido por:

Dr. Gonzalo Macías Bobadilla

Sinodales:

M en I. Jorge Arturo García Pitol

Secretario

Dr. Manuel Toledano Ayala

Vocal

Dr. Juan Carlos A. Jáuregui Correa

Suplente

M. en O.C.I. Enrique Fernando Sepúlveda Weckmann

Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Febrero del 2024



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales
de Información



Rediseño de un recolector energético de pavimento
vial

por

Jadiel Salvador Tapia Nevárez

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Clave RI: IGMAC-311359

Índice

I. Introducción.....	8
II. Antecedentes	9
2.1 Energía sostenible	9
2.2 Fuentes de energía renovable	9
2.2.1 Energía solar	10
2.2.2 Energía eólica	11
2.3 Fuentes renovables de vibraciones mecánicas	11
2.3.1 Recolectores energéticos en el transporte.....	13
2.3.2 Recolectores energéticos de pavimento vial.....	15
III. Fundamentación teórica.....	18
3.1 Mecanismo de cuatro barras.....	18
3.2 Resortes de torsión	19
3.3 Engranajes rectos	20
3.4 Volante de inercia.....	21
3.5 Fundamentos de fuerza, esfuerzo y momento de inercia	22
3.6 Generador eléctrico	24
3.7 Acumulador eléctrico	24
3.8 Investigación aplicada sobre los Recolectores energéticos de pavimento vial (REPV)	25
IV. Objetivo	28
4.1 Objetivo general	28
4.2 Objetivos particulares.....	28
V. Metodología	29
5.1 Metodología de diseño	29
VI. Resultados.....	32
6.1 Establecimiento de requerimientos de diseño	32
6.2 Requerimientos de rediseño del REPV	37
6.3 Rediseño del REPV.....	38
6.3.1 Pedal	49
6.3.2 Rodamientos	50
6.3.3 Resortes torsionales	51
6.3.4 Cople.....	51
6.3.5 Barra de palanca	52

6.3.6 Horquilla.....	52
6.3.7 Rótula.....	53
6.3.8 Perno rótula.....	54
6.3.9 Manivela.....	54
6.3.10 Caja de engranajes.....	55
6.3.11 Acoplador y volante de inercia para el generador eléctrico.....	56
6.3.12 Trinquete.....	57
6.3.13 Generador eléctrico.....	58
6.3.14 Base del generador eléctrico.....	60
6.3.15 Base de la caja de engranajes.....	61
6.3.16 Sistema de almacenamiento.....	62
6.3.16 Construcción del prototipo.....	63
6.4 Iluminación y funcionalidad del REPV.....	68
6.4.1 Estudio de iluminación en caseta de seguridad.....	68
6.4.2 Posibles escenarios de aplicación.....	72
VII. Conclusiones.....	73
VIII. Agradecimientos.....	74
IX. Bibliografía y Referencias.....	75
IX. Anexos.....	77

Índice de Figuras.

Figura 1 Estructura interna de un recolector para captar vibraciones en estructuras de puentes. Fuente: Harvesting traffic-induced vibrations for structural health monitoring of bridges (p. 4) (Galchev, McCullagh, Peterson, & Najafi, 2011).....	12
Figura 2 Esquema estructural de un recolector con una viga en voladizo. Fuente: A cantilever-plucked and vibration-driven rotational energy harvester with high electric outputs (p.3) (Fan, Liu, Wei, Zhang, Zhang, Tao, 2021).....	13
Figura 3 Esquema de un recolector energético utilizando piezoeléctricos. Fuente: Efficient piezoelectric harvester for random broadband vibration of rail (p. 3) (Yang, Gao, Wang, Zuo, Dai, Cong, 2020).....	15
Figura 4: Esquema de pavimento piezoeléctrico. Fuente: Energy output of piezoelectric transducers and pavements under simulated traffic load (p. 2) (Cao, Sha, Liu, Li, Jiang, 2021). 16	
Figura 5 Estructura del pavimento Fuente: Thermolectric, piezoelectric and photovoltaic harvesting technologies for pavement engineering (p.3) (Wang, Xiao, Zhao, 2021).....	17
Figura 6 Modelo cinemático simplificado del mecanismo espacial en forma de doble V. Fuente: A novel road energy harvesting system based on a spatial double V-shaped mechanism for near-zero-energy toll stations on expressways (p. 5) (Sun, Wang, Zheng, Luo, Zhang, 2021).....	17
Figura 7 Dos inversiones no distintas de manivela-balancín (Norton, 2009).....	19
Figura 8 Resortes de torsión (Budynas & Nisbett, 2012).....	20

Figura 9 Nomenclatura de los dientes de engranes rectos (Budynas & Nisbett, 2012).....	21
Figura 10 Volante en un eje motriz (Norton, 2009).....	21
Figura 11 Motor DC sin escobillas. Fuente: A novel road energy harvesting system based on a spatial double V-shaped mechanism for near-zero-energy toll stations on expressways (p. 6) (Sun, Wang, Zheng, Luo, Zhang, 2021)	24
Figura 12 Diagrama de una celda de batería.....	25
Figura 13 Representación de un dispositivo REPV con un sistema de transmisión hidráulica accionado mecánicamente, utilizando una unidad de almacenamiento de energía mecánica basado en un acumulador hidráulico cargado con gas. Fuente: Integration of a mechanical energy storage system in a road pavement energy harvesting hydraulic device with mechanical actuation (p.11) (Duarte, Ferreira, Fael, 2017).....	25
Figura 14 Diseño y prototipo de la propuesta REPV. Fuente: A novel road energy harvesting system based on a spatial double V-shaped mechanism for near-zero-energy toll stations on expressways. (p. 4) (Sun, Wang, Zheng, Luo, Zhang, 2021)	26
Figura 15 a) Mecanismo de recolector de energía mecánico (REM), b) Movimiento bidireccional de los piñones a y b convertido en la rotación unidireccional del generador. Fuente: Design, fabrication, modelling and analyses of a movable speed bump-based mechanical energy harvester (MEH) for application on road (p.6) (Azam, Ahmed, Hayat, Ali., Khan, Murtaza, Aslam 2020).....	27
Figura 16 Metodología de diseño utilizada en el proyecto	29
Figura 17 Mapa de recorrido del usuario para la generación de energía eléctrica	33
Figura 18 Condiciones y elementos eléctricos de una caseta de seguridad del CU UAQ.....	34
Figura 19 Requerimientos de diseño para el REPV	37
Figura 20 Restricciones de diseño del REPV	38
Figura 21 Primer diagrama de funcionamiento del REPV	39
Figura 22 Posiciones de movimiento del mecanismo: A) Posición inicial, B) Posición a altura máxima, C) Posición a altura mínima.....	40
Figura 23 Modelo 3D del prototipo A	41
Figura 24 Modelo 3D del rediseño del REPV	42
Figura 25 Sección del REPV para el análisis estructural.....	42
Figura 26 Zonas de deformación del REPV	43
Figura 27 Zonas de concentración de esfuerzos del REPV	44
Figura 28 Zonas de deformación del REPV con estructura de PTR.....	44
Figura 29 Zonas de concentración de esfuerzos del REPV con estructura de PTR	45
Figura 30 Elementos considerados para el análisis dinámico.....	46
Figura 31 A) Posición del REPV a 0°, B) Posición del REPV a 45°, C) Posición del REPV a 90°, D) Posición del REPV a 180°, E) Posición del REPV a 270°	47
Figura 32 Modelo 3D del prototipo C.....	49
Figura 33 Modelo 3D del pedal diseñado con PTR y una barra soldada de 20 mm.....	50
Figura 34 Modelo 3D de un rodamiento de piso con un diámetro interior de 20 mm.....	50
Figura 35 Modelo de un resorte torsional	51
Figura 36 Modelo 3D de un cople de mordaza con un diámetro interior de 20 mm	52
Figura 37 Modelo 3D de una barra de palanca con 2 barrenos para su sujeción con los otros elementos	52
Figura 38 Modelo 3D de una cabeza de horquilla con un barrenado de 20 mm	53
Figura 39 Modelo 3D de una cabeza de rótula	54

Figura 40 Modelo 3D del perno de la rótula.....	54
Figura 41 Modelo 3D de la manivela	55
Figura 42 Caja de engranajes con arreglo planetario lineal	56
Figura 43 Modelo 3D volante de inercia y acople para el generador eléctrico	57
Figura 44 Modelo 3D de un trinquete.....	58
Figura 45 Generador eólica Air Breeze	59
Figura 46 Embobinado y disco de imanes del generador eléctrico eólico Air Breeze	59
Figura 47 Tablilla electrónica del generador eólico Air Breeze	60
Figura 48 Modelo 3D de la base para el generador eléctrico	61
Figura 49 Modelo 3D de la base para la caja de engranajes.....	62
Figura 50 Dispositivo de almacenamiento energético	62
Figura 51 Cortes de PTR para la estructura del pedal	63
Figura 52 Estructura del pedal soldado y pulido	64
Figura 53 Maquinado en uno de los extremos de la barra redonda	64
Figura 54 Unión entre pedal y barra redonda por medio de soldadura.....	64
Figura 55 Ensamble de los extremos de la barra redonda en los rodamientos	65
Figura 56 Maquinado de la barra cuadrada que funcionará como eslabón impulsor	65
Figura 57 Ensamble de la barra cuadrada en uno de los extremos de la barra redonda	66
Figura 58 Ensamble de la cabeza de horquilla con el extremo restante de la barra cuadrada por medio de un tornillo con guía	66
Figura 59 Ensamble manivela a la caja de engranajes.....	67
Figura 60 Maquinado y ensamble del volante de inercia y adaptador.....	67
Figura 61 Modelo 3D de la caseta de seguridad	69
Figura 62 Niveles de iluminación en las diferentes áreas de la caseta de seguridad	70
Figura 63 Parámetros de iluminación para la lámpara de la puerta	71
Figura 64 Parámetros de iluminación para la lámpara de la ventana lateral	71
Figura 65 Parámetros de iluminación para la lámpara del interior de la caseta	71

Índice de Tablas

Tabla 1 Patentes registradas de diferentes REPV	32
Tabla 2 Niveles de iluminación para una caseta de vigilancia o seguridad	34
Tabla 3 Conteo de vehículos total dividido por categorías	35
Tabla 4 Promedios del conteo total de vehículos por día, hora y minuto	36
Tabla 5 Pesos vehiculares de algunos modelos comercializados en México	36

Índice de Gráficas

Gráfica 1 Curva de par de torsión de entrada para un mecanismo de cuatro barras de manivela-balancín desbalanceado (Norton, 2009).....	22
Gráfica 2 Conteo de vehículos en la entrada al Centro Universitario por Avenida Hidalgo.....	35
Gráfica 3 Deformación total del REPV con estructura de PTR.....	45
Gráfica 4 Esfuerzo equivalente de Von Mises producido sobre el REPV con estructura de PTR.....	46
Gráfica 5 Momento ideal del engrane primario al generar una revolución	48

Resumen

Palabras claves: energía renovable, recolector energético de pavimento vial, tráfico vehicular, mecanismo manivela-balancín, energía eléctrica.

En la actualidad, existen diversas fuentes renovables que ayudan a los países a generar energía eléctrica de manera limpia con el fin de restaurar la salud del planeta, es por eso por lo que son vitales para la desaceleración del uso de fuentes contaminantes para la generación de energía eléctrica. Dichas fuentes renovables deben tener una transición lenta y adaptativa debido al modelo económico mundial actual. Sin embargo, muchas de las actuales fuentes renovables presentan la gran desventaja de depender de las condiciones climatológicas y meteorológicas para la generación de energía verde, además de que presentan una eficiencia energética de entre el 25.05% al 27.52%, en el caso de los paneles solares y del 30% al 35%, en el caso de las turbinas eólicas. Algunas de las fuentes de energía renovable que no dependen de las condiciones naturales y que cuentan con una eficiencia energética de entre el 48% al 65% son los Recolectores Energéticos de Pavimento Vial (REPV), los cuales producen energía eléctrica por medio de energía mecánica generada por el flujo vehicular. Estos sistemas cuentan con diferentes mecanismos y arreglos para generar energía eléctrica como lo son el uso de piezoeléctricos, triboeléctricos o sistemas de accionamiento mecánico. En esta investigación se rediseñará el modelo de un recolector energético de pavimento vial el cual tiene como principio de funcionamiento el mecanismo de cuatro barras manivela-balancín y que busca ser implementado en la entrada y salida del circuito universitario de la Universidad Autónoma de Querétaro en Avenida Hidalgo con el fin de generar energía eléctrica que pueda ser utilizada para la iluminación exterior de las casetas de seguridad. El REPV al producir energía para una lámpara de 18 W con un flujo luminoso de 1620 lúmenes por metro sería suficiente para cumplir con la norma de iluminación que existe para una caseta de seguridad.

Abstract

Keywords: renewable energy, road pavement harvester energy, vehicular traffic, mechanism crank-rocker, electrical energy.

Currently, there are several renewable sources that help countries to generate electrical energy in a clean way to restore the health of the planet, which is why they are vital for slowing down the use of polluting sources for the generation of electricity. These renewable sources must have a slow and adaptive transition due to the current global economic model. However, many of the current renewable sources have the great disadvantage of depending on climatological and meteorological conditions to produce green energy, in addition to having an energy efficiency of 25.05% to 27.52%, in the case of panels. solar and from 30% to 35%, in the case of wind turbines. Some of the renewable energy sources that do not depend on natural conditions and that have an energy efficiency of 48% to 65% are Road Pavement Energy Harvester (RPEH), which produce electrical energy through mechanical energy generated by the vehicular flow. These systems have different mechanisms and arrangements to generate electrical energy, such as the use of piezoelectric, triboelectric, or mechanical drive systems. In this research, the model of a road pavement energy collector will be redesigned, which has as its operating principle the mechanism of four crank-rocker bars and which seeks to be implemented at the entrance and exit of the university circuit of the Universidad Autónoma de Querétaro in Avenida Hidalgo to generate electrical energy that can be used for exterior lighting of the security booths. The RPEH by producing energy for an 18 W lamp with a luminous flux of 1620 lumens per meter, would be sufficient to comply with the lighting standard that exists for a security booth.

I. Introducción

La energía renovable proviene de fuentes o procesos naturales que se pueden reponer y se espera que sea la principal solución ante el cambio climático. Es por esto último, por lo que muchos países están invirtiendo en diferentes tipos de energías renovables con el fin de sustituir las energías no renovables tan pronto como sea viable. (Zohuri, Farahnaz, & Mossavar-Rahmani, 2022) Sin embargo, se debe tener en cuenta que las mayores desventajas de las fuentes de energías renovables son la dependencia del clima y de la misma meteorología (Marks-Bielska, Bielski, Pik, & Kurowska, 2020). Dado que muchos países desarrollados cuentan con una gran cantidad de vehículos, es posible transformar esta energía mecánica generada por la interacción del vehículo sobre el pavimento en energía eléctrica (Wang, Xiao, & Zhao, 2021), debido a que el pavimento es golpeado y rodado constantemente a medida que circulan los vehículos, generando cantidades considerables de energía mecánica (Cao, Sha, Liu, Li, & Jiang, 2021). Aproximadamente del 15% al 21% de la energía se transfiere a las ruedas del vehículo (Duarte, Ferreira, & Fael, 2017), es por esto, por lo que es posible extraer energía que, utilizando tecnologías específicas, se puede transformar en energía eléctrica (Duarte, Ferreira, & Fael, 2017). La idea de un recolector energético de pavimento vial (REPV) es que una parte mecánica se mueva en respuesta a la excitación mecánica externa, después, un elemento de transducción transforma la energía mecánica en energía eléctrica y, finalmente, un sistema de almacenamiento guarda la energía para su posterior uso (Giusa, y otros, 2013). Si bien, la Universidad Autónoma de Querétaro cuenta con fuentes renovables que ayudan a generar energía eléctrica limpia, sin embargo, existe un subproducto que no es aprovechado para la generación de energía eléctrica que es el peso de los vehículos que ejercen sobre el pavimento y los reductores de velocidad que se encuentran en las casetas de seguridad ubicados en las entradas a las instalaciones. Este peso solamente deforma y deteriora el pavimento, pero con el diseño de un mecanismo y futura implementación, ese peso puede generar energía mecánica y posterior a ello transformarla en energía eléctrica.

La idea es utilizar el alto flujo de tránsito vehicular en su entrada principal en Avenida Hidalgo, la cual tiene el mayor ingreso de vehículos hacia las instalaciones, además de una caseta de seguridad y un reductor de velocidad para evitar y prevenir accidentes. Es en ese lugar donde se considera que mucha de la energía mecánica que ejercen los vehículos sobre el reductor de velocidad puede ser convertida en energía eléctrica de manera limpia a través de un REPV, y ésta misma energía eléctrica puede ser utilizada para la iluminación interior y/o exterior de una caseta de seguridad.

II. Antecedentes

2.1 Energía sostenible

La energía sostenible no sólo es la generación de energía a través de fuentes renovables, sino también es su distribución y optimización. Se define como un modelo de desarrollo en donde las sociedades producen y utilizan energía, evitando un consumo excesivo de recursos en el planeta (Paraschiv & Paraschiv, 2023). La energía sostenible comienza desde la etapa de producción hasta la distribución, el consumo y la eliminación de sistemas, sin discriminar la producción de gases nocivos producidos en cada etapa. Las necesidades de la sociedad son importantes para garantizar un apoyo energético adecuado para el desarrollo social y económico (Paraschiv & Paraschiv, 2023).

2.2 Fuentes de energía renovable

Se define como energía verde a toda aquella que proviene de fuentes naturales como la luz solar, viento, lluvia, mareas, entre otras. Estos recursos energéticos se reabastecen de manera natural. Las tecnologías implementadas en energías renovables incluyen: energía solar, marina, eólica, hidroeléctrica, bioenergía, geotérmica, entre otras. (Kalyani, Dudy, & Pareek, 2015) y son críticas debido a su cuidado con el medio ambiente y son muy beneficiosas para lidiar con las crisis energéticas (Qazi, y otros, 2019), es por eso, por lo que las fuentes primordiales son la energía hidráulica, eólica y solar, y este tipo de generación de energía se está dando en países de alto crecimiento económico. Sin embargo, muchas economías sufren al transformar energía sucia en limpia debido a la falta de financiamiento, tecnologías innovadoras y capital humano no calificado (Zhao, Dong, Dong, & Shahbaz, 2022).

Las fuentes de energía renovables tienen una cantidad importante de virtudes y ventajas, como, por ejemplo, un bajo costo de operación, apoyo al empleo y estabilizan los precios de la energía (Halkos & Gkampoura, 2020), pero también, cuentan con algunas principales desventajas como su alto costo inicial y de almacenamiento, que puede ser excesivo y desalentador para los usuarios. Además, la energía renovable depende de las condiciones climáticas y meteorológicas que podrían provocar una deficiencia energética. Aunado a esto, se requieren grandes terrenos para instalar toda la tecnología necesaria. (Halkos & Gkampoura, 2020).

Con la implementación de la Reforma Energética en 2013 y la Ley de Transición Energética de

2015, México estableció tres objetivos de transición hacia la energía limpia: el 35% de la producción total de electricidad debe provenir de energía limpia para 2024; 37,7% para 2030; y 50% para 2050 (Diezmartínez, 2021) en donde la Secretaría de Energía tiene proyectado la instalación de 66,91 GW entre 2018 y 2032, en donde el 55% serán energías limpias, y se espera que estas energías experimenten una tasa de crecimiento promedio anual del 6,1 % hasta 2032. (Diezmartínez, 2021).

Es evidente que las fuentes de energía renovable son consideradas la principal solución ante la contaminación ambiental y todo lo que conlleva, sin embargo, algunas de estas no son viables para los países que no presenten condiciones económicas y/o climatológicas óptimas para poder ser implementadas, por lo que es necesario implementar diferentes tecnologías y/o innovaciones en fuentes renovables para que puedan adaptarse a estas condiciones.

2.2.1 Energía solar

La energía solar es una fuente de energía renovable, sostenible y ampliamente distribuida y tiene el potencial de reemplazar los combustibles fósiles en un futuro próximo. Sin embargo, la contribución de la energía solar a la producción mundial de electricidad sigue siendo muy baja (3,6%) (Pourasl, Vatankhah, & Khojastehnezhad, 2023). Con una capacidad instalada de 1.053 GW en 2022, la energía solar es la segunda tecnología de energía renovable más instalada, después de la tecnología hidroeléctrica con 1.392 GW (Pourasl, Vatankhah, & Khojastehnezhad, 2023).

Aunque científicos han encontrado formas de generar energía verde como la eólica e hidroeléctrica, y algunas otras formas de energía como la radiación y la biomasa (Kalyani, Dudy, & Pareek, 2015), la energía solar es la energía renovable más abundante y con un gran alcance para diferentes aplicaciones como: calentadores solares de agua; sistemas de refrigeración, sistemas de energía solar para el hogar; cocinas; y refrigeración. Estas aplicaciones pueden satisfacer las necesidades de una familia y lograr un futuro sostenible (Qazi, y otros, 2019).

Una tendencia importante en los sistemas de energía solar es la mejora continua de la eficiencia de los paneles solares, y en los últimos años se han desarrollado paneles fotovoltaicos (PV) más eficientes (Khare, Chaturvedi, & Mishra, 2023). Nuevos materiales y técnicas de fabricación han mostrado resultados prometedores para aumentar la eficiencia, como el Fosforo de indio (InP) con 25.97%, Fosforo de indio y galio (InGaP) con 25.05% y el Óxido de zinc (ZnO) con 27.52% (Khare, Chaturvedi, & Mishra, 2023).

La energía solar es un recurso que se encuentra a disposición de muchos países es por eso por lo que han apostado por el uso de paneles solares para la generación de energía limpia y han investigado cómo mejorar su eficiencia energética, sin embargo, aún existen retos que abordar como el alto costo de instalación, la presencia de las condiciones ambientales óptimas, el almacenamiento energético y mantenimiento complicados.

2.2.2 Energía eólica

Con el avance tecnológico y la innovación, la industria de la energía eólica se está desarrollando rápidamente, aumentando su capacidad instalada. En 2020, la capacidad instalada global de energía eólica fue de 93 GW, un aumento significativo del 52,96% en comparación con la capacidad de 2019 (Zhao, Sun, & Wang, 2022). La energía contenida en el viento se extrae en forma de energía mecánica mediante aerogeneradores. Estos aerogeneradores pueden ser aerogeneradores de eje horizontal o vertical. En general, la mayoría de las turbinas eólicas pueden producir energía con una eficiencia del 30% al 35% (Rehman, Alhems, Alam, Wang, & Toor, 2023).

Sin embargo, la energía cinética del aire se ve perjudicada por muchos factores que contribuyen a la aleatoriedad, la volatilidad y la naturaleza intermitente de la generación de energía eólica y dificultan la predicción de la energía eólica (Zhao, Sun, & Wang, 2022) dichos factores plantean problemas para la extracción eficiente de energía eólica y los sistemas de conversión, lo que requiere esfuerzos de investigación adicionales. Por esto último, se han explorado innovaciones con el fin de aprovechar la máxima energía eólica disponible (Tan, Wei, Sobhan, Minhada, & Ali, 2022).

Sin duda, la energía eólica también es una gran fuente de energía renovable que se sigue investigando e innovando, razón por la cual muchos países también han comenzado a utilizar, pero al igual que en la energía solar, depende de las condiciones ambientales en las que se presente la energía del viento como la velocidad y el tiempo que se presenta para la generación de energía eléctrica de manera limpia, además de una gran extensión de terreno para su instalación, en el caso de generadores gran tamaño.

2.3 Fuentes renovables de vibraciones mecánicas

Las fuentes mecánicas brindan una alternativa prometedora para recolectar energía donde las

vibraciones en algunas situaciones pueden ser muy grandes, como en el caso de las vibraciones de estructuras civiles como edificios altos, vías férreas, olas del océano e incluso movimientos humanos, y pueden brindar una mejor potencia de salida (Sil, Mukherjee, & Biswas, 2017).

Las fuentes para la conversión de energía de vibración en energía eléctrica incluyen campos electrostáticos, magnéticos o tensión en un material piezoeléctrico (Sil, Mukherjee, & Biswas, 2017), incluso se puede utilizar la energía de la vibración para reducir el ruido en el entorno, lo que ocurre principalmente en las industrias o debido a los aviones, entre otros, mediante la amortiguación y el aislamiento de las vibraciones (Kalyani, Dudy, & Pareek, 2015).

La idea es que una parte mecánica se mueve en respuesta a una excitación mecánica externa, un elemento de transducción transforma la energía mecánica en energía eléctrica y, finalmente, un circuito de almacenamiento para almacena esta energía para su posterior uso (Giusa, y otros, 2013). En investigaciones y estudios sobre el uso de este tipo de energías, se diseñó un recolector de vibraciones que es capaz de operar en estructuras de diferentes puentes y en sus múltiples ubicaciones, sin la necesidad de modificaciones o ajustes para el funcionamiento y la instalación, con el objetivo de energizar sensores inalámbricos usados para monitorear la salud de las estructuras de los puentes. (Galchev, McCullagh, Peterson, & Najafi, 2011). Este recolector puede apreciarse mejor en la **Figura 1**, la cual muestra sus componentes internos para su funcionamiento.

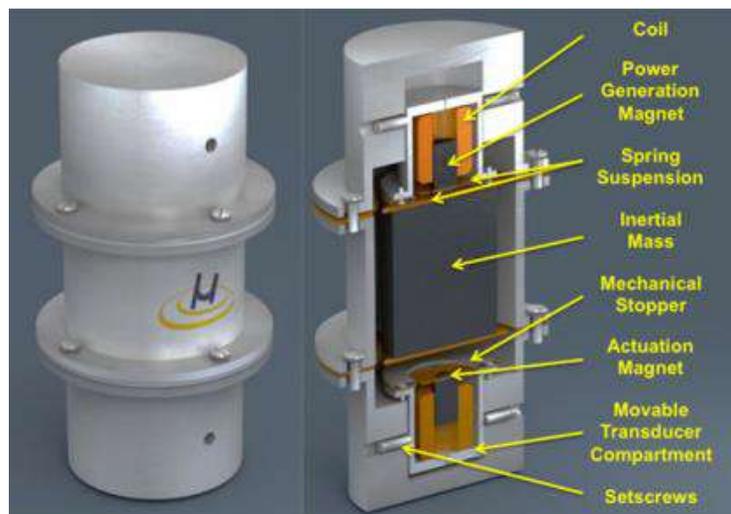


Figura 1 Estructura interna de un recolector para captar vibraciones en estructuras de puentes. Fuente: Harvesting traffic-induced vibrations for structural health monitoring of bridges (p. 4) (Galchev, McCullagh, Peterson, & Najafi, 2011)

Otro diseño para captar vibraciones mecánicas es un recolector rotacional electromagnético construido con el rotor desplumado en voladizo que genera una alta potencia de salida de 4 mW

bajo una vibración armónica a 8,6 Hz (Fan, y otros, 2021). El funcionamiento de este recolector se puede observar en la **Figura 2**, en donde la viga en voladizo, al estar sujeta a vibraciones mecánicas, genera un movimiento en el rotor.

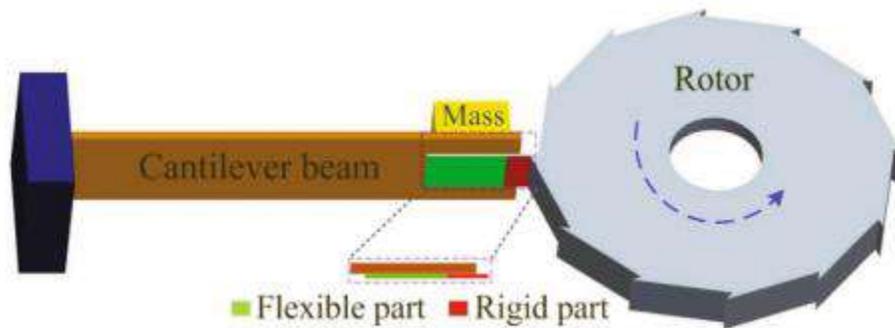


Figura 2 Esquema estructural de un recolector con una viga en voladizo. Fuente: A cantilever-plucked and vibration-driven rotational energy harvester with high electric outputs (p.3) (Fan, Liu, Wei, Zhang, Zhang, Tao, 2021)

Los estudios sobre la recolección de energía vibratoria se han centrado en maximizar la recolección de energía vibratoria como la energía electromagnética, piezoeléctrica o triboeléctrica. La ampliación de respuesta de los recolectores de energía vibratoria es siempre el enfoque más básico para mejorar la eficiencia de la recolección de energía (Du, Deng, Li, & Wen, 2020). Las vibraciones mecánicas son una opción prometedora que en su mayoría son desperdiciadas en el entorno ambiental y que pueden ser transformadas en electricidad a través de varios mecanismos de transducción, como el efecto piezoeléctrico, la inducción electrostática, el efecto triboeléctrico y la inducción electromagnética (Fan, y otros, 2021).

Muchas investigaciones, estudios y diseños se han realizado con respecto a cómo generar energía eléctrica por medio de vibraciones mecánicas, esto con el fin de crear más alternativas de generación de energía limpia, ya que las vibraciones se encuentran prácticamente en todo el mundo y esto puede ser aprovechado por muchos países que no presenten condiciones favorables para generar energía limpia con otras fuentes renovables.

2.3.1 Recolectores energéticos en el transporte

El interés por recolectar energía de sistemas mecánicos va en aumento. En la literatura se han propuesto, analizado y diseñado diferentes dispositivos de recolección de energía (Mapelli, Sabbioni, & Tarsitano, 2011), como el caso de la energía de vibración de un automóvil que se

origina al conducir por una carretera irregular y la aceleración/desaceleración del automóvil, la cual se disipa mediante sus amortiguadores, por lo que la energía de vibración es desperdiciada (Fathabadi, 2019) es por esto, por lo que, para reducir el coste energético de los vehículos, la energía desperdiciada en los amortiguadores ha sido investigada y caracterizada en varios estudios (Zhang, y otros, 2016) con el fin de que el módulo de almacenamiento energético almacene la energía regenerativa del amortiguador en un supercondensador, que se aplica al vehículo eléctrico (VE) para mejorar el kilometraje de recorrido (Zhang, y otros, 2016). También, se ha investigado la utilidad de sistemas de recuperación de energía en el campo del transporte, como las energías térmica, cinética, vibratoria y radiación solar (Li, y otros, 2021).

A nivel de investigación y estudio, Yang, y otros, analizaron que la vibración aleatoria del sistema de vía férrea causada por la carga dinámica de las ruedas del vehículo es una fuente de energía renovable, lo que la hace factible para dispositivos autoalimentados como el sensor de monitoreo y la luz de seguridad (2020), por lo que la energía de vibración generada por la interacción entre el vehículo y la vía está siempre presente y no se ve afectada por el clima ambiental por lo que es una tecnología prometedora en la industria ferroviaria (Yang, y otros, 2020). De hecho, la energía está contenida en los movimientos verticales de las vías del tren provocados por el paso de trenes que transportan carga o pasajeros. Debido a que las vías son largas y las vibraciones son extensas, la recolección de energía de las vibraciones de las vías del tren tiene el potencial de proporcionar una fuente de alimentación de respaldo o sustituto (Zhang, y otros, 2017). En la **Figura 3** se puede apreciar cómo está constituido, principalmente, un recolector energético aplicado en una vía férrea que funciona mediante las vibraciones provocadas por un vehículo, utilizando principalmente piezoeléctricos para su generación de energía eléctrica.

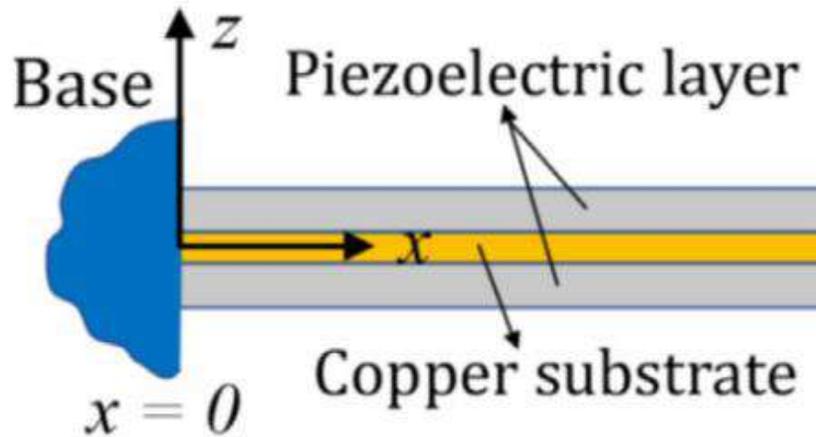


Figura 3 Esquema de un recolector energético utilizando piezoeléctricos. Fuente: *Efficient piezoelectric harvester for random broadband vibration of rail* (p. 3) (Yang, Gao, Wang, Zuo, Dai, Cong, 2020).

El transporte es un recurso vital para el ser humano, y que, al igual que los edificios, maquinaria, entre otros, presentan vibraciones mecánicas que afectan al vehículo, por lo que se pueden implementar e investigar múltiples maneras para generar energía eléctrica limpia que ayude en autonomía (en caso de vehículos eléctricos), sensores de monitoreo u otras funciones a partir de dichas vibraciones.

2.3.2 Recolectores energéticos de pavimento vial

Dado que muchos países desarrollados cuentan con una gran cantidad de vehículos, es posible transformar la energía mecánica generada por la interacción del vehículo sobre el pavimento en energía eléctrica (Wang, Xiao, & Zhao, 2021) esto se debe a que las carreteras no solo soportan cargas de vehículos, sino que también contienen cantidades considerables de calor y energía mecánica (Cao, Sha, Liu, Li, & Jiang, 2021). A medida que los vehículos circulan por las carreteras, el pavimento es golpeado y rodado de manera continua, generando cantidades considerables de energía mecánica (Cao, Sha, Liu, Li, & Jiang, 2021).

Gran parte de la energía liberada por los vehículos va hacia el pavimento de la carretera. Aproximadamente de entre el 15% al 21% de la energía se transfiere a las ruedas del vehículo (Duarte, Ferreira, & Fael, 2017) es por esto, por lo que es posible extraer energía que, utilizando tecnologías específicas se puede transformar en energía eléctrica (Duarte, Ferreira, & Fael, 2017). Con respecto a esto, en los últimos años se han desarrollado un número considerable de dispositivos utilizando sistemas piezoeléctricos, electromecánicos e hidráulicos, la mayoría han

sido validados en el entorno de laboratorio, pero ninguno ha obtenido validación en un entorno real con tráfico regular que acciona el sistema durante un tiempo considerable (Duarte, Ferreira, & Fael, 2017).

Algunos recolectores energéticos de pavimento vial (REPV) investigados son los transductores piezoeléctricos que acoplan directamente el material piezoeléctrico a la deformación y tensión causadas por las cargas de tráfico. La energía de salida de estos cosechadores depende de la eficiencia de conversión electromecánica y la fuerza de compresión o tensión (Wang, Xiao, & Zhao, 2021) y para comprender mejor la estructura y funcionamiento de este tipo de recolector, la **Figura 4** muestra un esquema de la capa del suelo en donde se encontrarían los piezoeléctricos colocados a una misma distancia unos con otros.

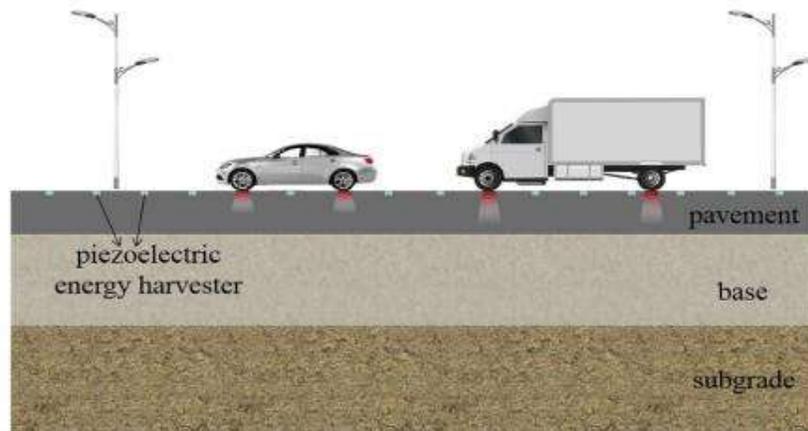


Figura 4: Esquema de pavimento piezoeléctrico. Fuente: Energy output of piezoelectric transducers and pavements under simulated traffic load (p. 2) (Cao, Sha, Liu, Li, Jiang, 2021)

En cuanto más profundo está incrustado el transductor piezoeléctrico, más lejos está de la fuente de excitación y más débil es su salida de energía eléctrica (Cao, Sha, Liu, Li, & Jiang, 2021). Cabe mencionar que, las propiedades mecánicas del pavimento son los fundamentos para seleccionar y diseñar sistemas piezoeléctricos. La estructura del pavimento incluye la subrasante, la subbase, la base y la capa superficial de abajo hacia arriba; cada capa estructural tiene un ancho, un módulo y una relación de Poisson específicos (Wang, Xiao, & Zhao, 2021) y por medio de la **Figura 5** se puede apreciar la profundidad en la cual se encuentran dichas capas.

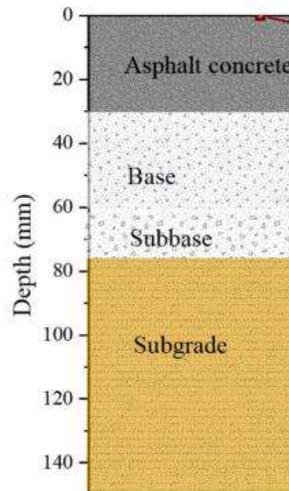


Figura 5 Estructura del pavimento Fuente: *Thermoelectric, piezoelectric and photovoltaic harvesting technologies for pavement engineering* (p.3) (Wang, Xiao, Zhao, 2021).

Sin embargo, un proceso similar se puede implementar en los REPV almacenando la energía mecánica recolectada de las ruedas del vehículo y transmitida por un sistema mecánico o hidráulico, entregándola en modo continuo al generador eléctrico del dispositivo, aumentando su eficiencia (Sun, Wang, Zheng, Luo, & Zhang, 2021). Uno de este tipo de recolector se puede observar en la **Figura 6** en donde se muestra un mecanismo que simplemente convierte un movimiento lineal en uno rotacional por medio de una cremallera y un engrane.

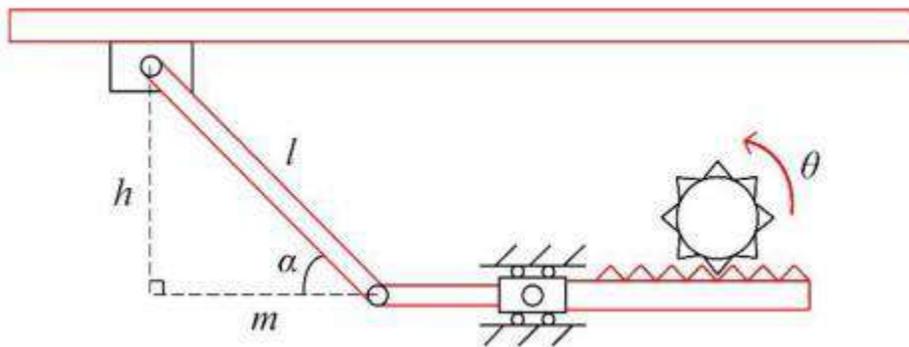


Figura 6 Modelo cinemático simplificado del mecanismo espacial en forma de doble V. Fuente: *A novel road energy harvesting system based on a spatial double V-shaped mechanism for near-zero-energy toll stations on expressways* (p. 5) (Sun, Wang, Zheng, Luo, Zhang, 2021)

Si bien existen investigaciones y diseños de algunos REPV, la realidad es que no son puestos a prueba en el entorno para el cual fueron diseñados. Algunas de las posibles causas son la dificultad para instalarlos, el costo total o los bajos resultados de generación de energía, provocando una baja rentabilidad. Aunque con avances tecnológicos e innovaciones, esta realidad puede cambiar.

III. Fundamentación teórica

3.1 Mecanismo de cuatro barras

Para comprender el funcionamiento de una máquina, es importante desglosar y definir sus componentes, los cuales son:

Cadena cinemática: se refiere a un ensamble de eslabones y articulaciones interconectados con la finalidad de que produzcan un movimiento controlado en respuesta a una fuerza o energía aplicada (Norton, 2009).

Mecanismo: se refiere a una cadena cinemática en donde, por lo menos, un eslabón queda fijado o sujetado al marco de donde se realizarán los movimientos (Norton, 2009).

Por lo tanto, una máquina puede definirse como: un acomodo o arreglo de cuerpos rígidos ensamblados de tal manera que las fuerzas mecánicas realicen un cierto trabajo acompañadas por movimientos establecidos o determinados (Norton, 2009).

Los eslabones que conforman un mecanismo se definen como:

- Manivela: eslabón que realiza una revolución completa y está acoplado a la bancada.
- Balancín: eslabón que tiene rotación oscilatoria y está acoplado a la bancada.
- Acoplador: eslabón que tiene movimiento complejo y no está acoplado a la bancada.
- Bancada: cualquier eslabón o eslabones que están inmóviles con respecto al marco de referencia.

La menor cantidad de partes mecánicas que puedan realizar un trabajo establecido o determinado en general será la solución más confiable. Por lo tanto, el mecanismo de cuatro barras deberá estar entre las primeras opciones como posibles soluciones a problemas de control de movimiento. Para esto, la condición de Grashof predice el comportamiento de rotación de las inversiones de un mecanismo de cuatro barras basado únicamente en las longitudes de los eslabones (Norton, 2009).

Siendo entonces:

S = longitud del eslabón más corto

L = longitud del eslabón más largo

P = longitud de un eslabón restante

Q = longitud de otro eslabón restante

Para el caso de estudio, la condición es la siguiente:

$$S + L \leq P + Q$$

Bajo la anterior condición, el mecanismo es de Grashof y por lo menos uno de los eslabones

acoplados será capaz de realizar una revolución completa con respecto al plano de bancada. Esta cadena cinemática se le denomina clase I, en donde si cualquier eslabón adyacente se fija al más corto, se obtiene un mecanismo denominado manivela-balancín, donde el eslabón más corto girará por completo y el otro eslabón oscilará acoplado a la bancada (Norton, 2009). La definición anterior se puede comprender mejor por medio de la **Figura 7**, la cual muestra dos diagramas de comportamiento para los mecanismos manivela-balancín, en donde el círculo dibujado con línea punteada es la trayectoria marcada por el eslabón manivela y el arco punteado es la trayectoria marcada por el eslabón balancín.

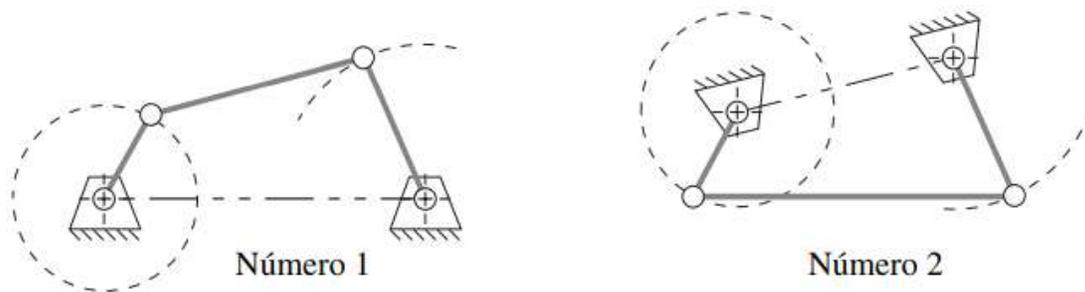


Figura 7 Dos inversiones no distintas de manivela-balancín (Norton, 2009)

3.2 Resortes de torsión

Estos elementos mecánicos permiten la aplicación controlada de una fuerza o de un par de torsión; así como el almacenamiento y la liberación de energía mecánica que pueden representar otros posibles propósitos. La flexibilidad del resorte permite una deformación temporal para el acceso y la restauración de la función (Budynas & Nisbett, 2012).

Se le llama resorte de torsión cuando un resorte con espiras helicoidales se somete a torsión en los extremos. Hay diferentes tipos de resortes de torsión con extremos configurados para aplicar torsión de manera conveniente al cuerpo de espiras, con gancho corto, de torsión directa y con extremos especiales. Los extremos tienen la finalidad de conectar una fuerza a una cierta distancia respecto al eje de las espiras, con el objetivo de aplicar un par de torsión (Budynas & Nisbett, 2012). Las características de los resortes anterior expuestos se muestran en la **Figura 8** en donde se puede observar algunas configuraciones y arreglos que tienen para cumplir con algún trabajo en específico.

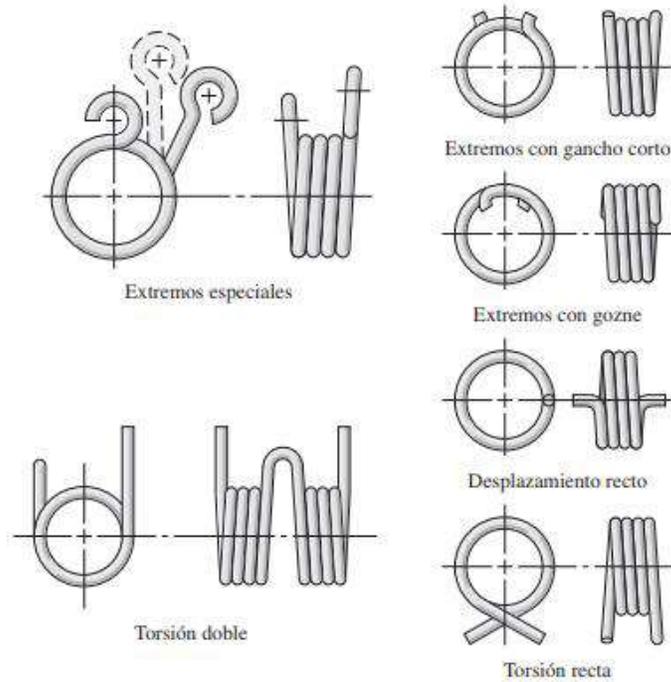


Figura 8 Resortes de torsión (Budynas & Nisbett, 2012)

3.3 Engranés rectos

En estos elementos mecánicos, las fuerzas que son transmitidas entre engranes acoplados, suministran momentos torsionales a los ejes para la transmisión de movimiento y de potencia, además de crear fuerzas y momentos torsionales que afectan al eje (Budynas & Nisbett, 2012). Los engranes rectos tienen dientes paralelos al eje de rotación y son utilizados para la transmisión de movimientos de un eje a otro eje paralelo. De todos los tipos de engranes, el engrane recto es el más sencillo, razón por la cual, son utilizados para desarrollar las relaciones cinemáticas (Budynas & Nisbett, 2012). En la **Figura 9** se muestran todos los elementos y partes más importantes de un engrane recto.

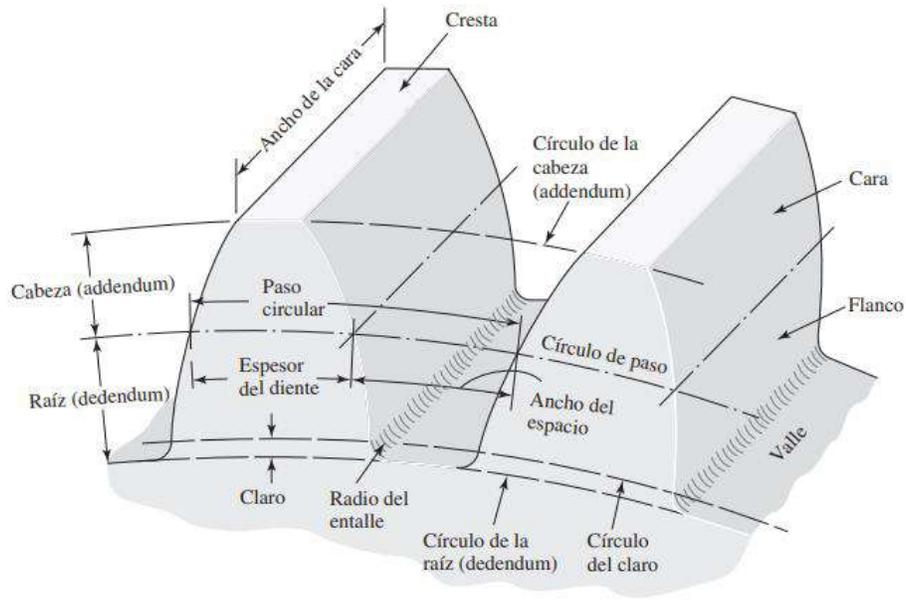


Figura 9 Nomenclatura de los dientes de engranes rectos (Budynas & Nisbett, 2012)

3.4 Volante de inercia

El momento de inercia indica tanto la capacidad de un cuerpo para almacenar energía cinética rotacional, como el par de torsión que se requerirá para acelerar el cuerpo de forma rotacional (Norton, 2009). Se le llama volante al elemento mecánico que es capaz de almacenar energía cinética rotacional. (Norton, 2009). Para entender un poco mejor este elemento, la **Figura 10** muestra un volante en forma de disco en un ensamble de un volante en un eje motriz. En donde la inercia para un cuerpo cilíndrico se da a partir de la siguiente ecuación:

$$I = \frac{1}{2} mr^2 \quad (\text{Ec.1})$$

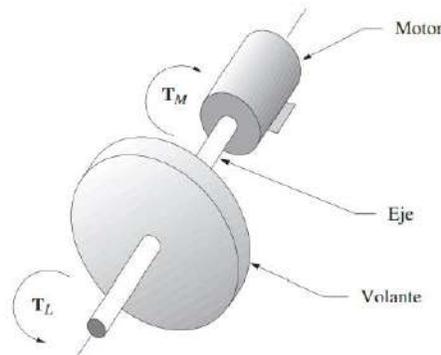
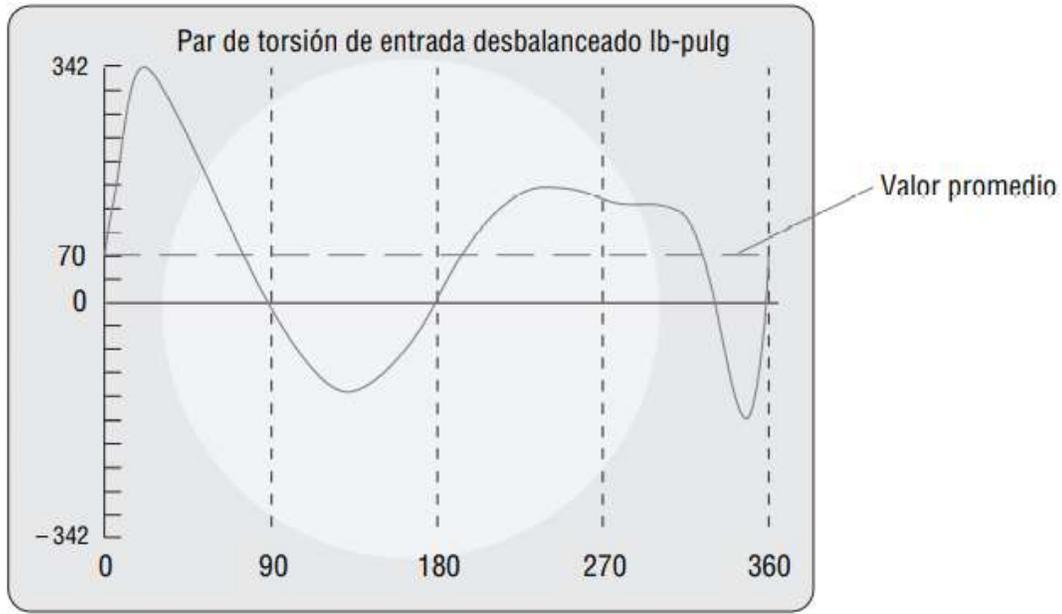


Figura 10 Volante en un eje motriz (Norton, 2009)

En el caso de un motor, este suministra un par de torsión que sería deseable que se mantuviera de

manera constante el mayor tiempo posible. La fuerza de un mecanismo suministrada, del otro lado del volante, demanda un par de torsión que varía con el tiempo (Norton, 2009). La **Gráfica 1** detalla el desbalance del par de torsión de entrada en un mecanismo de cuatro barras y el valor promedio del par de torsión que se desea mantener.



Gráfica 1 Curva de par de torsión de entrada para un mecanismo de cuatro barras de manivela-balancín desbalanceado (Norton, 2009)

3.5 Fundamentos de fuerza, esfuerzo y momento de inercia

La unidad de fuerza, conocida como Newton (N), se establece mediante la segunda ley de Newton. Su ecuación para determinarla se define de la siguiente manera: (Budynas & Nisbett, 2012):

$$F = ma = \frac{kg \cdot m}{s^2} = N \quad (\text{Ec.2})$$

La fuerza ejercida por la gravedad sobre un objeto se le denomina peso, y se obtiene mediante el producto de la gravedad por la masa del objeto. El peso se designa como W y la aceleración como g, entonces, el peso se obtiene mediante la siguiente ecuación (Budynas & Nisbett, 2012):

$$W = mg \quad (\text{Ec.3})$$

Para esta investigación, se adopta el supuesto de un esfuerzo en distribución uniforme y a esto se le conoce como tensión pura, compresión pura o cortante puro, dependiendo de cómo se aplique la carga externa al cuerpo. Algunas veces se emplea la palabra “simple” para indicar que no hay

otros efectos que afectan al estado. Es por eso, por lo que se dice que el esfuerzo está uniformemente distribuido y se calcula mediante la siguiente ecuación en donde las unidades se denominan Pascales (Budynas & Nisbett, 2012):

$$\sigma = \frac{F}{A} = Pa \quad (\text{Ec.4})$$

Cualquier momento que sea colineal con un eje de un elemento mecánico se llama par de torsión, porque el momento provoca que el elemento mecánico se tuerza respecto a ese eje, en donde el efecto de la fuerza sobre el elemento rígido depende de la distancia de su punto de aplicación r. Para obtener el valor de un par de torsión, que también es conocido como torque, se emplea la siguiente ecuación (Beer, Johnston, & Eisenberg, 2007):

$$T = Fr = N.m \quad (\text{Ec.5})$$

Habitualmente es necesario obtener el par de torsión a partir de una consideración de la potencia (H) y la velocidad de un eje en rotación, que también es conocida como velocidad angular (ω) (Budynas & Nisbett, 2012):

$$H = T\omega = Watt \quad (\text{Ec.6})$$

4.9 Fundamentos de potencia eléctrica

La capacidad para realizar un trabajo se le denomina Energía, y la potencia es la razón de cambio a la cual se utiliza dicha energía. Potencia (P) es cierta cantidad de energía (W) utilizada en cierto tiempo (t) y expresada de la siguiente manera (Floyd, 2007):

$$P = \frac{W}{t} \quad (\text{Ec.7})$$

La potencia utilizada en un periodo de tiempo representa el consumo de energía. Si se realiza el producto de la potencia en watts (W) por el tiempo en segundos, se tiene energía en Joules (J), simbolizada mediante W (Floyd, 2007)

$$P = Wt \quad (\text{Ec.8})$$

Se pueden utilizar unidades de energía denominadas watt-segundo (Ws), watt-hora (Wh), y kilowatt-hora (kWh). El recibo de electricidad se cobra con base en la cantidad de energía que se utiliza, no la potencia. Las compañías de electricidad comercian con enormes cantidades de energía, es por eso por lo que la unidad más práctica resulta ser el kilowatt-hora. Para fines prácticos, esto quiere decir que se consume un kilowatt-hora de energía cuando se utilizan mil watts en el lapso de una hora (Floyd, 2007).

3.6 Generador eléctrico

Los generadores tienen un eje que gira por el movimiento de un impulsor primario. Cuando el impulsor primario se dispone a generar movimiento rotacional sobre su eje, existen varios elementos que se utilizan para convertir esta energía mecánica en energía eléctrica. El generador síncrono es un ejemplo de esto, la cual es una máquina que se compone principalmente de dos secciones: una parte inmóvil, llamada estator, y una parte móvil, denominada rotor. La corriente directa se suministra a bobinas de alambre devanadas que se encuentran alrededor del rotor con el fin de crear un campo magnético, que se hace girar mediante la acción del impulsor primario (Hayt, Kemmerly, & Durbin, 2012).

La eficiencia de un generador o un circuito eléctrico es la relación que existe con respecto a la potencia de salida suministrada a una carga con respecto a la potencia de entrada al circuito. Es muy común que la eficiencia se exprese como un porcentaje y se obtiene mediante (Floyd, 2007):

$$Eficiencia = P_{salida}/P_{entrada} \quad (Ec.9)$$

La potencia de salida siempre es menor que la de entrada debido a que una parte de la potencia total se utiliza para la operación de los circuitos y componentes eléctricos, y dicha potencia se disipa en forma de calor. A esta pérdida o disipación de potencia interna se le llama pérdida de potencia (Floyd, 2007).

$$P_{salida} = P_{entrada} - P_{pérdida} \quad (Ec.10)$$

Existen diversos generadores eléctricos, y en la **Figura 11** se puede apreciar un tipo de generador eléctrico de corriente directa sin escobillas en su interior.

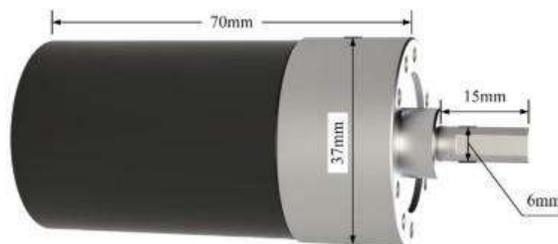


Figura 11 Motor DC sin escobillas. Fuente: A novel road energy harvesting system based on a spatial double V-shaped mechanism for near-zero-energy toll stations on expressways (p. 6) (Sun, Wang, Zheng, Luo, Zhang, 2021)

3.7 Acumulador eléctrico

Una batería es un tipo de fuente de voltaje debido a que convierte la energía química en energía eléctrica, esta se puede componer de una o más celdas electroquímicas conectadas eléctricamente.

Una de estas celdas electroquímicas está constituida por cuatro componentes básicos: un electrodo positivo y negativo, un electrolito y un separador poroso. Mientras que el electrodo positivo tiene una deficiencia de electrones debido a una reacción química, el electrodo negativo tiene electrones en demasía derivado de una reacción química, el electrolito proporciona un mecanismo que hace que fluya la carga entre los electrodos positivo y negativo, y el separador aísla eléctricamente los electrodos. (Floyd, 2007). El interior de este componente se puede comprender de mejor manera mediante la **Figura 12**.

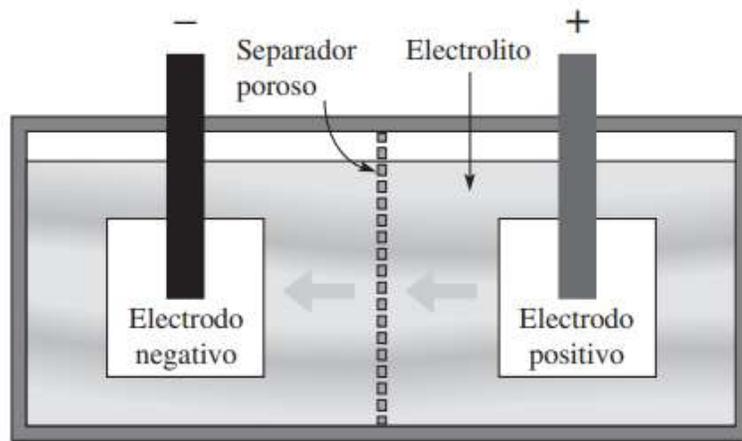


Figura 12 Diagrama de una celda de batería

3.8 Investigación aplicada sobre los Recolectores energéticos de pavimento vial (REPV)

Tomando como base los conceptos y principios anteriores, Duarte, Ferreira & Fael, simularon un sistema de accionamiento mecánico con un sistema de transmisión hidráulica para la generación de energía eléctrica, como se muestra en la **Figura 13**, con una eficiencia de transformación de energía de alrededor del 48.0% al 62.8% y una transmisión de energía máxima de todo el sistema de 1020 joules (2017).

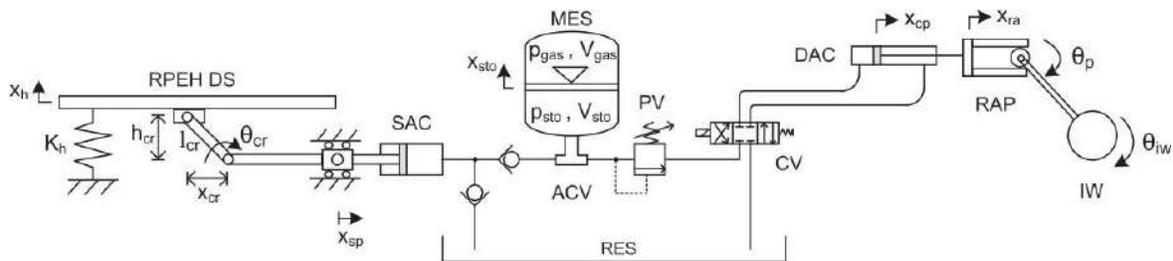


Figura 13 Representación de un dispositivo REPV con un sistema de transmisión hidráulica accionado mecánicamente, utilizando una unidad de almacenamiento de energía mecánica basado en un acumulador

hidráulico cargado con gas. Fuente: *Integration of a mechanical energy storage system in a road pavement energy harvesting hydraulic device with mechanical actuation* (p.11) (Duarte, Ferreira, Fael, 2017)

Otro tipo de REPV fue diseñado por Sun, Wang, Zheng, Luo & Zhang en 2021, el cual emplea únicamente fuerza mecánica (en este caso peso vehicular) para la generación de energía eléctrica. El diseño puede observarse en la **Figura 14** en donde se aprecia una plataforma que al momento de ser accionada genera un movimiento lineal hacia una cremallera, misma que ser acoplado a un elemento dentado crea un movimiento rotacional dirigido hacia dos generadores eléctricos. De acuerdo con sus resultados obtenidos, este REPV mostró una eficiencia del 62.32% y una generación de energía al año aproximada de 219.66 MWh, implementándolo en las casetas de cobro de las principales carreteras de China.

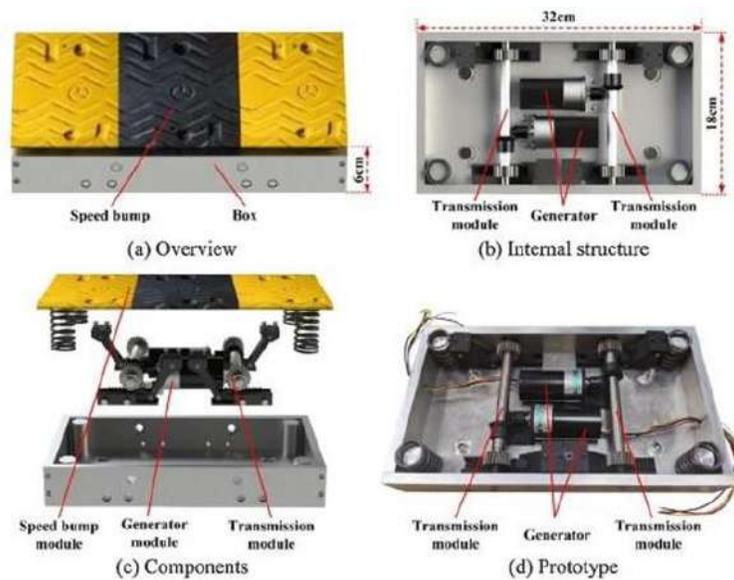


Figura 14 Diseño y prototipo de la propuesta REPV. Fuente: *A novel road energy harvesting system based on a spatial double V-shaped mechanism for near-zero-energy toll stations on expressways*. (p. 4) (Sun, Wang, Zheng, Luo, Zhang, 2021)

Por último, Azam y otros en 2020 diseñaron otro REPV utilizando un sistema de transmisión de poleas y un volante de inercia para la generación energía eléctrica. En la **Figura 15** se puede observar este diseño, en donde la cremallera transporta el movimiento lineal provocado por el peso del vehículo, y por medio de un arreglo de engranajes proporciona movimiento rotacional hacia las poleas, en donde una de ellas está acoplada al generador eléctrico. De acuerdo con sus resultados obtenidos muestra una eficiencia de entre el 57.5% al 65.0%, de conversión bajo diferentes parámetros de frecuencia y desplazamiento del mecanismo, así como una generación de energía máxima de salida de 324 W. (Azam, y otros, 2020).

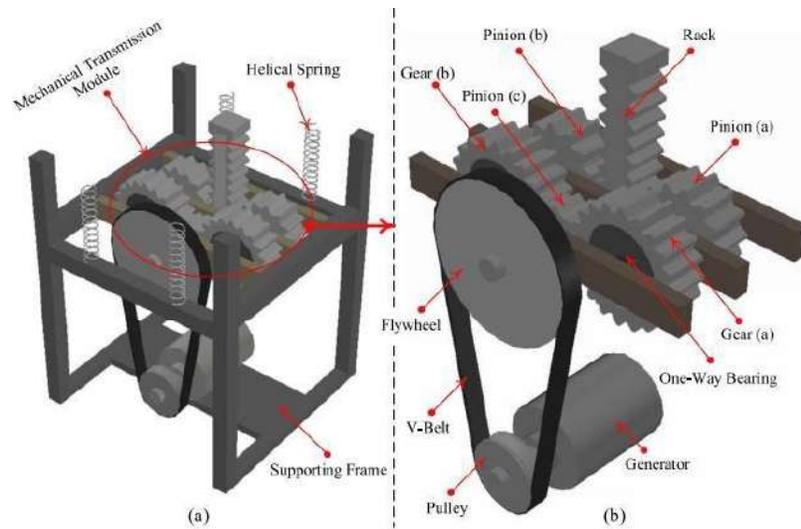


Figura 15 a) Mecanismo de recolector de energía mecánica (REM), b) Movimiento bidireccional de los piñones a y b convertido en la rotación unidireccional del generador. Fuente: Design, fabrication, modelling and analyses of a movable speed bump-based mechanical energy harvester (MEH) for application on road (p.6) (Azam, Ahmed, Hayat, Ali., Khan, Murtaza, Aslam 2020)

IV. Objetivo

4.1 Objetivo general

Rediseñar un REPV que transforme el peso del tránsito vehicular diario en energía eléctrica para ser implementado en la entrada al Centro Universitario por Avenida Hidalgo para brindar otra alternativa de generación energía eléctrica limpia con el fin de no depender de las condiciones climáticas y/o meteorológicas.

4.2 Objetivos particulares

- a) Determinar la cantidad de energía eléctrica que requiere la iluminación interior y exterior de las casetas de seguridad a través de un conteo de dispositivos de iluminación o por medio de alguna normativa con el fin de fijar un objetivo de cantidad de energía eléctrica que necesitará abastecer el REPV.
- b) Cuantificar y clasificar los vehículos que entran a las instalaciones de la Universidad Autónoma de Querétaro Centro Universitario a través de un contador manual para estimar un promedio de tránsito diario y determinar un peso mínimo de funcionamiento y un peso máximo que el REPV debe ser capaz de soportar.
- c) Rediseñar y construir un REPV por medio de un software de modelado en 3D y ensamble mecánico de los elementos requeridos para su funcionamiento.
- d) Validar el funcionamiento del REPV manualmente y en base a un promedio de tráfico vehicular diario poder estimar una cantidad de energía eléctrica que se puede generar.

V. Metodología

5.1 Metodología de diseño

La metodología implementada en este proyecto fusionó las cuatro etapas principales utilizadas en la metodología de Doble Diamante, así como algunas de sus herramientas que existen dentro de esta, como: Mapa de recorrido del usuario, Resumen de diseño, Prototipado y Escenarios, con algunos de los pasos utilizados en la metodología proyectual de Bruno Munari, como: Recolección de datos, Análisis de datos, Validación y Solución. En la **Figura 16** se muestra el diagrama final de la metodología de diseño implementada durante el proyecto.

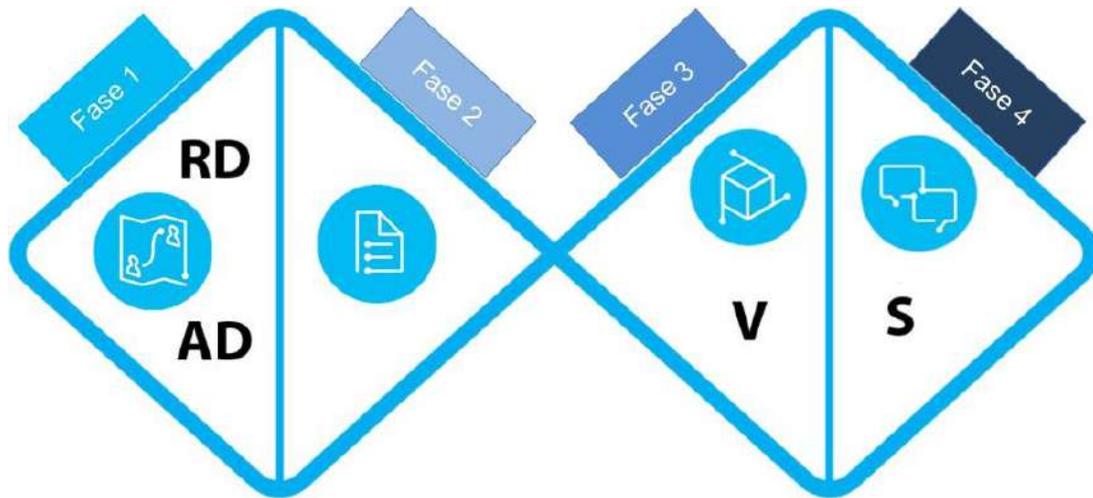


Figura 16 Metodología de diseño utilizada en el proyecto

Fase 1: En esta fase se investigaron patentes de diferentes REPV que contengan algunos de los principios y elementos mostrados en la fundamentación teórica para analizar sus ventajas, desventajas y algunas características, y así poder realizar un rediseño con base en el análisis. Se realizó un diagrama de funcionamiento del REPV a través de la elaboración de Mapa de recorrido del usuario para simular la trayectoria del vehículo sobre el REPV. Por medio del paso de la recolección de datos, se obtuvieron los requerimientos que tendría el REPV y se determinó a través de un conteo de dispositivos de iluminación que utiliza el personal de seguridad durante la jornada laboral con el fin de determinar el objetivo de la cantidad de energía eléctrica que el modelo debe abastecer. Este mismo paso se implementó para realizar un conteo de entrada de vehículos a las instalaciones del Centro Universitario en Avenida Hidalgo, el cual se realizó por medio de contadores manuales y por el mismo investigador, durante un breve lapso de 5 horas por día en diferentes días de la semana, con el fin de estimar un promedio de flujo vehicular diario y poder

clasificarlos según su tipo de carrocería. La revisión sobre las características del reductor de velocidad se llevó a cabo en este paso para conocer sus dimensiones, mismas que ayudarán en el rediseño. Por último, el paso de análisis de datos ayudó a la investigación de los datos de fabricación y/o ficha técnica de los vehículos tomando en cuenta la mayoría de los modelos de los vehículos que circulan durante la jornada estudiantil y laboral para establecer los parámetros de carga y accionamiento mecánico con el propósito de realizar una estimación de peso de cada vehículo y así poder determinar un peso máximo que debe soportar.

Fase 2: En esta fase se recopiló toda la información relevante para el diseño del REPV, y para esto se realizó un resumen de diseño con los requerimientos y restricciones del proyecto, lugar de aplicación e ideas más importantes a considerar en el proyecto. Esta herramienta ayudó a fijar los objetivos y características que debe cumplir el rediseño del REPV.

Fase 3: La etapa de diseño se desarrolló durante esta fase, en donde, primero, se diseñó un diagrama funcional de un mecanismo de cuatro barras manivela-balancín mediante el programa de GeoGebra para visualizar su posible funcionamiento y establecer las medidas de los eslabones, el cual pueda ser accionado mecánicamente a través del peso vehicular y acoplado a una caja de engranajes que pueda multiplicar el giro de la manivela y que esté conectada al rotor del generador eléctrico. Se tomó en cuenta la distancia máxima de desplazamiento vertical que puede llegar a tener el mecanismo tomando como referencia la misma altura del reductor de velocidad previamente construido con el fin de no causar daño a los vehículos que hagan uso de este REPV. Por medio de SolidWorks, se construyó un modelo en 3D para dimensionar y ensamblar los elementos del REPV que tendría en la realidad para su funcionamiento, y también, para poder modificar los elementos que requieran algún cambio o mejora. Se ejecutó un estudio de movimiento por medio de Ansys, el cual ayudó a visualizar el funcionamiento del ensamble final del REPV, así como estudios de análisis de elemento finito para cuantificar los valores de deformación y esfuerzos, y visualizar las zonas en donde se encuentran dichos valores dentro del mecanismo.

Se construyeron y ensamblaron todos los elementos previamente analizados y diseñados de acuerdo con la estructura del prototipo, todo esto con ayuda de herramientas, equipos y personal de la Universidad Autónoma de Querétaro, con el fin de comprobar su funcionamiento previamente analizado.

Para la conversión de la energía mecánica a eléctrica, se utilizó uno de los generadores con los que

contaba previamente la universidad, así como la tablilla electrónica que cuenta en su interior para regular y convertir la energía eléctrica.

Fase 4: Se seleccionó el mejor diseño del REPV que pueda ser instalado cuando finalice la etapa de validación. Esta selección fue evaluada considerando la simplicidad del diseño, número de elementos, funcionalidad y resultados, así como también el presupuesto final que se utilizó para el diseño. Se realizó un estudio de iluminación por medio del DIALux para conocer los niveles de iluminación que tendría la caseta de seguridad al utilizar diferentes elementos de iluminación. Por último, la herramienta Escenarios fue aplicada para conocer todos los escenarios posibles donde el REPV podría ser funcional y obtener resultados significativos y positivos de acuerdo con la cantidad de energía que podría generar.

VI. Resultados

6.1 Establecimiento de requerimientos de diseño

Como parte de la búsqueda de patentes, se realizó una investigación por medio de las páginas de internet de Espacenet y Lens para conocer que diseños se han registrado a nivel mundial y así poder analizar cuáles son las ventajas y desventajas que presentan para poder realizar un rediseño. En la **Tabla 1** se muestran las patentes encontradas que cumplen con algunos de los principios mostrados en la fundamentación teórica, y en los **Anexos 1, 2, 3 y 4** se encuentran los diagramas de diseño de estos REPV con sus componentes.

Tabla 1 Patentes registradas de diferentes REPV

Título de la patente	Fecha de publicación	Aplicante	Ventajas	Desventajas
Transient absorber for power generation system	05/08/2010	KINETIC ENERGY CORP	Mecanismos independientes para cada llanta del vehículo	Sistema de transmisión se encuentra por debajo del pavimento
Bistable vibration highway deceleration strip energy capturer	25/10/2019	UNIV XIAN TECHNOLOGY	Gran carrera del mecanismo para generar mayor movimiento	Sistema de transmisión se encuentra por debajo del pavimento
Kinetic energy collector mechanism to generate electric power form passing vehicles, using a main axle connected to a flywheel	04/21/2016	Díaz Roberto Hugo	Reductor de velocidad con muy baja altura	Sistema de transmisión se encuentra por debajo del pavimento
Devices and systems for generating sustainable energy from traffic	03/05/2016	AL MATTAR MOHAMMED	Sistema pistón-cigüeñal para generar mayor movimiento mecánico	Sistema de transmisión se encuentra por debajo del pavimento

Como se mostró en la tabla anterior, la desventaja que compartían en común estos diseños es que tienen su sistema de transmisión mecánica y eléctrica por debajo del pavimento, algo que puede ser inaccesible para quienes buscan implementarlo debido a las características del pavimento o al

uso de maquinaria y personal para poder implementarlo, lo cual se ve reflejado en un mayor costo económico.

Mediante la herramienta Mapa de recorrido del usuario se pudo idealizar lo que sería la trayectoria que realizar por parte de un vehículo para poder usar el REPV y así generar energía eléctrica, recorrido que puede apreciarse mediante la **Figura 17**, y en donde se mencionan los elementos que participarían durante la generación de energía eléctrica.



Figura 17 Mapa de recorrido del usuario para la generación de energía eléctrica

El uso de la herramienta facilitó a visualizar qué elementos deben aparecer en la trayectoria, así como la condicionante de que debe existir un reductor de velocidad previo para poder aplicar el REPV.

Para la medición del gasto energético en la iluminación de una caseta de seguridad, fue necesario recurrir a lo que se establece en la norma oficial mexicana NOM-025-STPS-2008, en donde se menciona que los niveles mínimos de iluminación (lúmenes) es de 200 y se detalla en la **Tabla 2**, por lo tanto, el REPV debe ser capaz de proveer energía hacia los elementos que puedan generar dichos niveles de iluminación para cumplir con lo que dictamina la norma.

Tabla 2 Niveles de iluminación para una caseta de vigilancia o seguridad

Tarea visual del puesto de trabajo	Área de trabajo	Niveles mínimos de iluminación (lúmenes)
Requerimiento visual simple: inspección visual, recuento de piezas, trabajo en banco y máquina.	Servicios al personal: almacenaje rudo, recepción y despacho, casetas de vigilancia, cuartos de compresores y pailería.	200

Sin embargo, fue necesario acudir a una caseta de seguridad para poder realizar un estudio de iluminación mediante sus dimensiones y condiciones. En la **Figura 18** se muestran las condiciones de alguna de las casetas de seguridad que se encuentran en el Centro Universitario, así como algunos elementos eléctricos.

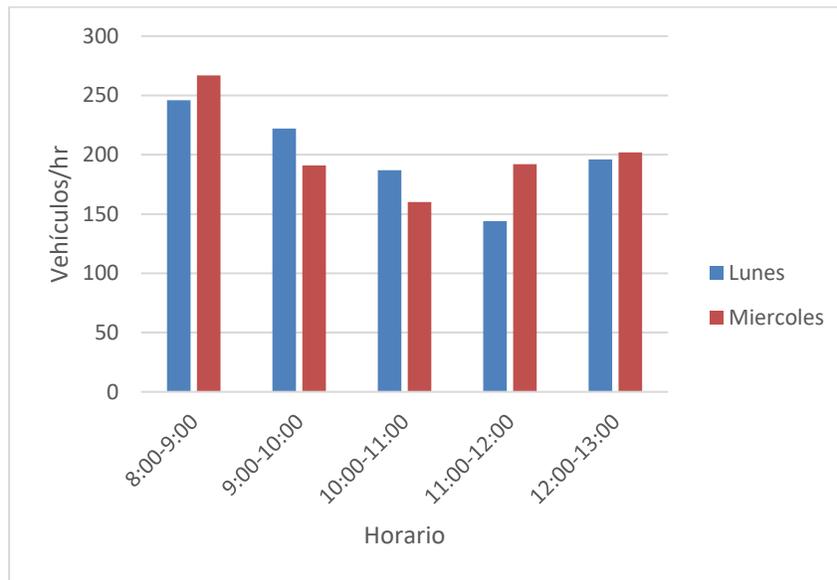


Figura 18 Condiciones y elementos eléctricos de una caseta de seguridad del CU UAQ

Si bien, las casetas de seguridad del Centro Universitario cuentan con lámparas exteriores, es importante que la cantidad de iluminación que emiten esté regida por la norma anterior mencionada, ya que dichas lámparas podrían no estar emitiendo los valores mínimos de

iluminación y se podrían adecuar otras lámparas que puedan cumplir con la norma y que puedan ser encendidas mediante la energía eléctrica generada por el REPV.

Por medio del paso de Recolección de datos, se realizó un conteo vehicular para hacer una estimación del flujo vehicular diario promedio mediante tres contadores manuales, mismos que fueron utilizados para clasificar los vehículos que ingresaban al Centro Universitario por Avenida Hidalgo (pequeños, medianos y grandes). El estudio se realizó durante un lapso de 5 horas a partir de las 8:00 am y finalizando a la 1:00 pm. En la **Gráfica 2** se puede observar la cantidad de flujo vehicular durante la realización del estudio.



Gráfica 2 Conteo de vehículos en la entrada al Centro Universitario por Avenida Hidalgo

En la **Tabla 3** se muestra la cantidad de vehículos en los días de que se realizó el estudio en tres categorías: pequeños, medianos y grandes, y muestra el conteo total.

Tabla 3 Conteo de vehículos total dividido por categorías

Categoría de vehículos	Pequeños	Medianos	Grandes	Total de vehículos
Lunes	325	613	57	995
Miércoles	295	661	57	1012
	620	1274	114	2007

La anterior ayudó a realizar la **Tabla 4**, en la cual se muestran los promedios del tránsito diario

vehicular y el promedio de la cantidad de vehículos que transitan en un lapso de una hora y un minuto.

Tabla 4 Promedios del conteo total de vehículos por día, hora y minuto

Promedio de tránsito vehicular diario	Promedio de vehículos en 1 hora	Promedio de vehículos en 1 minuto
1003.5	200.70	3.35

Tomando como referencia los datos anteriores, puede existir un flujo vehicular diario de aproximadamente de 3,010.5 vehículos solo en la entrada de Avenida Hidalgo hacia el Centro Universitario, considerando una jornada de apertura de 7:00 am y cierre de 10:00 pm, flujo vehicular que puede ser aprovechado para la generación de energía eléctrica mediante un REPV. El proyecto del rediseño de un REPV está enfocado para funcionar principalmente con vehículos ligeros los cuales tienen un peso bruto vehicular menor a 3,857 kilogramos, de acuerdo con lo estipulado en el punto 1.2 de la norma NOM-194-SCFI-2015 para los vehículos ligeros comercializados en México. Sin embargo, es importante conocer cuál es el rango de pesos que tendrá mayor presencia en el REPV para conocer cuáles serán las mayores cargas cíclicas y así conocer un estimado de tiempo de vida útil del sistema. Es importante destacar que el REPV debe ser capaz de soportar cargas mayores a 3,857 kilogramos, debido a que existen casos extraordinarios en los que circulan vehículos pesados dentro del Centro Universitario. En la **Tabla 5** se muestran los pesos vehiculares brutos de algunos vehículos contemplados durante el conteo vehicular.

Tabla 5 Pesos vehiculares de algunos modelos comercializados en México

Modelo vehicular	Peso vehicular bruto (kg)
Renault Kwid	758-786
Nissan Sentra	1325-1387
Honda CRV	1501-1544
Ford F-150	2726-3197

Debido a que el REPV estará sometido a cargas de pesos constantemente, fue importante analizar dichas cargas para poder diseñar una estructura capaz de soportarlas sin sufrir grandes deformaciones o esfuerzos que puedan provocar daños en el REPV.

6.2 Requerimientos de rediseño del REPV

La lista de requerimientos de diseño se muestra en la **Figura 19**, en la cual se detallan las características e ideas más importantes a considerar para el rediseño del REPV.



Figura 19 Requerimientos de diseño para el REPV

Sin embargo, para poder fijar un diseño y cumplir con las especificaciones necesarias que requiere el REPV, fue necesario establecer restricciones de diseño para limitar ciertas características, las cuales se muestran mediante la **Figura 20**.



Figura 20 Restricciones de diseño del REPV

El establecimiento de los requerimientos y restricciones de diseño resultaron importantes para tener en claro qué es lo que se quiere hacer y en base a qué se va a realizar el rediseño, y es importante que dichos requerimientos y restricciones se vean, de cierta manera, reflejados en el diseño final.

6.3 Rediseño del REPV

Para considerar el rediseño del REPV, primero fue necesario realizar una construcción del diagrama de funcionamiento del mecanismo, tomando como referencia el principio del mecanismo de cuatro barras manivela-balancín, esto con la ayuda del software GeoGebra y tomando en consideración las dimensiones del reductor de velocidad, dando como resultado las siguientes dimensiones de eslabones que tendría el mecanismo del REPV:

- Eslabón impulsor (p): 15 cm
- Eslabón acoplador (l): 9 cm
- Eslabón motriz (s): 3 cm
- Eslabón fijo (q): 20 cm

Dichas dimensiones ajustadas en el software ayudaron a obtener algunos parámetros que podría tener el mecanismo, los cuales son:

- Altura máxima: 8.97 cm
- Altura mínima: 2.87 cm
- Ángulo inicial: 31.89°
- Ángulo máximo: 36.71°

- Ángulo mínimo: 10.99°

Sin embargo, el diagrama mostrado en la **Figura 21** pone en evidencia que un elemento se encontraría por debajo del pavimento (el eslabón móvil o manivela), por lo tanto, esto no cumpliría con uno de los requerimientos de diseño.

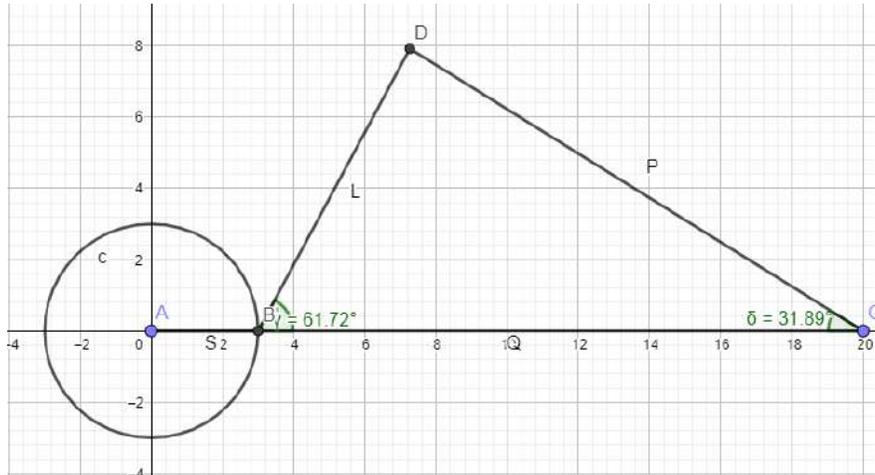


Figura 21 Primer diagrama de funcionamiento del REPV

Para solucionar esta problemática, se realizó una reconstrucción del mecanismo en GeoGebra y en donde se pudieron encontrar los siguientes valores que tendrían los eslabones:

- Eslabón impulsor (p): 20 cm
- Eslabón acoplador (l): 15 cm
- Eslabón motriz (s): 4.5 cm
- Eslabón fijo (q): 30.13 cm

Por lo tanto, se obtuvieron los siguientes parámetros:

- Altura máxima: 16.34 cm
- Altura mínima: 6.29 cm
- Ángulo inicial: 35.41°
- Ángulo máximo: 39.67°
- Ángulo mínimo: 6.45°

Estos parámetros pueden visualizarse de mejor manera mediante la **Figura 22**, en la cual, de manera gráfica, muestra las posiciones críticas de su movimiento.

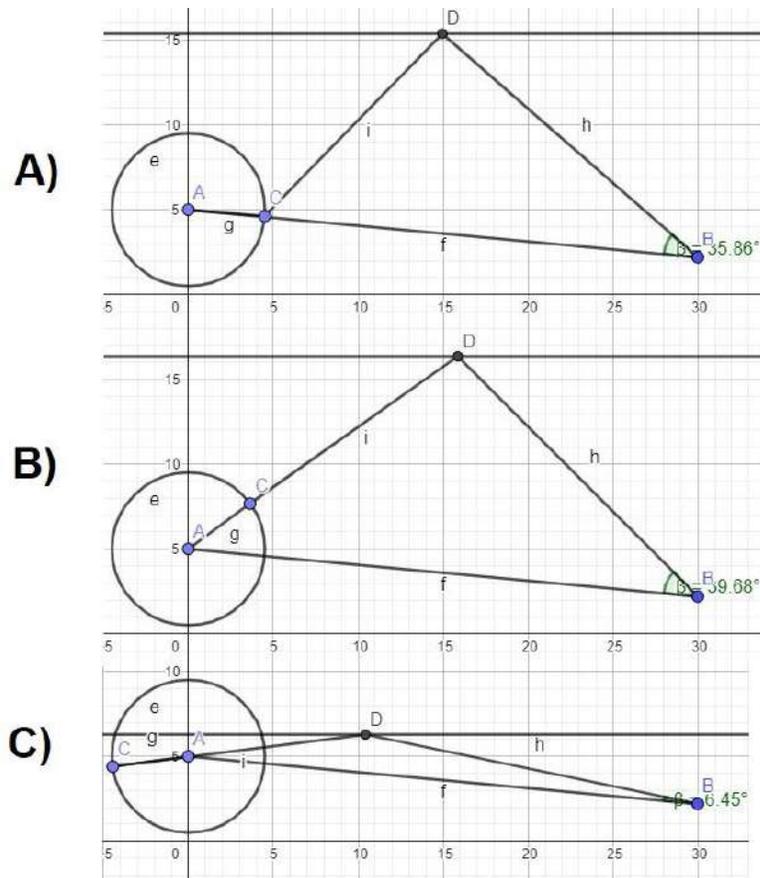


Figura 22 Posiciones de movimiento del mecanismo: A) Posición inicial, B) Posición a altura máxima, C) Posición a altura mínima

El cumplimiento del principio fundamental en 2D fue importante para simplemente trasladar el mismo comportamiento hacia un modelo 3D con elementos que puedan fungir como eslabones.

Tomando como base los parámetros anteriores, la **Figura 23** muestra el diseño de un prototipo A realizado por medio de SolidWorks para simular como se podría ver y qué componentes podría tener en la realidad.

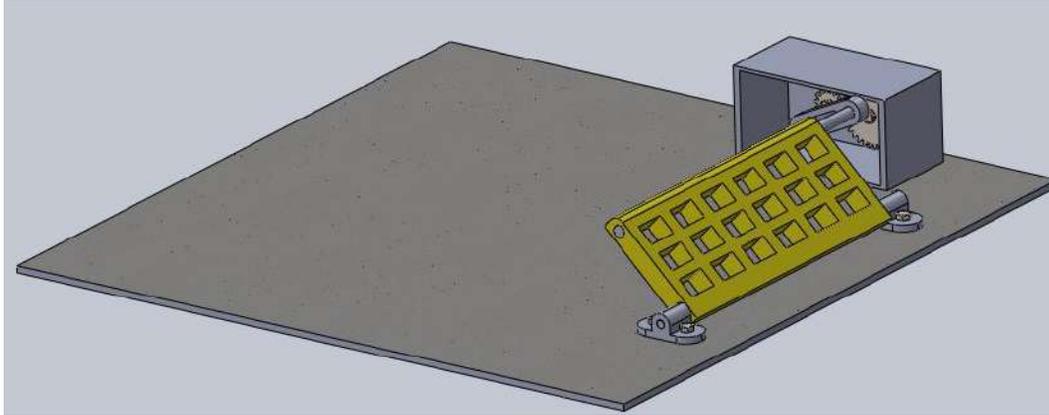


Figura 23 Modelo 3D del prototipo A

Si bien, las dimensiones obtenidas por medio de GeoGebra sobrepasan la altura que tiene el reductor de velocidad, el prototipo A del REPV propuesto cumplía con la simplicidad en cuanto al número de elementos que requiere y su fácil instalación. Sin embargo, se pudo apreciar que las dimensiones del prototipo A al momento de ser modelado en 3D cambiaron con respecto al mecanismo diseñado en 2D, principalmente en la altura que podría tener en su estado de reposo, y sobre todo, en su altura máxima al momento de entrar en movimiento, que sobrepasaba la altura del reductor de velocidad previamente analizado, y por lo tanto, no cumplía con uno de los requerimientos de diseño, por lo que fue necesario ajustar y modificar algunos elementos.

Para solucionar esta última problemática, fue necesario hacer un rediseño del prototipo A, por lo que se optó por conectar al conectar el eslabón impulsor en la barra redonda que sirve como base del “pedal”, de esta manera, al momento de que exista rotación en el “pedal” todos los elementos conectados también generarán un movimiento de acuerdo con sus interacciones con el resto de los elementos. Este rediseño se puede apreciar mejor en la **Figura 24** en donde el prototipo B realizado en SolidWorks soluciona la problemática antes mencionada.

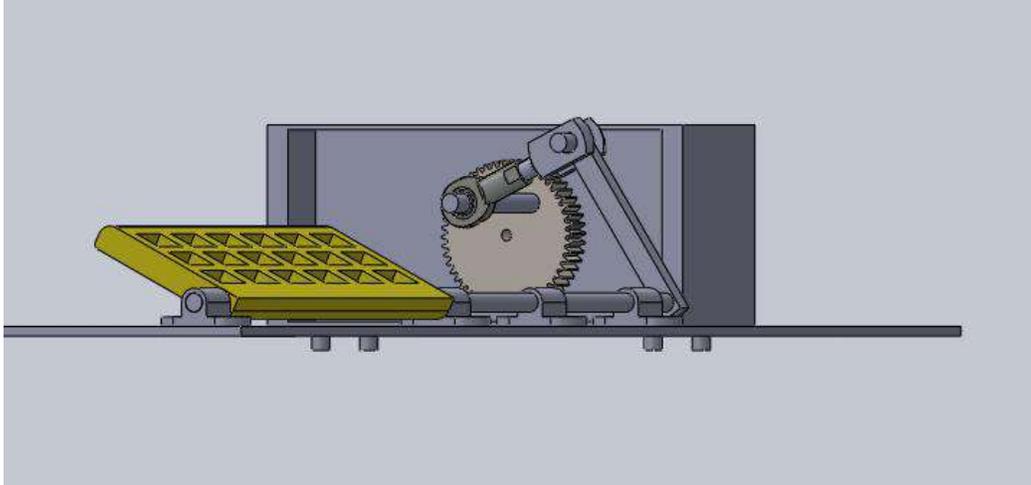


Figura 24 Modelo 3D del rediseño del REPV

El modelo 3D ayudó a visualizar el REPV instalado sobre lo que sería el pavimento, y también ayudó a realizar las mejoras y/o modificaciones pertinentes con el fin de seguir cumpliendo con los requerimientos de diseño establecidos previamente.

Para los estudios de análisis de elemento finito realizados en Ansys, se tomó como referencia el diseño del prototipo B, y para esto, se realizó un estudio de análisis estático estructural considerando únicamente los elementos que sufrirán las mayores deformaciones y la mayor concentración de esfuerzos y que pueden apreciarse en la **Figura 25**, es decir, el eslabón impulsor y sus soportes sujetos al pavimento.

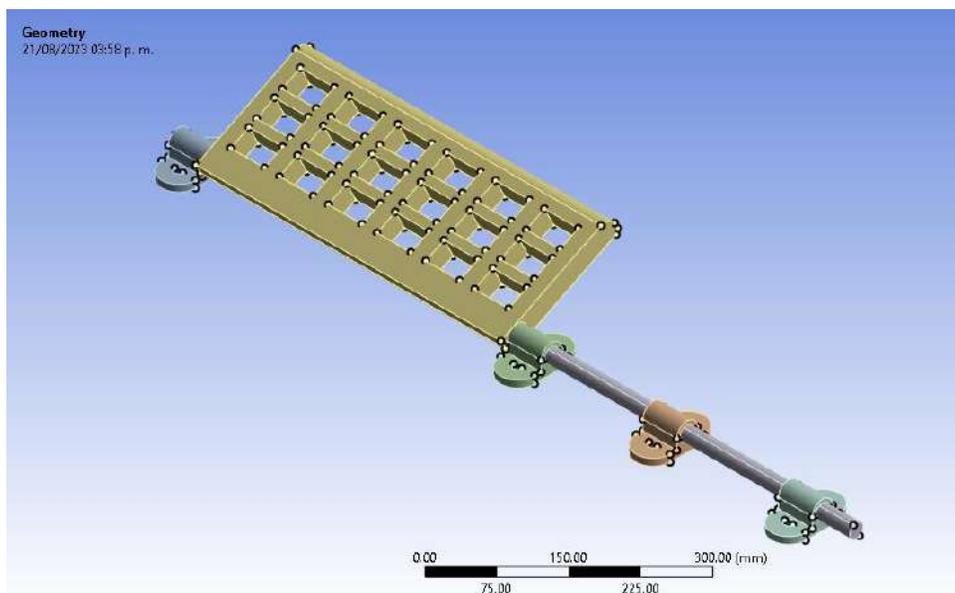


Figura 25 Sección del REPV para el análisis estructural

Para este análisis se consideró un material de acero estructural para todos los elementos y como

carga máxima la mitad del peso máximo que puede soportar un eje en vehículos pesados estipulado en la norma NOM-012-SCT-2017 en la tabla A-1 (**Anexo 5**), considerando vehículos tipo B2 y C1 para caminos tipo ET4, ET2, A4 y A2, es decir 3,250 kilogramos, esto para conocer cuáles serían podrían las deformaciones (deformación total) y esfuerzos (esfuerzo equivalente de Von Mises) que puede sufrir el REPV al momento de entrar en funcionamiento con este tipo de vehículos pesados. En el estudio se aplicó una única carga de 3,250 kg, que sería la carga máxima y que, en teoría, sería la mayor carga de un vehículo por rueda que circularía dentro del Centro Universitario, y bajo este parámetro se abarcaría la deformación y el esfuerzo máximos del REPV.

Los resultados obtenidos pueden visualizarse de manera ilustrativa mediante la **Figura 26**, la cual muestra las zonas de deformación que puede llegar a sufrir con el REPV con las cargas aplicadas, en donde la zona roja es la más crítica y en donde se sufre la mayor deformación debido a los esfuerzos.

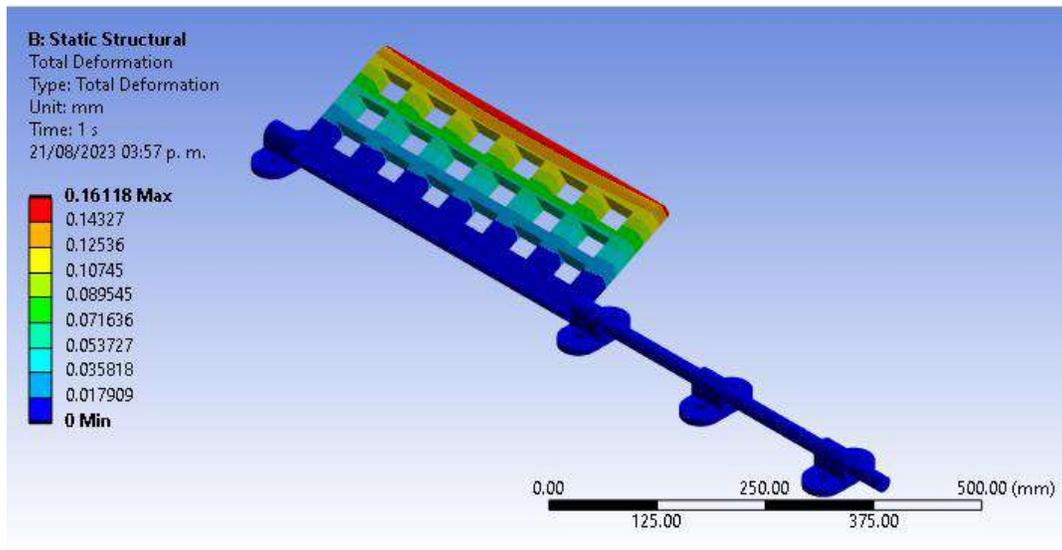


Figura 26 Zonas de deformación del REPV

Mientras que para los resultados de esfuerzos se pueden ver mediante la **Figura 27** la cual muestra las zonas en donde existe mayor concentración de esfuerzos obtenidos y estas son en las zonas más cercanas a las bases del REPV.

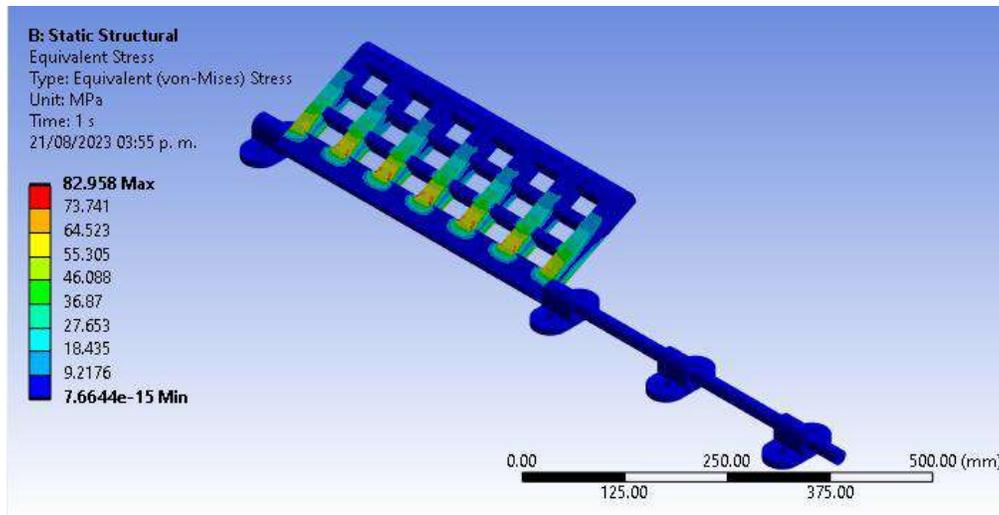


Figura 27 Zonas de concentración de esfuerzos del REPV

De acuerdo con el material aplicado y con los resultados obtenidos en el análisis estructural, el REPV es capaz de soportar las cargas aplicadas, esto debido a que el acero estructural tiene un punto de cedencia a la zona plástica de 250 MPa, valor muy superior al resultado proporcionado en el estudio. Sin embargo, el estudio previamente mostrado se realizó para una estructura totalmente sólida, y por motivos de precios y costos de manufactura, el “pedal” se rediseño con una estructura basada en PTR 1”x1” calibre 10 y por lo que se realizó el mismo estudio bajo las mismas condiciones para conocer sus resultados.

Para estos resultados, las **Figura 28** y **29** muestran de manera ilustrativa las zonas de deformación y esfuerzos, respectivamente, que tendría el nuevo “pedal” bajo la carga máxima que podría aplicarse.

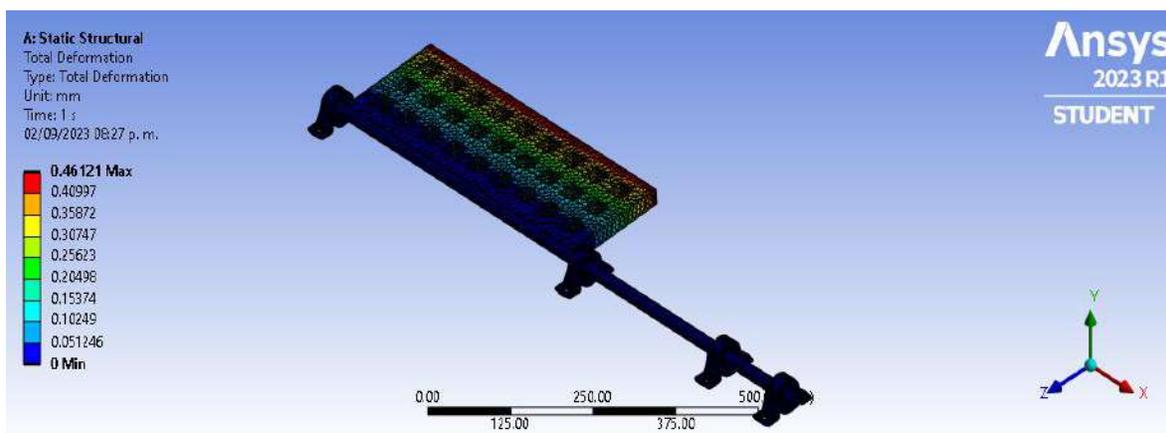


Figura 28 Zonas de deformación del REPV con estructura de PTR

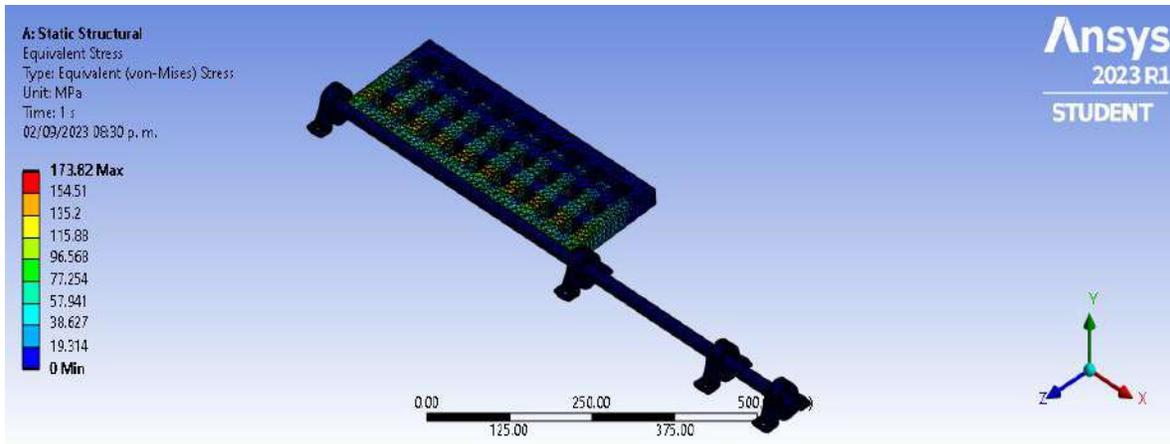
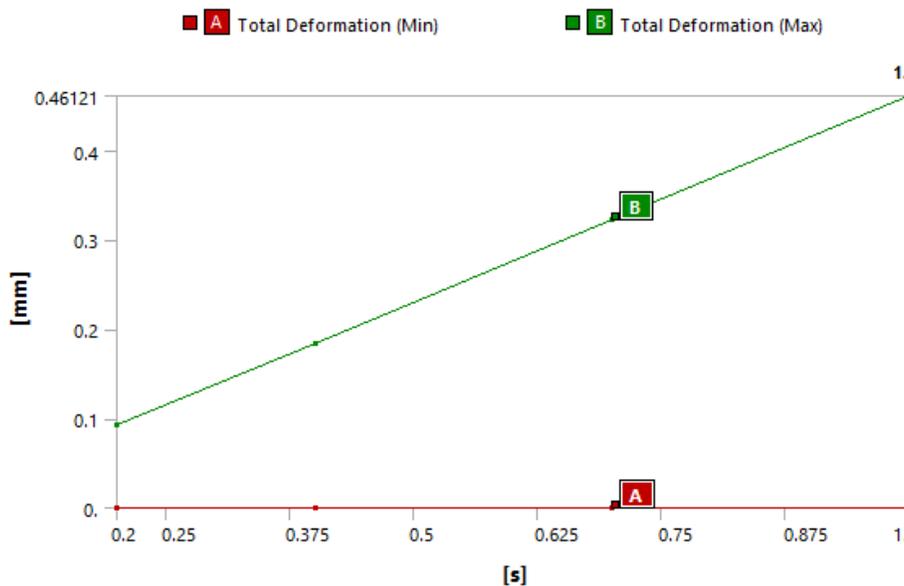


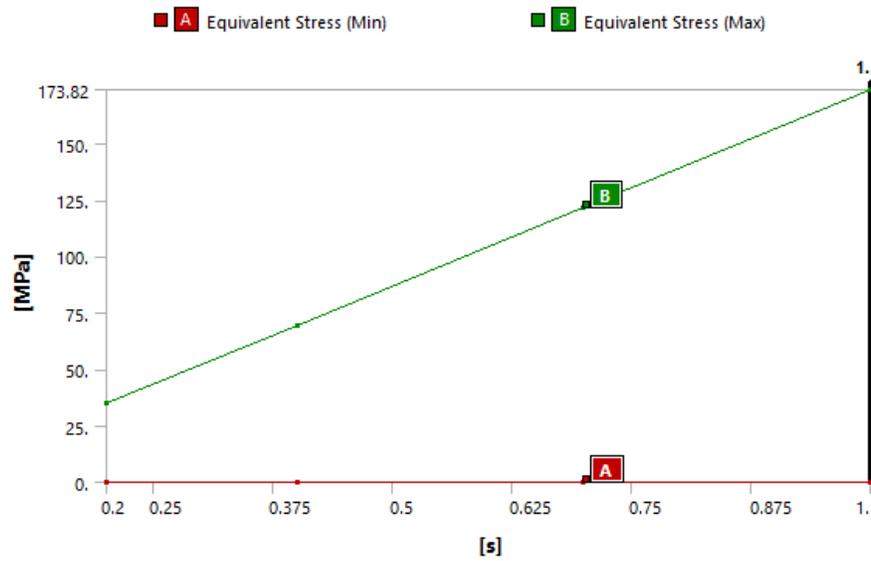
Figura 29 Zonas de concentración de esfuerzos del REPV con estructura de PTR

Para visualizar de mejor manera los resultados, la **Gráfica 3** muestra la deformación máxima de 0.46 mm que tendría el REPV al ser sometido a la carga máxima previamente aplicada en los análisis anteriores.



Gráfica 3 Deformación total del REPV con estructura de PTR

Mientras que la **Gráfica 4** muestra el máximo esfuerzo que existe al aplicar la carga máxima, si bien los esfuerzos aumentaron a comparación del estudio aplicado en el prototipo B, en donde se consideraba una estructura totalmente sólida, el valor máximo de esfuerzo es de 173.82 MPa, aun por debajo de los 250 MPa del punto de cedencia del acero estructural.



Gráfica 4 Esfuerzo equivalente de Von Mises producido sobre el REPV con estructura de PTR

Para el análisis dinámico, se realizó un estudio en dinámicos rígidos para conocer cómo sería el movimiento ideal del mecanismo al momento de ser accionado por el vehículo y obtener los resultados ideales de momento y velocidad angular en la manivela para generar 1 revolución. Para esto, la **Figura 30** muestra los elementos del REPV que se tomaron en cuenta para realizar el estudio dinámico.

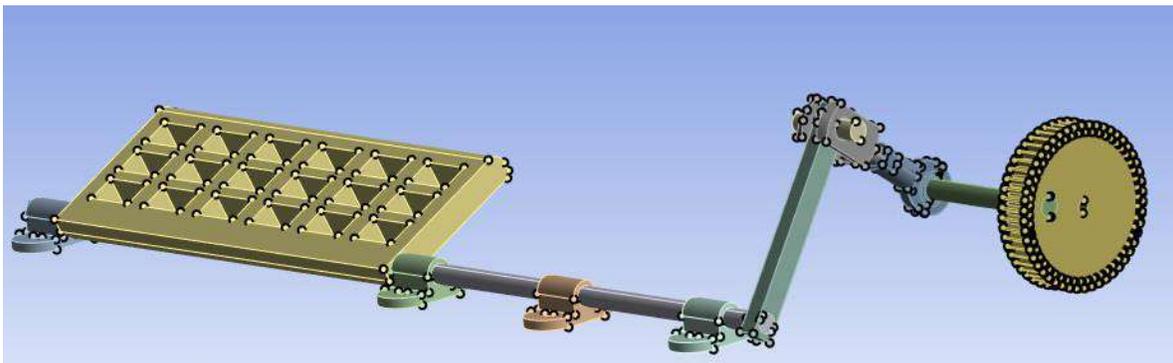


Figura 30 Elementos considerados para el análisis dinámico

Para el movimiento general del REPV, se consideraron varios grados de movimiento para conocer el posible comportamiento que pudiera llegar a tener en la realidad. El resultado dinámico puede ver reflejado mediante la **Figura 31** en donde se pueda apreciar de manera progresiva el giro que tendría el engrane (manivela) aplicando grados 0° , 45° , 90° , 180° y 270° en el estudio.

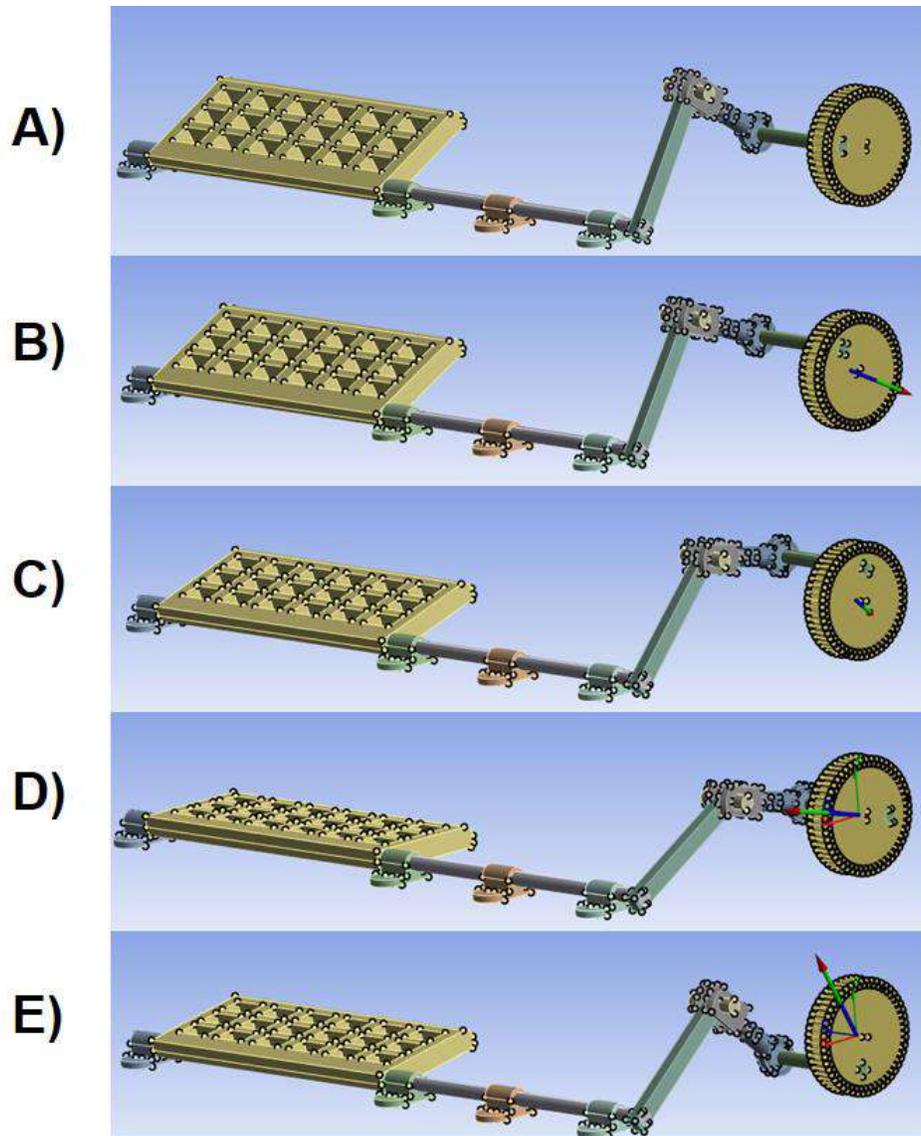
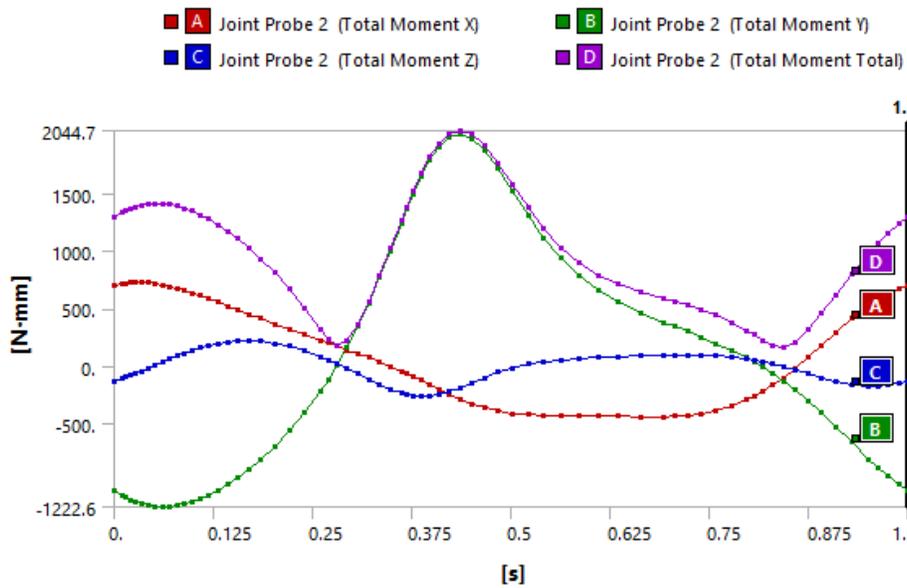


Figura 31 A) Posición del REPV a 0°, B) Posición del REPV a 45°, C) Posición del REPV a 90°, D) Posición del REPV a 180°, E) Posición del REPV a 270°

Los resultados de momento ideal que tendría el engrane cuando genere una revolución se pueden ver mediante la **Gráfica 7**, en donde el mayor momento total generado es de 2044.7 N.mm, lo que es igual a 2.04 N.m.



Gráfica 5 Momento ideal del engrane primario al generar una revolución

La simulación fue una parte fundamental para el proyecto, ya que ayudó a conocer si el material aplicado podría soportar el peso establecido, así como también el funcionamiento ideal del REPV. Como parte del diseño final del REPV, fue necesario aplicar todos los elementos que intervendrán para su construcción y otros posibles elementos necesarios para su instalación, y así, modelar el prototipo C, aunque esto dependa de las condiciones en donde se aplicará y los requerimientos que se soliciten. Para este prototipo, la **Figura 32** muestra los diseños en 3D de los elementos aplicados para el funcionamiento del REPV tomados desde la página de internet de sus fabricantes, mostrando así un diseño ideal que podría funcionar en la realidad.

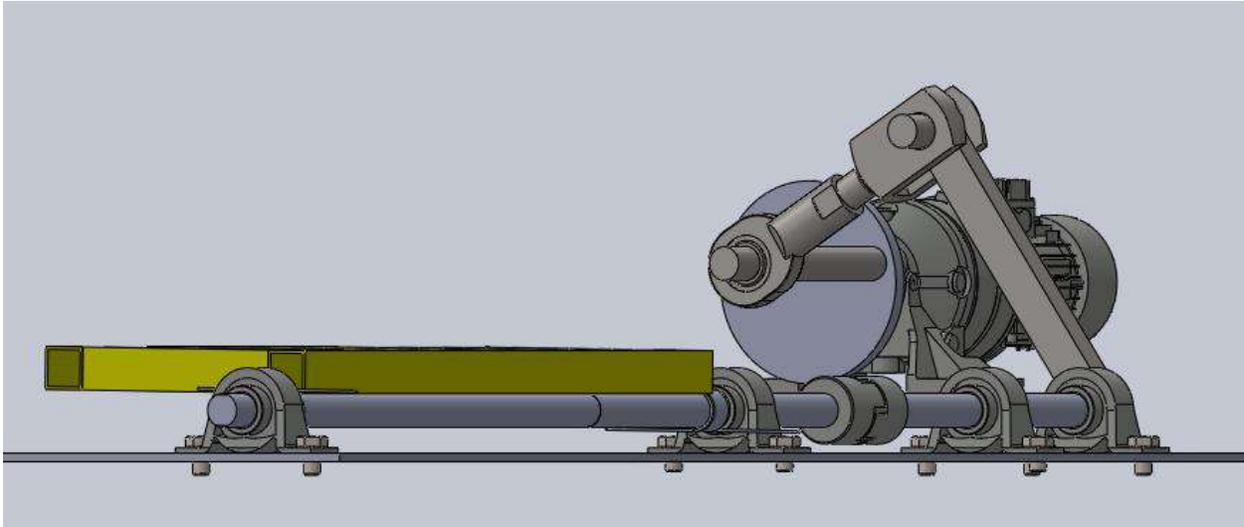


Figura 32 Modelo 3D del prototipo C

La mayoría de los elementos fueron tomados por catálogos de fabricantes de piezas especializadas, mientras que otros fueron diseñados y manufacturados. A continuación, serán desglosados los elementos que conforman el prototipo C del REPV.

6.3.1 Pedal

Este elemento es considerado el más importante, ya que será el que recibirá los mayores esfuerzos provocados por los vehículos al momento de ser accionado y comenzará a provocar movimiento en todo el sistema en general, para esto, la estructura cuenta con una barra redonda de acero de 20 mm de diámetro soldada en uno de sus extremos, la cual rotará conforme el pedal sea accionado y regresando a su estado inicial para provocar que el resto de los elementos tengan movimiento. Dicho diámetro se seleccionó en base a los resultados positivos que se mostraron en Ansys, y también, con el fin de realizar una estandarización de elementos redondos que necesitará el REPV, como es el caso de algunos barrenos. La longitud de la barra dependerá de las condiciones del suelo en donde se implementará el REPV, por ejemplo, si existe alguna alcantarilla cerca, habrá que alargar la barra para evadir ese obstáculo e instalar el sistema mecánico y de transmisión en un lugar seguro. Su estructura está conformada de PTR 1"x1" Calibre 10 y acomodado de manera simetría para equilibrar las cargas sobre toda la estructura. Esta estructura mostró los resultados de deformación y concentración de esfuerzos previamente vistos las **Gráficas 5 y 6**, respectivamente. Para entender mejor su diseño, la **Figura 33** muestra el modelo 3D del prototipo C del pedal hecho con PTR y unido a una barra de acero, así como el **Anexo 6** que muestra sus planos de construcción.

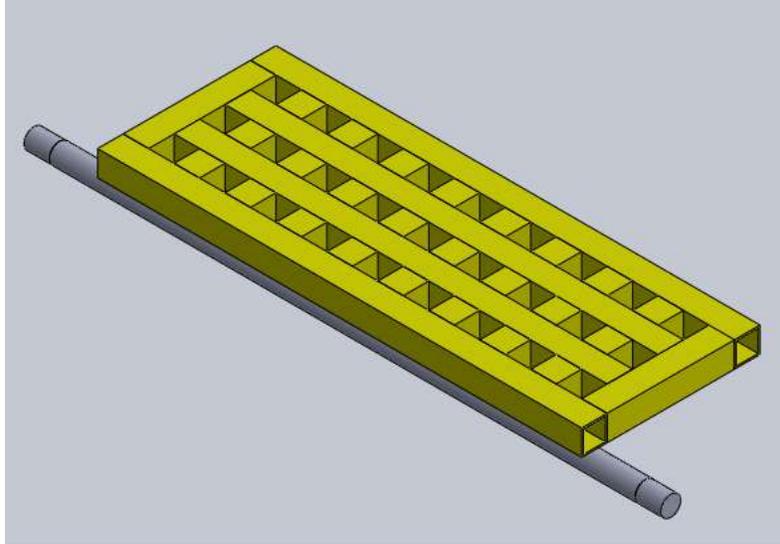


Figura 33 Modelo 3D del pedal diseñado con PTR y una barra soldada de 20 mm

6.3.2 Rodamientos

Conocidos también como Chumaceras, son el soporte y los elementos por los cuales la barra de acero del pedal girará libremente, por ende, son los que se encontrarán sujetos al pavimento. La cantidad de rodamientos dependerá de la longitud de la barra acoplada al “pedal”. La razón de la elección de este elemento se tomó en base a su economía, practicidad y el requerimiento de su diámetro interior por donde será acoplada la barra del pedal. Para comprender mejor su estructura, la **Figura 34** muestra el modelo 3D del rodamiento con un diámetro de 20 mm ajustable, y de igual manera, el **Anexo 7** muestra su plano de construcción, así como la cargas que puede soportar.

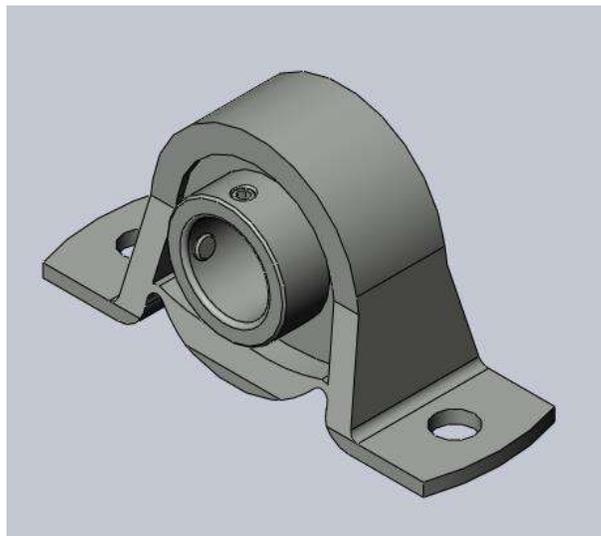


Figura 34 Modelo 3D de un rodamiento de piso con un diámetro interior de 20 mm

6.3.3 Resortes torsionales

Estos elementos simplemente ayudarán a que el pedal pueda hacer un efecto de vaivén para que el REPV pueda funcionar cuando un vehículo lo vuelva a accionar. Estos elementos pueden soportar grandes cantidades de energía dependiendo del número de espiras y el diámetro del alambre, además de que se adecuan perfectamente a la naturaleza de movimiento del REPV al evitar que la barra redonda se quede en una sola posición al sufrir un movimiento rotacional. En la **Figura 35** se puede apreciar el modelo de este elemento.

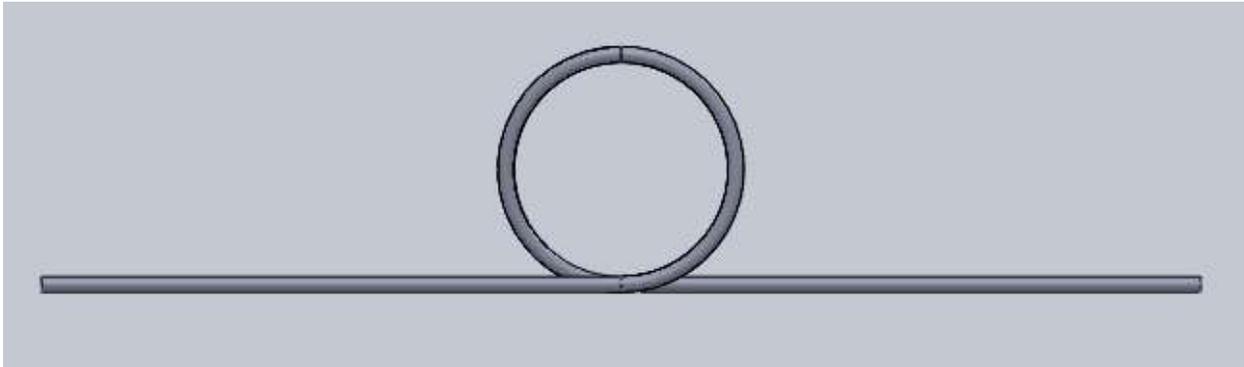


Figura 35 Modelo de un resorte torsional

6.3.4 Cople

Debido a la posible longitud que tendría la barra y a las condiciones del suelo en donde se pueda instalar el REPV, resultará muy difícil mantener la barra alineada a los rodamientos y sobre todo cuando está comience a girar, lo que provocará que las sujeciones de los rodamientos comiencen a debilitarse y posiblemente a liberar los rodamientos del suelo, por lo que el cople le dará cierta libertad a la barra de generar esfuerzos axiales pero manteniéndola acoplada al otro extremo de la barra para que pueda cumplir con su función de rotación. Existen diversos tipos de coples, los cuales tienen un rango mínimo y máximo de apertura por donde entraría la barra. Particularmente, el cople de mordaza se adapta a las condiciones de diseño del REPV debido a su practicidad, ya que su diámetro exterior, o carcasa, no obstruye con la superficie del suelo a diferencia de otros tipos de coples que tienen un diámetro exterior mucho mayor. La necesidad de este elemento dependerá de la longitud de la barra. Para entender mejor este elemento, la **Figura 36** muestra el modelo 3D de este tipo de cople que cumple con el objetivo de alineamiento de ejes. También, en el **Anexo 8** se puede apreciar su plano de construcción y algunas especificaciones técnicas de este elemento.

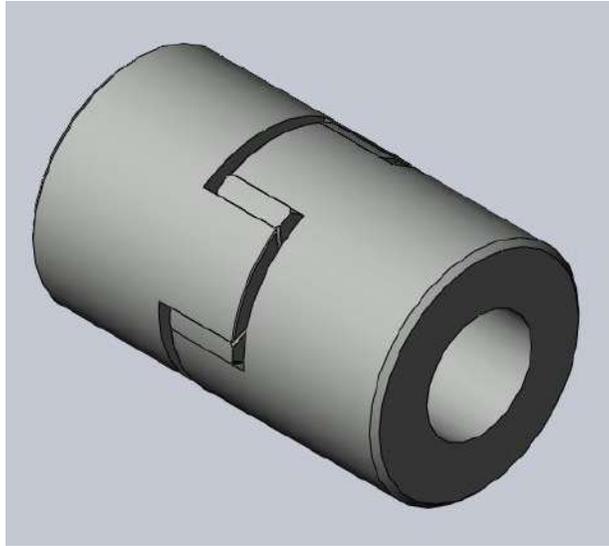


Figura 36 Modelo 3D de un cople de mordaza con un diámetro interior de 20 mm

6.3.5 Barra de palanca

Este elemento convertirá el movimiento rotacional de la barra del pedal en un movimiento lineal hacia una horquilla. Las dimensiones de este elemento dependerán de la dimensión del eslabón impulsor y de los elementos que serán acoplados a éste (horquilla y barra del pedal), por lo tanto, este elemento cuenta con 2 barrenos para su ensamble y un pequeño barreno en la parte inferior para poder ajustar por medio de un tornillo el acoplamiento de la barra. Para comprender mejor este elemento, la **Figura 37** muestra el modelo 3D con las características previamente vistas y el **Anexo 9** muestra su plano de construcción para este caso en particular.



Figura 37 Modelo 3D de una barra de palanca con 2 barrenos para su sujeción con los otros elementos

6.3.6 Horquilla

Este elemento es parte del eslabón acoplador (junto con la rótula) y permite cierta rotabilidad en el mecanismo según lo requiera. Al igual que el cople, existen diferentes tipos de horquillas, y particularmente para el REPV, la cabeza de horquilla con rosca exterior o rosca interior (esto depende del tipo de rosca de la rótula) cumple con el propósito de acoplarse a la rótula por medio

de un enroscado y de ajustar su altura, según necesite la distancia del eslabón acoplador. La horquilla se encontrará acoplada a una barra cuadrada que encaje perfectamente en su ranura y por medio de un perno se encontrará sujeta. Esta selección se dio en base a sus dimensiones de longitud y diámetro interior (ver **Anexo 10**), el cual se estandarizó de acuerdo con las características de la rótula. Para conocer un poco más este elemento, la **Figura 38** muestra el modelo 3D de este tipo de horquilla.

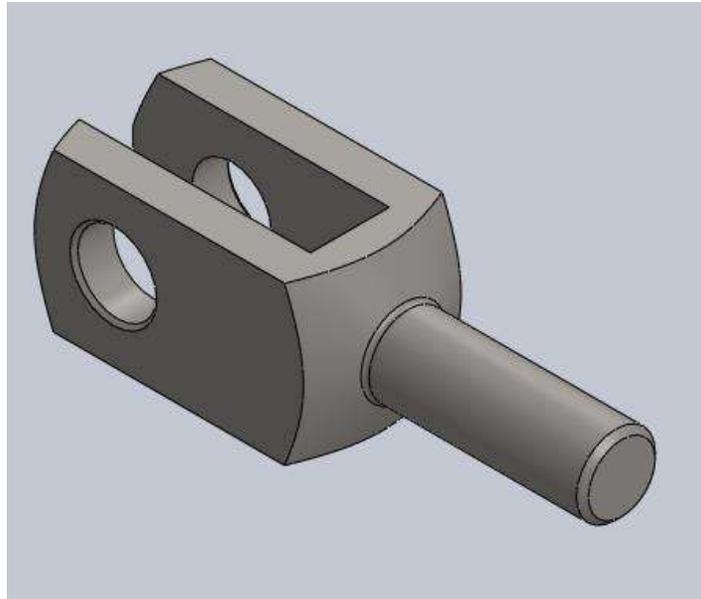


Figura 38 Modelo 3D de una cabeza de horquilla con un barrenado de 20 mm

6.3.7 Rótula

Particularmente, este elemento es muy importante en el REPV, ya que será el encargado de transmitir el movimiento de rotación hacia la caja de engranajes, la cual incrementará el número de revoluciones hacia el generador eléctrico. Este elemento semirrígido cuenta con una junta esférica, a veces elástica, que permitirá cierta libertad en los movimientos, específicamente en la rotación para evitar que el movimiento del mecanismo sea abrupto y brusco, provocando un posible estancamiento o una falla. Este elemento fue seleccionado debido a su función y dimensiones (ver **Anexo 11**), las cuales que pueden soportar una carga de 37.5 kN de manera estática, muy por encima de los 3,250 kg de peso que se utilizaron para el análisis en Ansys. En la **Figura 39** se puede mostrar el modelo 3D de este tipo de rótula para comprender un poco su funcionamiento.

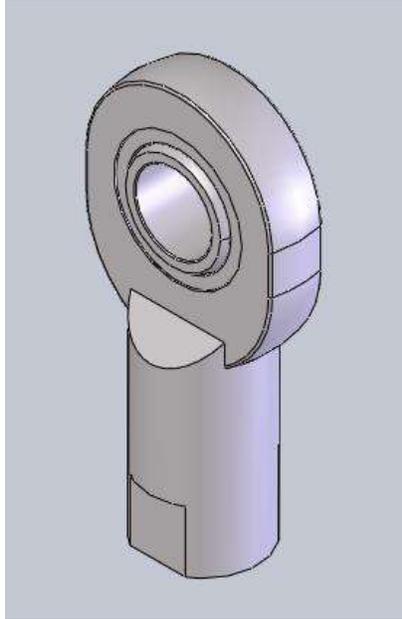


Figura 39 Modelo 3D de una cabeza de rótula

6.3.8 Perno rótula

Este elemento solo funcionan como acoplamiento entre la manivela y la rótula. Las dimensiones de este elemento dependerá del diámetro interior de la rótula y del barreno de la manivela (véase **Anexo 12**). La simplicidad de este elemento puede verse en la **Figura 40**.

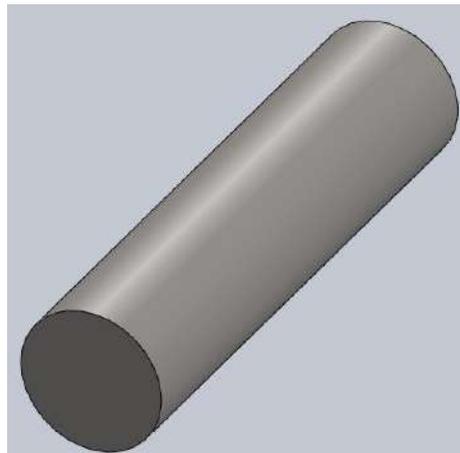


Figura 40 Modelo 3D del perno de la rótula

6.3.9 Manivela

Este elemento es el eslabón manivela, y como su nombre lo indica, debe ser capaz de realizar una

revolución y para obtener una mayor cantidad de revoluciones. En un extremo se colocará el perno de la rótula y en el otro extremo con cuñero se acoplará al eje de una caja de engranajes que pueda multiplicar dicha revolución. En la **Figura 41** se puede apreciar este elemento que cuenta con cuerpo cuadrado en donde su importancia se encuentra en la distancia que existe entre los centros de los barrenos, la cual será la distancia del eslabón para que pueda cumplir con su función. Su plano de construcción puede apreciarse a detalle en el **Anexo 13**.

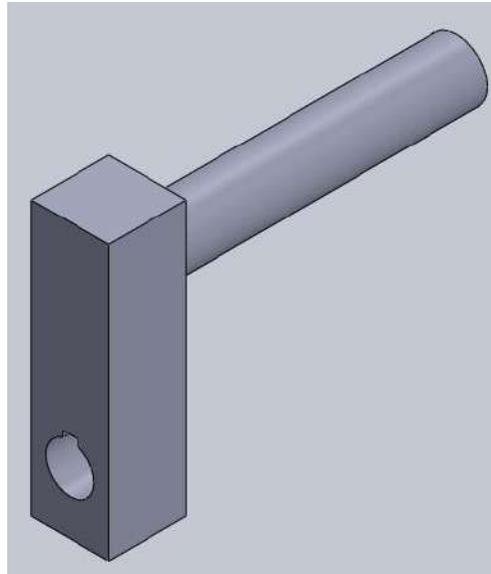


Figura 41 Modelo 3D de la manivela

6.3.10 Caja de engranajes

Este elemento tiene como objetivo incrementar las revoluciones de entrada y acoplar las revoluciones de salida hacia el generador eléctrico. La selección de este elemento será de acuerdo con las revoluciones mínimas necesarias que requiere el generador eléctrico que será utilizado. Por practicidad y precio, la caja de engranajes planetaria cumple con los requisitos de generar las revoluciones necesarias para el funcionamiento del generador eléctrico. Este tipo de caja de engranajes cuenta con diversas configuraciones que pueden adaptarse según las necesidades y puede apreciarse mejor en la **Figura 42** con algunas vistas para conocer su estructura y su posible implementación en el REPV. Particularmente, la selección de un reductor 10:1 se dio por medio de la necesidad de la velocidad angular del generador eléctrico, además de que, por cuestiones de tiempo y presupuesto, fue más fácil conseguir un elemento de este tipo que diseñar y fabricar uno específicamente para el REPV. Para conocer más a detalle sus especificaciones técnicas, véase el

Anexo 14.



Figura 42 Caja de engranajes con arreglo planetario lineal

6.3.11 Acoplador y volante de inercia para el generador eléctrico

Como se presentó previamente en la fundamentación teórica, este elemento tiene como objetivo generar un momento de inercia hacia la caja de engranajes, misma que lo mantendrá, en teoría, hacia su salida acoplada al generador eléctrico. El diseño de este elemento se toma en base a la inercia requerida del generador eléctrico para comenzar a producir energía eléctrica, y para esto, la masa y el radio del volante de inercia (dependiendo de su geometría) son fundamentales para obtener esa inercia necesaria. Su geometría es básica, como se aprecia en la **Figura 43**, la cual muestra un simple disco con un cuerpo saliente que será acoplado al eje de la caja de engranajes y un barrenado en donde se acoplará el perno de salida de la rótula. Sus dimensiones pueden variar de acuerdo con la inercia necesaria y al tipo de acoplamiento que tendría en una caja de engranajes. Este elemento es especial de acuerdo con el tipo de generador eléctrico que se va a tener. Simplemente conectará el movimiento de rotación que se obtenga a la salida de la caja de engranajes para transmitirlo hacia el generador eléctrico.

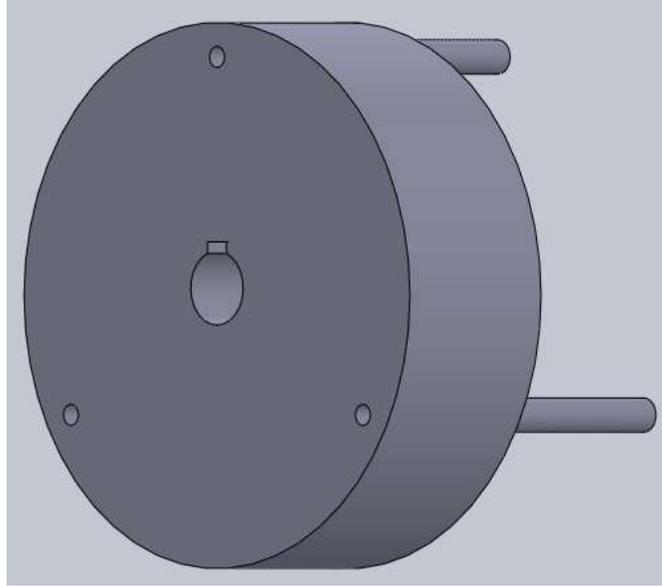


Figura 43 Modelo 3D volante de inercia y acople para el generador eléctrico

6.3.12 Trinquete

Este elemento permite un movimiento rotacional libre hacia un solo sentido, lo que impide que el mecanismo provoque un movimiento agresivo hacia el sentido contrario dando como resultado un posible daño en el funcionamiento óptimo del sistema. Este elemento cuenta con un elemento dentado y un gatillo, el cual solo puede permitir el giro hacia un solo sentido. Existen varios diseños de este elemento, dependiendo de sus necesidades, y en la **Figura 44** se puede observar un trinquete totalmente hermético que evita un desgaste prematuro en su funcionamiento.

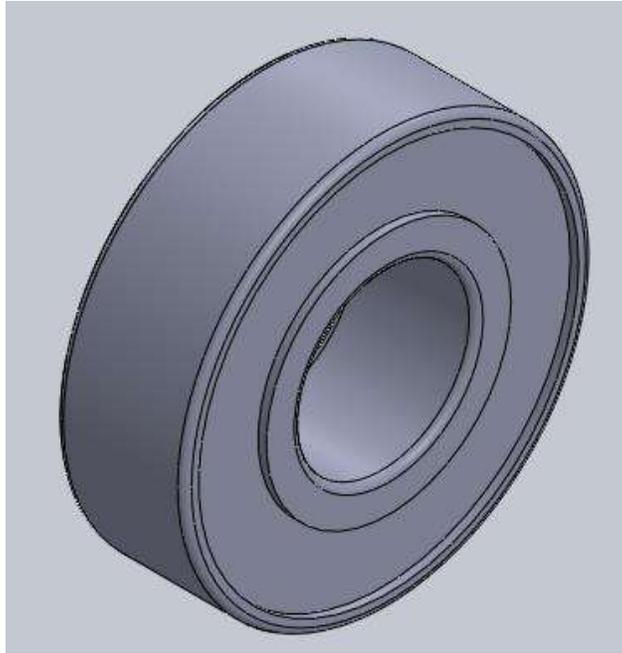


Figura 44 Modelo 3D de un trinquete

6.3.13 Generador eléctrico

Este elemento será el que brinde los resultados que se buscan como objetivo del proyecto: la energía eléctrica. Este elemento tiene muchas variaciones ya que depende de la cantidad de energía que se busca producir, las características de funcionamiento y sus dimensiones, así como también su precio y calidad. Particularmente para esta aplicación, se utilizó un generador que ya tenía la Universidad y que fue utilizado para otros fines académicos. Este generador implementado en el proyecto es un generador eólico con especificaciones y dimensiones muy específicas (ver **Anexo 15**), sin embargo, se adaptó por medio de elementos que ayudaran a acoplarlo al funcionamiento del REPV. Para comprender mejor su estructura y diseño, la **Figura 45** muestra este generador de marca Air Breeze, que, de acuerdo con su manual de usuario, comienza a generar energía eléctrica por encima de los 500 rpm. Por lo que se estableció un parámetro de velocidad angular para el REPV de 600 rpm, esto para ampliar el rango de error que podría tener tanto el generador como el REPV al momento de generar su propia velocidad angular, además de que, de acuerdo con el resultado de velocidad angular ideal realizada en Ansys, el REPV podría generar 60 rpm, por lo que simplemente fue necesario implementar una caja de engranajes con un incrementador de 1:10 para obtener la velocidad angular establecida para el funcionamiento del generador eléctrico.



Figura 45 Generador eólica Air Breeze

Para utilizar únicamente los componentes necesarios del generador, fue necesario desarmarlo para obtener la carcasa en donde se encuentran los imanes y el embobinado, que son los elementos que generan energía eléctrica, tal y como se puede apreciar en la **Figura 46**.



Figura 46 Embobinado y disco de imanes del generador eléctrico eólico Air Breeze

Este generador, también contiene un regulador compuesto dentro de una tablilla electrónica que evita la sobrecarga de energía hacia el sistema de almacenamiento. También, este elemento fue

retirado para poder ser utilizado con la misma función. Esta tablilla electrónica está compuesta por un circuito integrado, capacitores y tres terminales eléctricas, mismas que son las que mandan la energía eléctrica. Dicha tablilla puede verse en la **Figura 47** en donde los cables morados son las terminales de la señal eléctrica: corriente, neutro y tierra.



Figura 47 Tablilla electrónica del generador eólico Air Breeze

6.3.14 Base del generador eléctrico

Particularmente, para el caso del prototipo desarrollado en el proyecto, fue necesario diseñar y manufacturar un elemento que mantuviera de manera fija la estructura del generador eléctrico (ver **Figura 46** para que los imanes pudieran girar libremente en el embobinado. En la **Figura 48** se puede observar esta estructura que tiene una placa a 90° con respecto al lugar en donde se coloca el generador eléctrico y que contiene barrenos para poderse sujetar al suelo o sobre una estructura firme (ver **Anexo 16**).

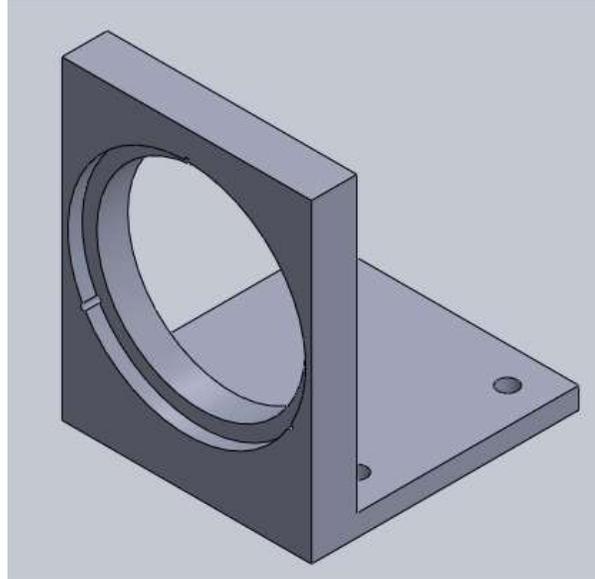


Figura 48 Modelo 3D de la base para el generador eléctrico

6.3.15 Base de la caja de engranajes

De igual manera, fue necesario diseñar y manufacturar una base que mantuviera fija la caja de engranajes para permitir que el eje gire libremente. Esta base junto con la anterior, deben mantener la misma distancia entre centros para poder alinear el eje de la caja de engranajes con el eje del generador eléctrico (ver **Anexo 17**), y así, permitir un movimiento más controlado y libre sin movimientos forzados que afectar en el mecanismo en general. Esta base es muy similar a la anterior y puede apreciarse en la **Figura 49**, en donde dicho elemento también cuenta con barrenos de sujeción hacia el suelo o una estructura firme para poder validar su funcionamiento.

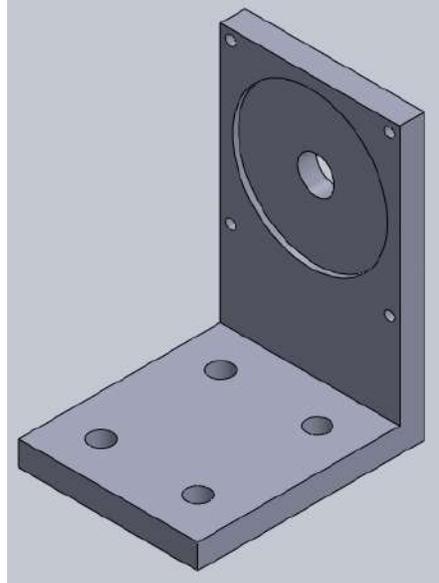


Figura 49 Modelo 3D de la base para la caja de engranajes

6.3.16 Sistema de almacenamiento

Este elemento es capaz de almacenar la energía eléctrica para su posterior uso. Las características de este elemento dependerán de la cantidad de energía que puede generar el REPV y la que se desea almacenar. En la **Figura 50** se puede apreciar este elemento que puede ser resguardado al interior de la caseta de seguridad con las medidas de seguridad pertinentes o en un contenedor cercano a la REPV.



Figura 50 Dispositivo de almacenamiento energético

6.3.16 Construcción del prototipo

A continuación, se muestran los procesos que se siguieron para poder ensamblar el prototipo.

Materiales:

- Barra de acero 1018 redonda de 20.6 mm de diámetro
- PTR 1"x1" Cal. 10
- 2 rodamientos de piso de 20 mm de diámetro interior
- Barra de acero cuadrada de 1"
- Cabeza de horquilla de rosca exterior de 20 mm de diámetro
- Rótula con rosca interior de 20 mm de diámetro
- 1 kilogramo de soldadura
- Tornillo con guía 5/8" x 1 1/2"
- Tornillo 11 mm x 1"
- Generador eléctrico Air Breeze
- Reductor 10:1 planetario lineal Nema 34

Procedimiento:

1. Se realizaron los cortes del PTR 1"x1" Cal. 10 de acuerdo con las dimensiones requeridas del diseño del pedal.



Figura 51 Cortes de PTR para la estructura del pedal

2. Se soldaron todos los tramos de PTR previamente cortados para crear una estructura similar de acuerdo con el diseño y se pulieron todos los filos.



Figura 52 Estructura del pedal soldado y pulido

3. Se maquinaron los extremos de la barra redonda con el fin de poder ensamblar los rodamientos de manera deslizante.

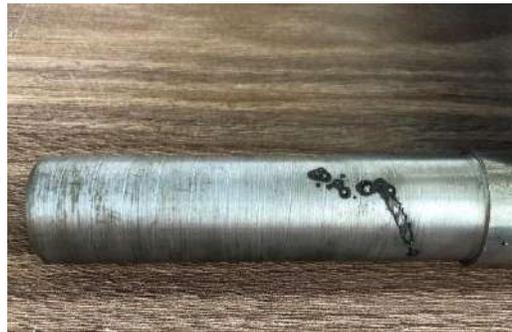


Figura 53 Maquinado en uno de los extremos de la barra redonda

4. Se soldó el pedal sobre la barra de acero redonda para crear un único cuerpo que entre en movimiento.



Figura 54 Unión entre pedal y barra redonda por medio de soldadura

5. Se instalaron los resortes de torsión para que la estructura pueda hacer su efecto de vaivén y poder funcionar de manera cíclica.
6. Se montaron los rodamientos en los extremos de la barra redonda.



Figura 55 Ensamble de los extremos de la barra redonda en los rodamientos

7. Se maquinó la barra cuadrada de 1" con el fin de crear la barra de palanca previamente vista.



Figura 56 Maquinado de la barra cuadrada que funcionará como eslabón impulsor

8. Se instaló la barra de palanca en el extremo de la barra redonda con mayor longitud maquinada y por medio del tornillo de 11 mm x 1" se ajustó la barra de palanca según sus necesidades.



Figura 57 Ensamble de la barra cuadrada en uno de los extremos de la barra redonda

9. Se colocó la horquilla en la barra de palanca con el área maquinada y se colocó el tornillo de guía de 5/8" x 1 1/2" en uno de los barrenos con el fin de sujetar la cabeza de horquilla.



Figura 58 Ensamble de la cabeza de horquilla con el extremo restante de la barra cuadrada por medio de un tornillo con guía

10. Se ensambló, por medio de rosca, la cabeza de horquilla y la rótula y se ajustó a la medida necesaria.
11. Se colocó el extremo de la manivela con perno en la rótula y en el otro extremo se ensambló la caja de engranajes en el barreno con cuña.



Figura 59 Ensamble manivela a la caja de engranajes

12. Se colocó la base de la caja de engranajes para mantenerla sujeta y permitir que el eje gire libremente por medio de la manivela.
13. Se ensambló el volante de inercia, que, a su vez, funcionará como adaptador de acuerdo con la geometría del generador eléctrico.



Figura 60 Maquinado y ensamble del volante de inercia y adaptador

14. Se colocó la base del generador, que, de igual manera, lo sujetará y permitirá que gire el

adaptador y volante de inercia al acoplarse a la salida de la caja de engranajes.

15. Se conectaron las terminales del embobinado del generador eléctrico a la tablilla electrónica para que realice su función de regulador eléctrico.

16. Por último, las terminales de la tablilla electrónica se conectaron hacia un dispositivo de almacenamiento, en este caso, una batería.

La parte fundamental del proyecto fue, sin lugar a duda, el diseño del REPV. El diseño del mecanismo de cuatro barras para definir un principio de funcionalidad fue la base para visualizar un modelo 3D del REPV. La generación de planos de construcción resultó también importante para el maquinado necesario en los elementos diseñados, así como la búsqueda de elementos en diferentes catálogos o distribuidores de elementos mecánicos. Si bien, el modelo 3D ayudó a idealizar lo que sería el REPV en general, fue importante llevar a cabo un prototipo para evaluar la factibilidad de construirlo. El prototipo con respecto al modelo 3D tuvo algunas variaciones debido a la adaptación de los elementos que ya se tenía en la universidad.

6.4 Iluminación y funcionalidad del REPV

6.4.1 Estudio de iluminación en caseta de seguridad

Por medio del software DIALux, se realizó un estudio de iluminación para contabilizar y visualizar las lámparas que serían necesarias o suficientes para cumplir con la norma NOM-025-STPS-2008. Para esto, fue necesario modelar el diseño de la caseta de seguridad a nivel de construcción y elementos como ventanas, puerta y la cantidad de luminarias que utiliza actualmente. En la **Figura 61** se muestra el diseño 3D de la caseta de seguridad realizado en DIALux para su estudio de iluminación.

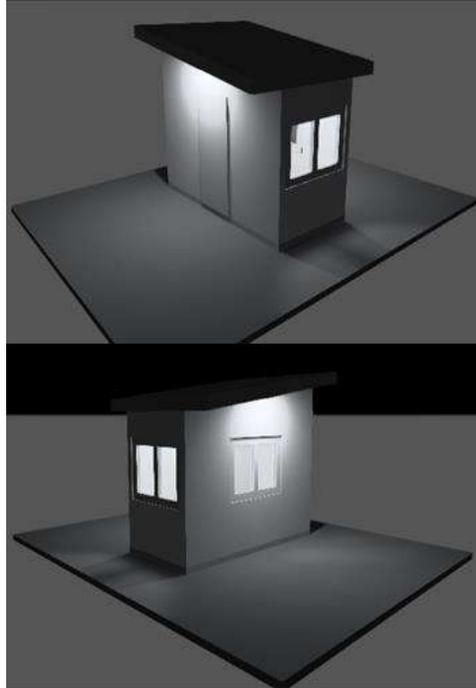


Figura 61 Modelo 3D de la caseta de seguridad

Se aplicó como elemento de iluminación una lámpara con las siguientes características:

- Especificación eléctrica: 100 V ~-240 V ~ 50 Hz/60 Hz 18 W 0.18 A-0.08 A
- Ángulo de dispersión: 120°
- Flujo luminoso: 1620 lm

La selección de la lámpara se realizó en base a su bajo costo energético (18 W) y su flujo luminoso (1620 lm). Dicha lámpara se colocó al interior y al exterior en la puerta y en la ventana lateral, como se muestra en la figura anterior. Con la implementación anterior, se obtuvieron los siguientes niveles de iluminación que pueden visualizarse por medio de la **Figura 62**.

Superficie de cálculo (Iluminancia perpendicular)		
	Real	Nominal
Media	81.8 lx	-
Min	40.2 lx	-
Max	113 lx	-
Mín./medio	0.49	-
Mín./máx.	0.36	-
Parámetros		
Altura	0.000 m	

Figura 63 Parámetros de iluminación para la lámpara de la puerta

- Lámpara ventana lateral.

Superficie de cálculo (Iluminancia perpendicular)		
	Real	Nominal
Media	97.1 lx	-
Min	39.6 lx	-
Max	156 lx	-
Mín./medio	0.41	-
Mín./máx.	0.25	-
Parámetros		
Altura	0.000 m	

Figura 64 Parámetros de iluminación para la lámpara de la ventana lateral

- Lámpara interior de caseta.

Plano útil (Iluminancia perpendicular)		
	Real	Nominal
Media	193 lx	≥ 500 lx
Min	101 lx	-
Max	295 lx	-
Mín./medio	0.52	≥ 0.60
Mín./máx.	0.34	-
Parámetros		
Altura	0.000 m	

Figura 65 Parámetros de iluminación para la lámpara del interior de la caseta

Con los resultados expuestos anteriormente, se pudo observar que se cumple con la normativa

utilizando una lámpara de 18 W al interior de la caseta, ya que el nivel máximo de lúmenes que se obtuvo durante el estudio fue de 295 lúmenes. Por lo tanto, el REPV debe ser capaz de iluminar una lámpara con las características que se mostraron previamente. Mientras que el resto de energía que pueda generar puede ser utilizada para el resto de las lámparas u otras lámparas que ayuden a iluminar zonas aledañas a la caseta de seguridad.

6.4.2 Posibles escenarios de aplicación

El uso de este tipo de recolector puede ver su potencial en los siguientes posibles escenarios como:

- zonas escolares,
- entradas a plazas comerciales,
- parques industriales,
- casetas de peaje,
- o zonas en donde exista un gran tráfico de peatones que obligue a los conductores a reducir su velocidad.

De acuerdo con el diseño del REPV, su fácil instalación lo hace aplicable para lugares como los mencionados anteriormente sin el uso de maquinaria o de una obra civil para su implementación, aunque algunas de las amenazas previstas para la implementación de este REPV, es el riesgo al robo total o parcial del sistema debido a que todos sus elementos se encontrarían a la intemperie. Otra amenaza es la misma exposición al medio ambiente permitiendo que algunos elementos mecánicos se oxiden y fragilicen, aunque la implementación de algún tipo de recubrimiento podría evitar que dichas características se presenten prematuramente. Otra amenaza que puede ocasionar un daño en el REPV es la velocidad del vehículo y la manera en que las ruedas ejercen la presión sobre el ‘pedal’, ya que una incorrecta aplicación de esfuerzos puede dañar los rodamientos o algún otro elemento del REPV.

VII. Conclusiones

Dentro de los resultados y el progreso obtenido durante el proyecto, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. Si se considera una hora de apertura de 7:00 am a 10:00 pm y un flujo vehicular de 200.7 vehículos por hora, de acuerdo con el promedio obtenido en los resultados de la fase 1, entonces podría haber un flujo de 3,010.5 vehículos solo en la entrada de Avenida Hidalgo hacia CU, y si se considera que por cada uno de los ejes de los vehículos, y en el peor de los casos que el REPV genere al menos 1 W, entonces podría haber un total de 6,021 W, considerando que todos los vehículos tienen dos ejes, y todo esto sin considerar los vehículos que salen por la misma entrada, pero si en teoría los mismos vehículos que entran son los mismos que salen, entonces podría haber un total de 6,021 vehículos circulando sobre la misma caseta de seguridad, aunque es evidente que en la práctica esto no es cierto ya que el Centro Universitario dispone de otras salidas, mismas en donde también se puede implementar un REPV.
2. La implementación del REPV en una zona exclusiva para vehículos ligeros puede ayudar a reducir los costos finales, ya que no sería necesario implementar materiales más robustos para su funcionamiento y durabilidad.
3. En cuanto al diseño, se puede realizar un estudio de optimización por medio de Ansys para conocer los parámetros dimensionales que pueden tener el pedal y la barra redonda, y poder soportar los esfuerzos máximos que pueden sufrir sin que el material supere su punto de cedencia a la zona plástica. Estos parámetros dimensionales pueden verse reflejados también en el costo final del REPV.
4. De acuerdo con el estudio de iluminación realizado durante el proyecto y con el escenario mostrado en la primera conclusión, se podría cumplir con la norma de iluminación que requiere una caseta de seguridad.
5. El proyecto tiene potencial para realizar una patente, misma que ya fue registrada por parte del alumno y el resto de sínodo, y siendo otorgada como titular a la Universidad Autónoma de Querétaro.
6. Este tipo de REPV puede ser una solución accesible, rápida y prometedora en cuanto a la generación de energía eléctrica limpia.

VIII. Agradecimientos

Agradezco a Conahcyt por el otorgamiento de una beca para poder realizar este proyecto y poder culminar mis estudios de la maestría.

Agradezco también al Instituto San Miguelense, particularmente al Grupo SSC por la capacitación y los certificados en Ansys, mismos que me ayudaron a la realización de este proyecto y a mi vida como profesionista.

Agradezco a mi sínodo quien me ha apoyado en todo momento con respecto al análisis, la investigación y al pensamiento crítico para poder realizar un mejor proyecto y obtener el registro de una patente.

Agradezco a todos mis profesores por otorgarme el conocimiento necesario para poder realizar este proyecto de la mejor manera posible.

Agradezco a mis amigos por su apoyo, los consejos y su conocimiento obtenido bajo sus experiencias profesionales y de vida.

Por último, agradezco a mi familia por su apoyo y amor de principio a fin para poder alcanzar este gran logro personal.

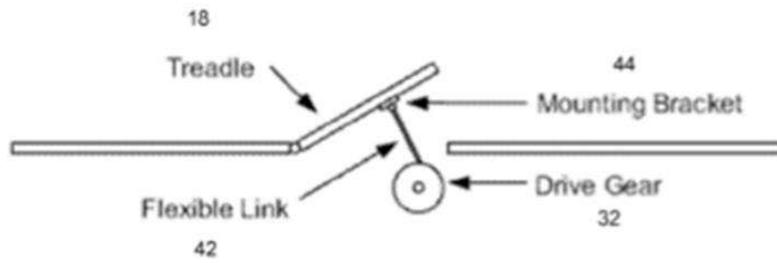
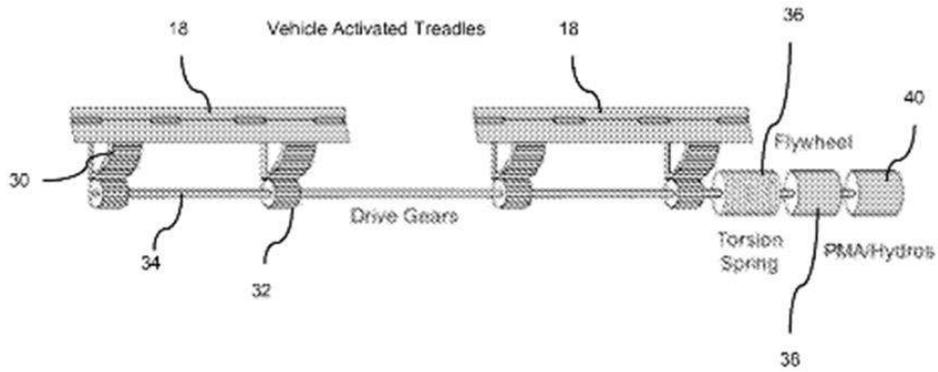
IX. Bibliografía y Referencias

- Azam, A., Ahmed, A., Hayat, N., Ali, S., Khan, A., Murtaza, G., & Aslam, T. (2020). Design, fabrication, modelling and analyses of a movable speed bump-based mechanical energy harvester (MEH) for application on road. *Energy*, 1-18.
- Beer, F., Johnston, E., & Eisenberg, E. (2007). *Mecánica vectorial para ingenieros. 8a ed.* . México: The McGraw-Hill.
- Budynas, R., & Nisbett, J. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. 9a ed.* . México: The McGraw-Hill.
- Cao, Y., Sha, A., Liu, Z., Li, J., & Jiang, W. (2021). Energy output of piezoelectric transducers and pavements under simulated traffic load. *Journal of Cleaner Production*, 1-12.
- Diezmartínez, C. (2021). Clean energy transition in Mexico: Policy recommendations for the deployment of energy storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1-12.
- Du, Y., Deng, J., Li, P., & Wen, Y. (2020). Energy transfer and redistribution: An approach for unifying vibrational energy harvesting and vibration attenuation. *Nano Energy*, 1-11.
- Duarte, F., Ferreira, A., & Fael, P. (2017). Integration of a mechanical energy storage system in a road pavement energy harvesting hydraulic device with mechanical actuation. *Journal of renewable and sustainable energy*, 1-21.
- Fan, K., Liu, J., Wei, D., Zhang, D., Zhang, Y., & Tao, K. (2021). A cantilever-plucked and vibration-driven rotational energy harvester with high electric outputs. *Energy conversion and management*, 1-12.
- Fathabadi, H. (2019). Recovering waste vibration energy of an automobile using shock absorbers included magnet moving-coil mechanism and adding to overall efficiency using wind turbine. *Energy*, 1-25.
- Floyd, T. (2007). *Principios de circuitos eléctricos. 8a ed.* México: Pearson educación de México S.A. de C.V.
- Galchev, T., McCullagh, J., Peterson, R., & Najafi, K. (2011). Harvesting traffic-induced vibrations for structural health monitoring of bridges. *Journal of micromechanics and microengineering*, 1-13.
- Giusa, F., Giuffrida, A., Trigona, C., Andò, B., Bulsara, A., & Baglio, S. (2013). “Random mechanical switching harvesting on inductor”: a novel approach to collect and store energy from weak random vibrations with zero voltage threshold. *Sensors and actuators A: Physical*, 35-45.
- Halkos, G., & Gkampoura, E. (2020). Reviewing Usage, Potentials, and Limitations of Renewable Energy Sources. *Energies*, 1-19.
- Hayt, W., Kemmerly, J., & Durbin, S. (2012). *Análisis de circuitos en ingeniería. 8va ed.* . México: The McGraw-Hill.
- Kalyani, V., Dudy, M., & Pareek, S. (2015). Green energy: The need of the world. . *International journal of computer science and information security*, 18-26.
- Khare, V., Chaturvedi, P., & Mishra, M. (2023). Solar energy system concept change from trending technology: A comprehensive review. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*.
- Li, H., Zheng, P., Zhang, T., Zou, Y., Pan, Y., Zhang, Z., & Azam, A. (2021). A high-efficiency energy regenerative shock absorber for powering auxiliary devices of new energy driverless buses. *Applied energy*, 1-15.
- Mapelli, F., Sabbioni, E., & Tarsitano, D. (2011). Energy recovering from vibrations in road

- vehicle suspensions. *In structural dynamics and renewable energy*, 67-75.
- Marks-Bielska, R., Bielski, S., Pik, K., & Kurowska, K. (2020). The Importance of Renewable Energy Sources in Poland's Energy Mix. *Energies*, 1-23.
- Norton, R. (2009). *Diseño de maquinaria 4 ed.* México: McGraw-Hill/Interamericana Editores.
- Paraschiv, L., & Paraschiv, S. (2023). Contribution of renewable energy (hydro, wind, solar and biomass) to decarbonization and transformation of the electricity. *Energy Reports*, 535-544.
- Pourasl, H., Vatankhah, B., & Khojastehnezhad, V. (2023). Solar energy status in the world: A comprehensive review. *Energy Reports*, 3474-3493.
- Qazi, A., Hussain, F., Rahim, N., Hardaker, G., Alghazzawi, D., Shaban, K., & Haruna, K. (2019). Towards sustainable energy: a systematic review of renewable energy sources, technologies, and public opinions. *IEEE Access*, 63837-63851.
- Rehman, S., Alhems, L., Alam, M., Wang, L., & Toor, Z. (2023). A review of energy extraction from wind and ocean: Technologies, merits, efficiencies, and cost. *Ocean Engineering*.
- Sil, I., Mukherjee, S., & Biswas, K. (2017). A review of energy harvesting technology and its potential applications. *Environmental and earth sciences research journal*, 33-38.
- Sun, M., Wang, W., Zheng, P., Luo, D., & Zhang, Z. (2021). A novel road energy harvesting system based on a spatial double V-shaped mechanism for near-zero-energy toll stations on expressways. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1-16.
- Tan, D., Wei, C., Sobhan, M., Minhad, K., & Ali, K. (2022). Advancements of wind energy conversion systems for low-wind urban environments: A review. *Energy Reports*, 3406-3414.
- Wang, J., Xiao, F., & Zhao, H. (2021). Thermoelectric, piezoelectric and photovoltaic harvesting technologies for pavement engineering. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1-19.
- Yang, F., Gao, M., Wang, P., Zuo, J., Dai, J., & Cong, J. (2020). Efficient piezoelectric harvester for random broadband vibration of rail. *Energy*, 1-12.
- Zhang, X., Pan, H., Qi, L., Zhang, Z., Yuan, Y., & Liu, Y. (2017). A renewable energy harvesting system using a mechanical vibration rectifier (MVR) for railroads. *Applied energy*, 1535-1543.
- Zhang, Z., Zhang, X., Chen, W., Rasim, Y., Salman, W., Pan, H., & Wang, C. (2016). A high-efficiency energy regenerative shock absorber using supercapacitors for renewable energy applications in range extended electric vehicle. *Applied energy*, 177-188.
- Zhao, E., Sun, S., & Wang, S. (2022). New developments in wind energy forecasting with artificial intelligence and big data: a scientometric insight. *Data Science and Management*, 84-95.
- Zhao, J., Dong, K., Dong, X., & Shahbaz, M. (2022). How renewable energy alleviate energy poverty? A global analysis. *Renewable Energy*, 299-311.
- Zohuri, B., Farahnaz, B., & Mossavar-Rahmani, F. (2022). *Knowledge is Power in Four Dimensions: Models to Forecast Future Paradigm*. Elsevier.

IX. Anexos

Anexo 1



Anexo 2

CN 209639515 U 说明书附图 1/4 页

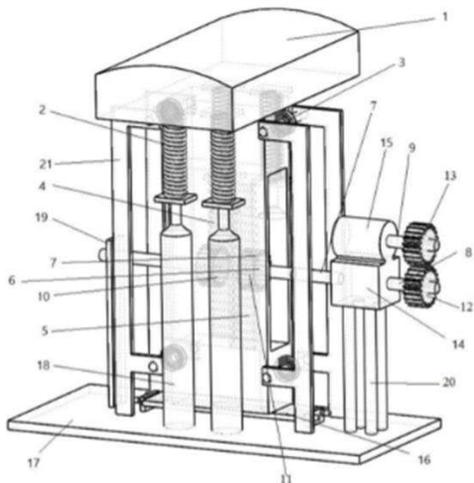


图1

CN 209639515 U 说明书附图 3/4 页

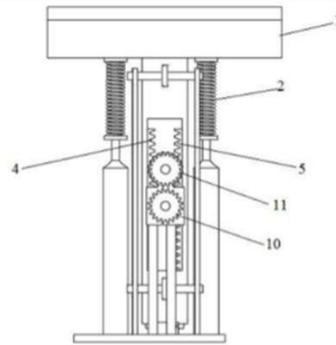


图4

Anexo 3

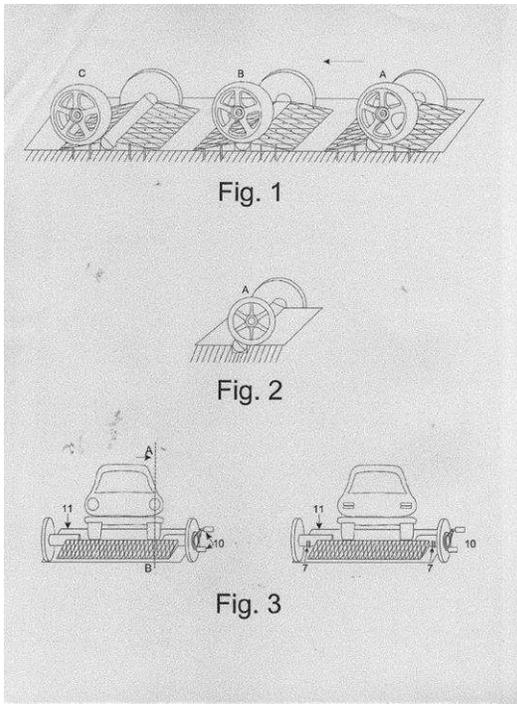


Fig. 1

Fig. 2

Fig. 3

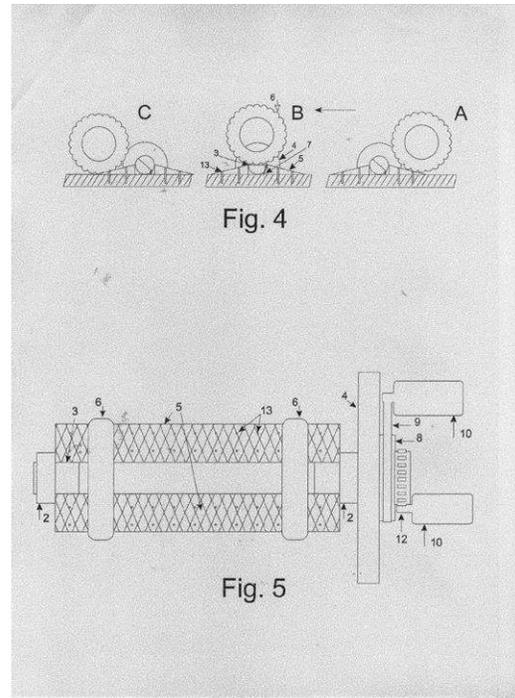


Fig. 4

Fig. 5

Anexo 4

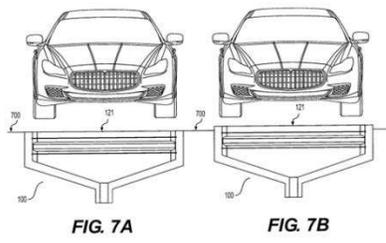


FIG. 7A

FIG. 7B

U.S. Patent May 3, 2016 Sheet 1 of 9 US 9,331,548 B1

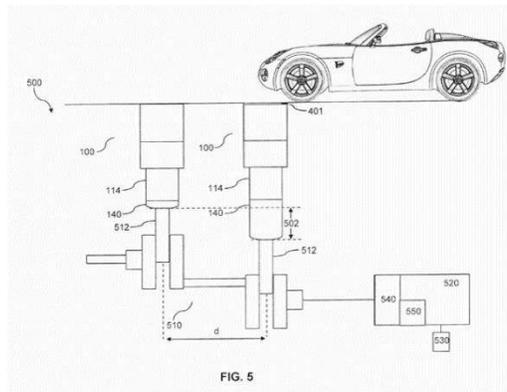


FIG. 5

U.S. Patent May 3, 2016 Sheet 3 of 9 US 9,331,548 B1

Anexo 5

CLASE: VEHÍCULO O CONFIGURACIÓN	NOMENCLATURA
AUTOBÚS	B
CAMIÓN UNITARIO	C
TRACTOCAMIÓN	T
CONVERTIDOR	D
CAMIÓN REMOLQUE	C-R
TRACTOCAMIÓN ARTICULADO	T-S
TRACTOCAMIÓN DOBLEMENTE ARTICULADO	T-S-R Y T-S-S

Tipo de carretera	Nomenclatura
Carretera de cuatro carriles, Eje de Transporte	ET4
Carretera de dos carriles, Eje de Transporte	ET2
Carretera de cuatro carriles	A4
Carretera de dos carriles	A2
Carretera de cuatro carriles, red primaria	B4
Carretera de dos carriles, red primaria	B2
Carretera de dos carriles, red secundaria	C
Carretera de dos carriles, red alimentadora	D

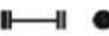
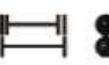
AUTOBUS (B)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	VEHÍCULO
B2	2	6	 
B3	3	8 o 10	
B4	4	10	

CAMIÓN UNITARIO (C)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	VEHÍCULO
C2	2	6	
C3	3	8-10	
CAMIÓN-REMOLQUE (C-R)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	VEHÍCULO
C2-R2	4	14	
C3-R2	5	18	
C2-R3	5	18	
C3-R3	6	22	

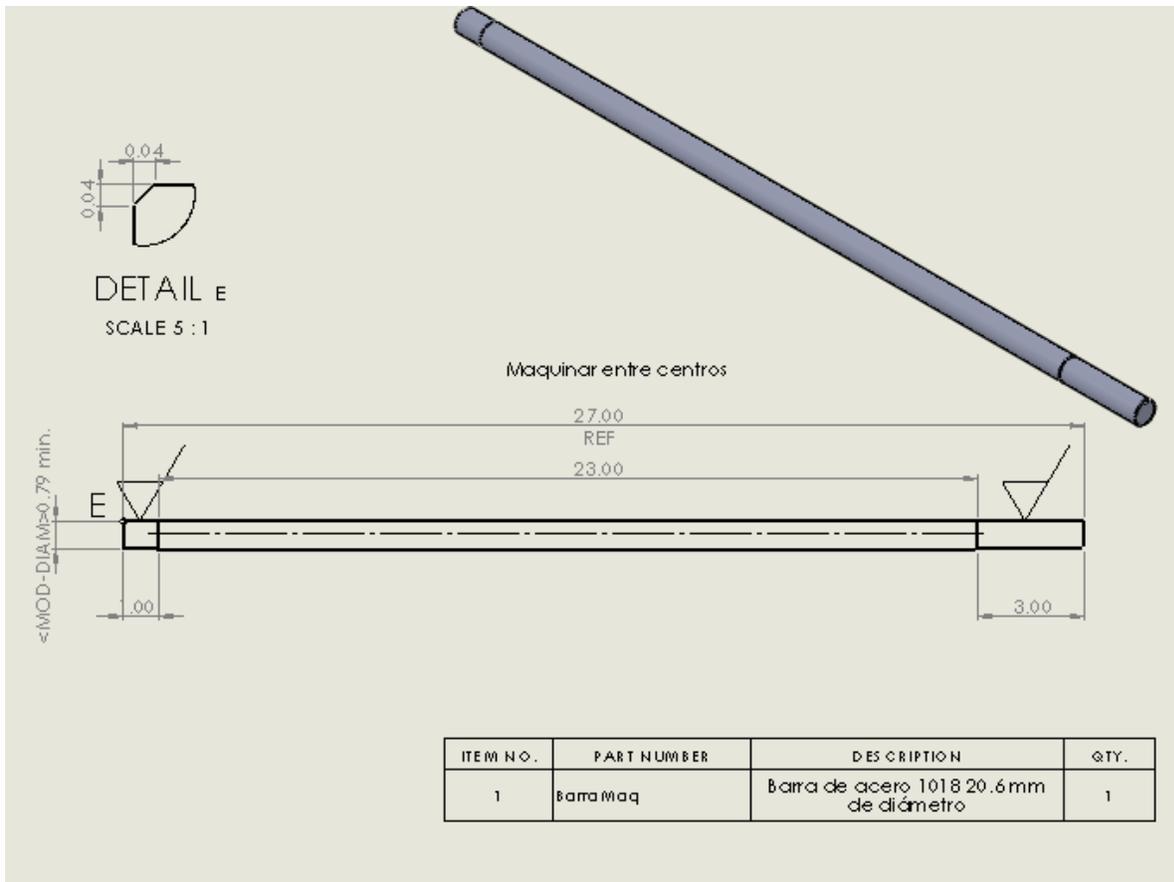
TABLA A-1
PESOS MÁXIMOS AUTORIZADOS POR TIPO DE EJE Y CAMINO (t)

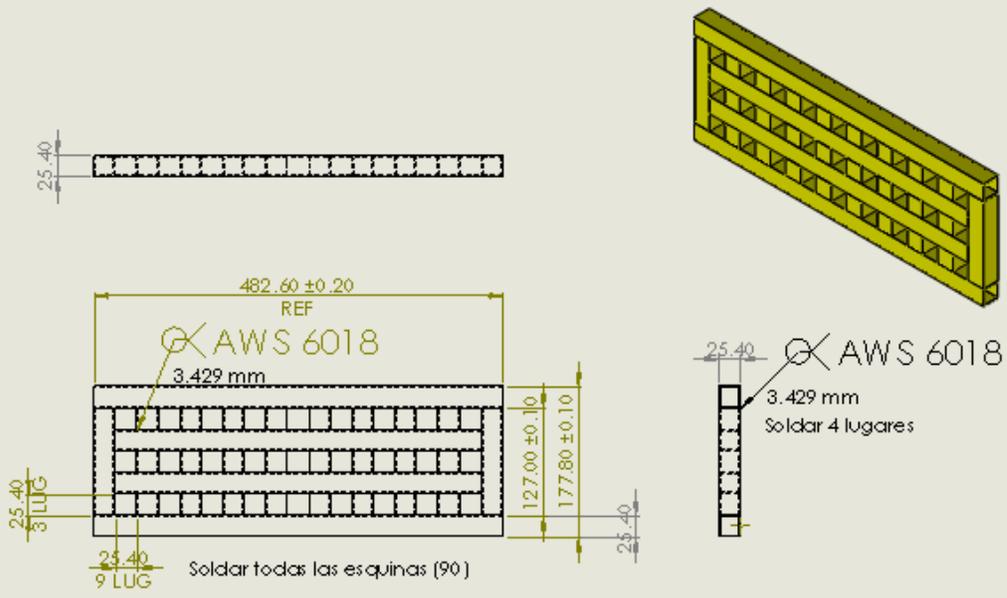
CONFIGURACIÓN DE EJES	VEHÍCULO	TIPO DE CAMINO			
		ET4 Y ET2 A4 Y A2	B4 Y B2	C	D
 SENCILLO DOS LLANTAS	B	6,50	6,00	5,50	5,00
 MOTRIZ SENCILLO CUATRO LLANTAS	B	12,50	10,50	9,00	8,00
 MOTRIZ DOBLE TANDEM SEIS LLANTAS	B	17,50	13,00	11,50	11,00
 MOTRIZ DOBLE TANDEM OCHO LLANTAS	B	21,00	17,00	14,50	13,50

TABLA A-2
PESOS MÁXIMOS AUTORIZADOS POR TIPO DE EJE Y CAMINO (t)

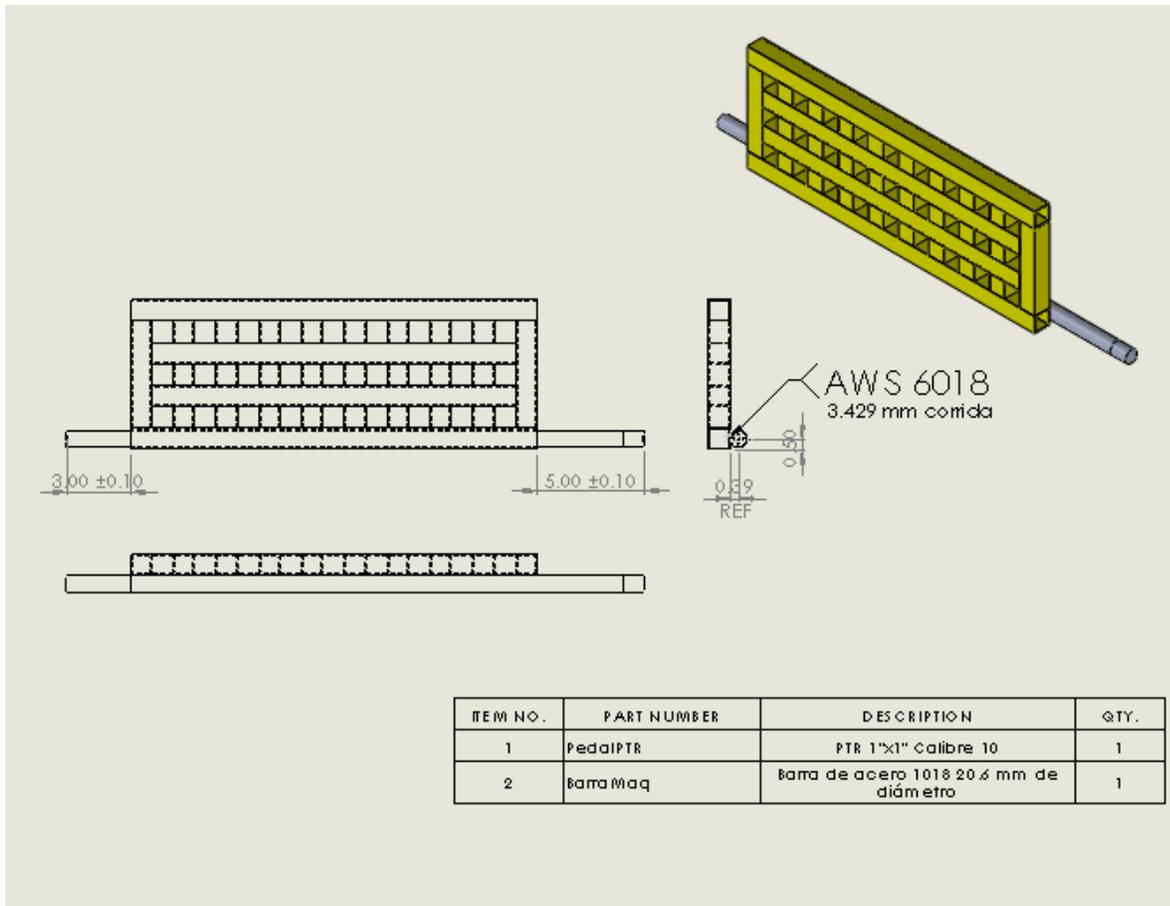
CONFIGURACIÓN DE EJES		VEHÍCULO O CONFIGURACIÓN	TIPO DE CAMINO			
			ET4 Y ET2 A4 Y A2	B4 Y B2	C	D
	SENCILLO DOS LLANTAS	C-R y T-S-R	6,50	6,00	5,50	5,00
		C y T-S	6,50	6,00	5,50	5,00
	SENCILLO CUATRO LLANTAS	C-R y T-S-R	10,00	9,50	8,00	7,00
		C y T-S	11,00	9,50	8,00	7,00
	MOTRIZ SENCILLO CUATRO LLANTAS	C-R y T-S-R	11,00	10,50	9,00	8,00
		C y T-S	12,50	10,50	9,00	8,00
	MOTRIZ DOBLE O TANDEM SEIS LLANTAS	C-R y T-S-R	15,00	13,00	11,50	11,00
		C y T-S	17,50	13,00	11,50	11,00
	DOBLE TANDEM OCHO LLANTAS	C-R y T-S-R	17,00	15,00	13,50	12,00
		C y T-S	19,00	15,00	13,50	12,00
	MOTRIZ DOBLE O TANDEM OCHO LLANTAS	C-R y T-S-R	18,00	17,00	14,50	13,50
		C y T-S	21,00	17,00	14,50	13,50
	TRIPLE TRIDEM DOCE LLANTAS	C-R y T-S-R	23,50	22,50	20,00	NA
		C y T-S	26,50	22,50	20,00	NA

Anexo 6

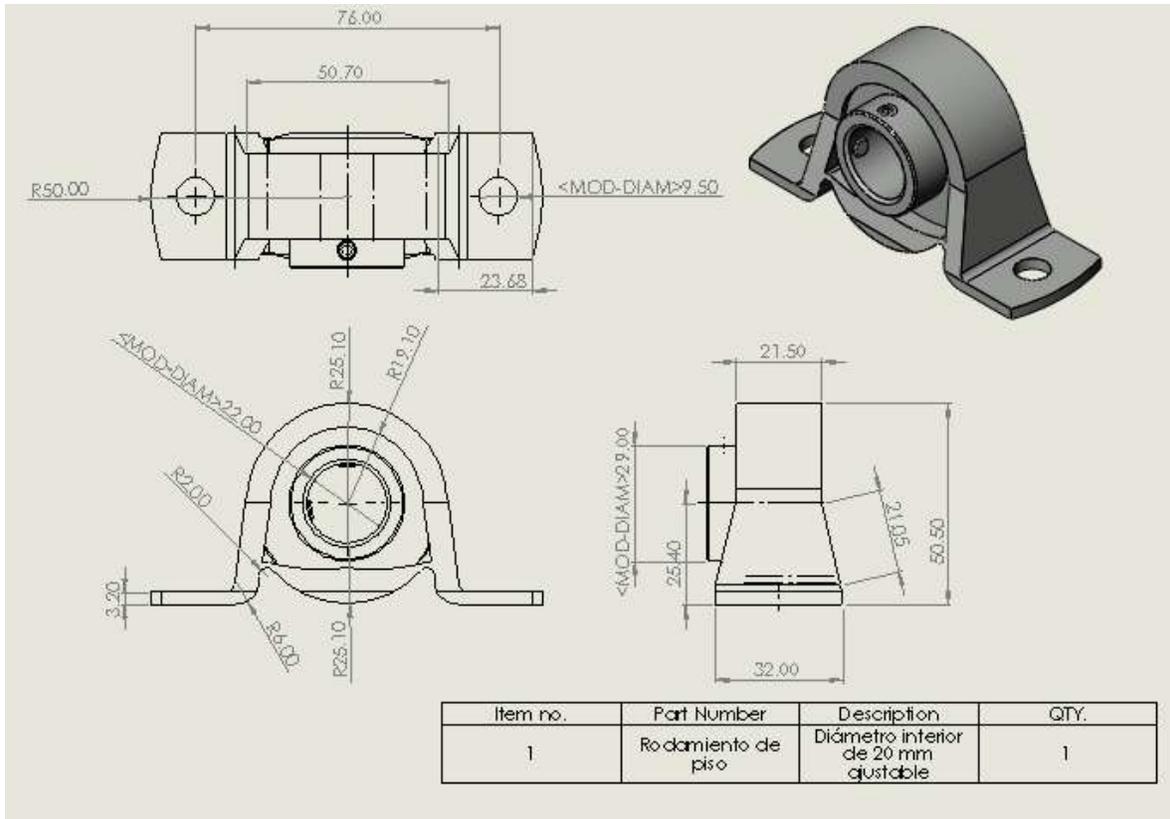




ITEM N.O.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	PedalPTR	PTR 1"x1" Calibre 10	1

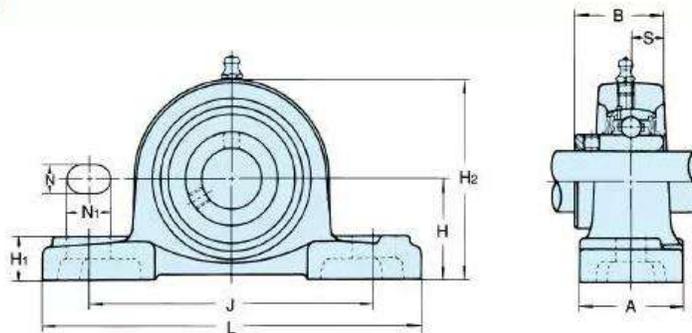


Anexo 7

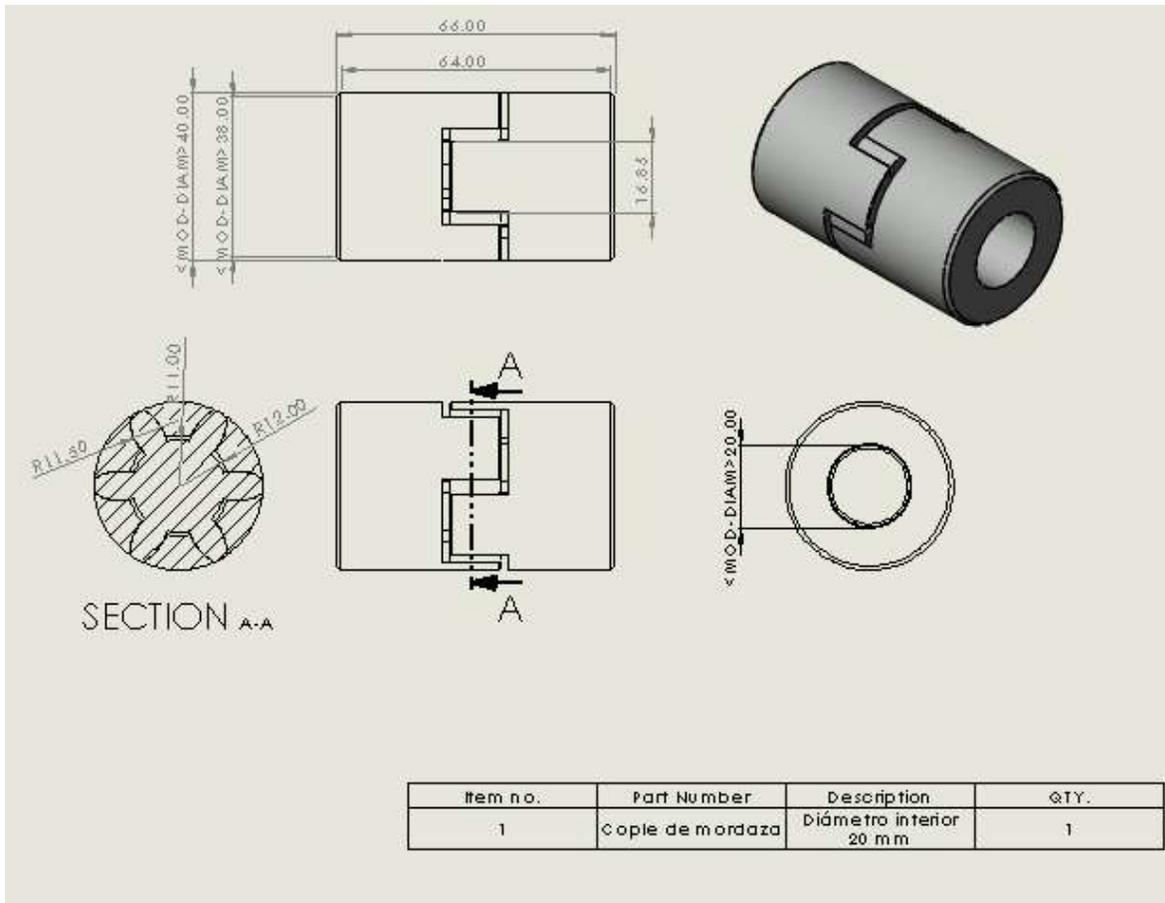


PILLOW BLOCKS

UCP 200 type



Shaft Diam. mm	Unit No.	Dimensions mm										Bolt Size mm	Bearing		Housing No.	Weight kg	
		H	L	J	A	N	N ₁	H ₁	H ₂	B	S		No.	Basic Load Rating kN Cr Cor			
12	UCP 201	30.2	127	95	38	13	19	15	62	31	12.7	M10	UC 201	12.8	6.6	P 203	0.65
15	UCP 202	30.2	127	95	38	13	19	15	62	31	12.7	M10	UC 202	12.8	6.6	P 203	0.63
17	UCP 203	30.2	127	95	38	13	19	15	62	31	12.7	M10	UC 203	12.8	6.6	P 203	0.62
20	UCP 204	33.3	127	95	38	13	19	15	65	31	12.7	M10	UC 204	12.8	6.6	P 204	0.65
25	UCP 205	36.5	140	105	38	13	16	16	70	34.1	14.3	M10	UC 205	14	7.9	P 205	0.79
30	UCP 206	42.9	165	121	48	17	21	18	83	38.1	15.9	M14	UC 206	19.6	11.3	P 206	1.26

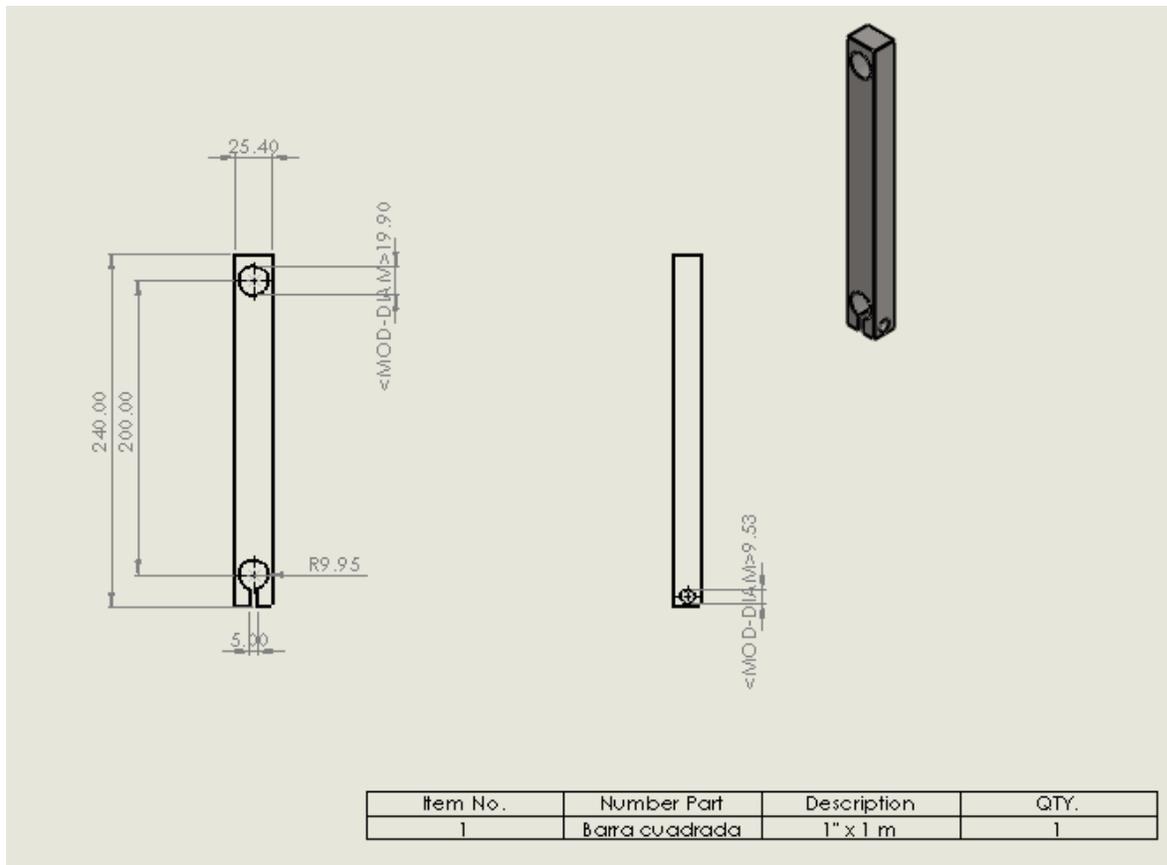


Especificaciones técnicas

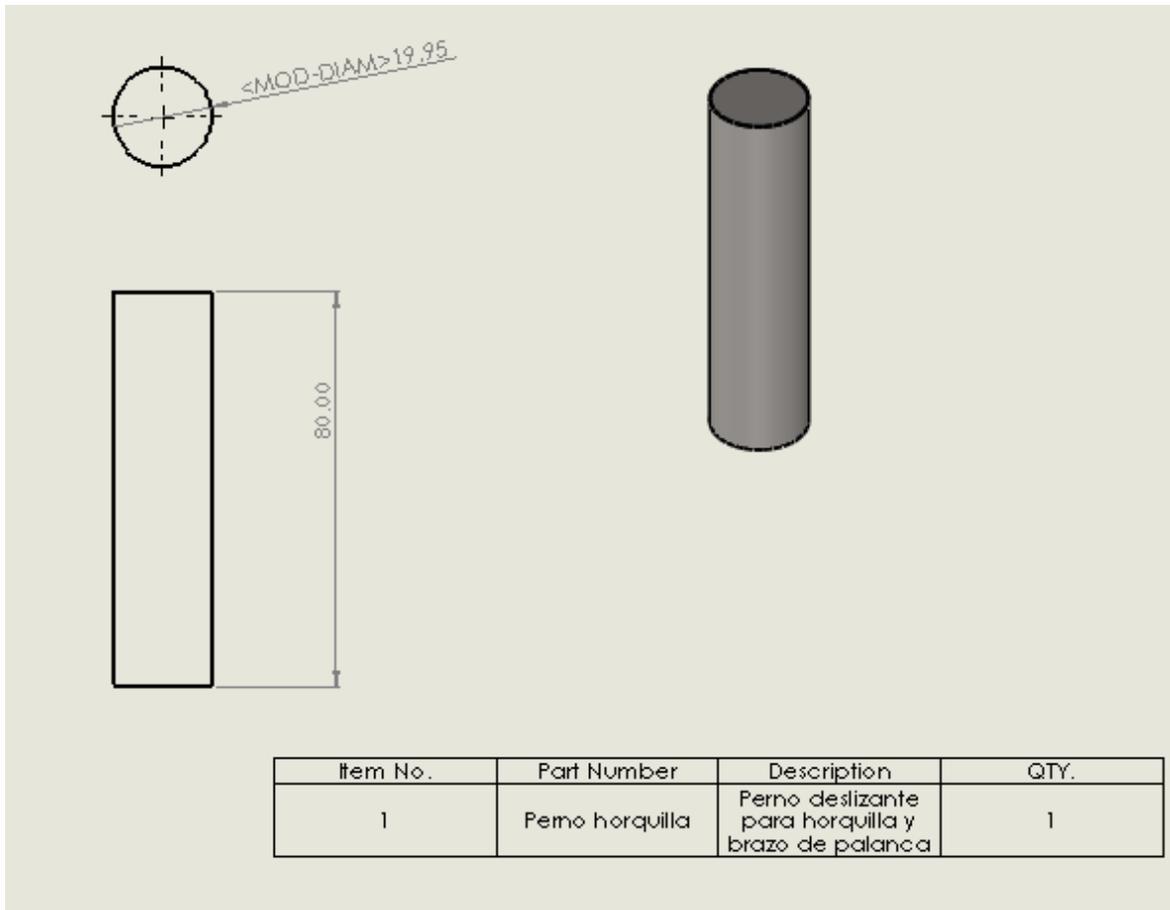
Artículo	Jaw Coupling Hub	Tamaño de Acoplamiento	L100
Material	Sintered Iron	Diámetro del Orificio	20 mm
Diám. Exterior	65mm	Sistema de Medición	Métrico
Ranura de Chaveta (pulg.)	-	Longitud a Través del Orificio	35 mm
Longitud Total (mm)	88.392	Propiedades de Resistencia	Chemical Resistant, Oil Resistant
Longitud Total (pulg.)	-	Tipo Mecanismo de Bloqueo del Eje	Tornillo Opresor
Tamaño	L100	Material del Eje de la Rodaja	Carbon Steel
Ranura de Chaveta	Sí	Diámetro del Eje	64 mm
Ranura de Chaveta (mm)	6.0 x 2.8	Diámetro Exterior	64 mm
Diám. del Orificio	20mm	Tamaño de la Rosca	5/16"-18 UNC 2B
Longitud Total	88mm	Temperatura Mínima de Operación	-35 Degrees C
Tamaño de la Ranura	6mm x 2.8mm	Velocidad Máxima	7,000 RPM
Artículo - Cubo con Acoplador de Mordaza	Jaw Coupling Hub	Proyección del Hub	35 mm
Material - Cubos	Acero Sinterizado	Diámetro de Orificio Máximo	35 mm
Tamaño - Acoplador de Mordaza	L100		

Longitud del Acople de Ensamblaje	89 mm	Número de Pieza del Fabricante del Elemento Central Compatible	L100H, L100N, L100U
Temperatura Máxima de Funcionamiento	121 Degrees C	Perfil de Mandíbula	Straight
Normas	ISO Certified	Longitud Total del Acoplamiento	89 mm
Peso	1 kg	Caballos de Fuerza @ 100 RPM	0.66 hp (Buna-N Spider), 1.0 hp (Urethane Spider), 1.8 hp (Hytrel Spider)
Tipo de Calibre	Round Bore with Keyway	Tornillos Incluidos	Set Screw
Ancho de la Llave	6 mm	Par Máximo para Tipos de Araña	1134 in-lb (Hytrel), 417 in-lb (Buna-N), 626 in-lb (Urethane)
Profundidad de Chaveta	2.8 mm	Número de Tornillos de Bloqueo	1
Tolerancia del Orificio	+0.020/+0.041 mm		

Anexo 9

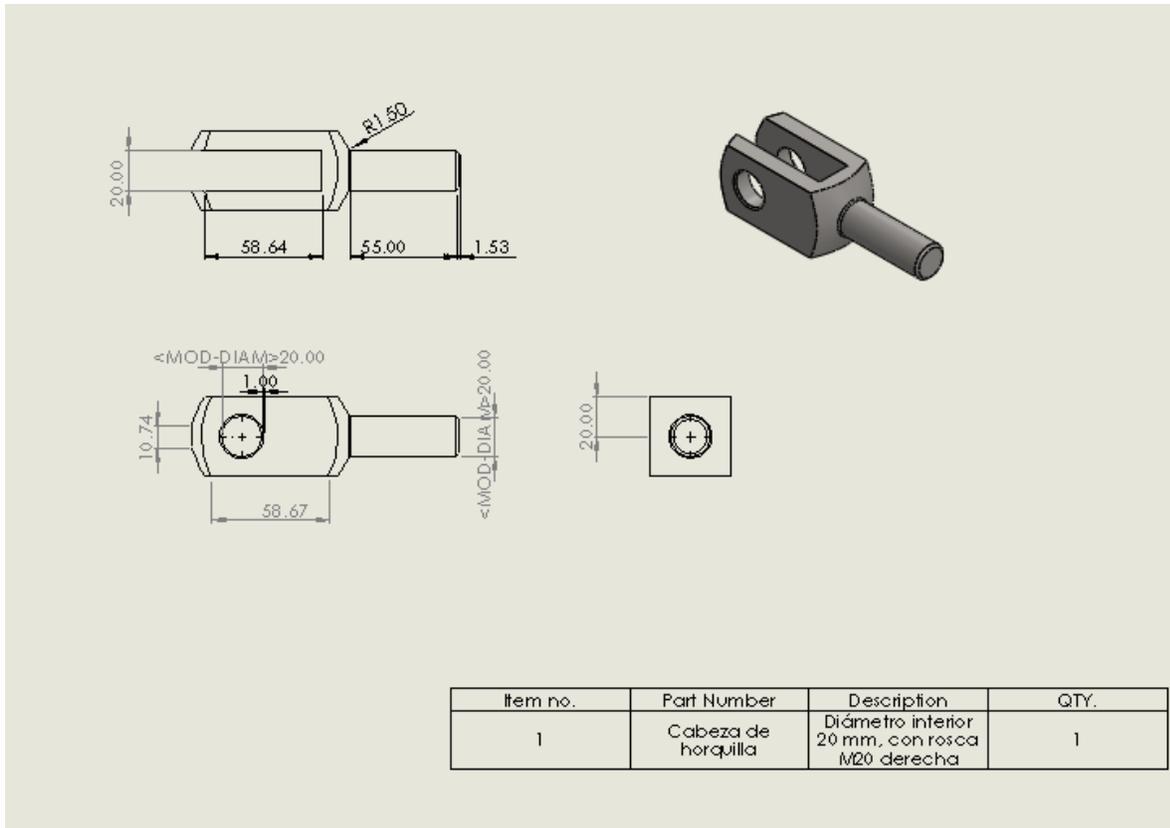


Anexo 10



Item No.	Part Number	Description	QTY.
1	Perno horquilla	Perno deslizante para horquilla y brazo de palanca	1

Anexo 11



▼ Descripción del artículo/Imágenes del producto



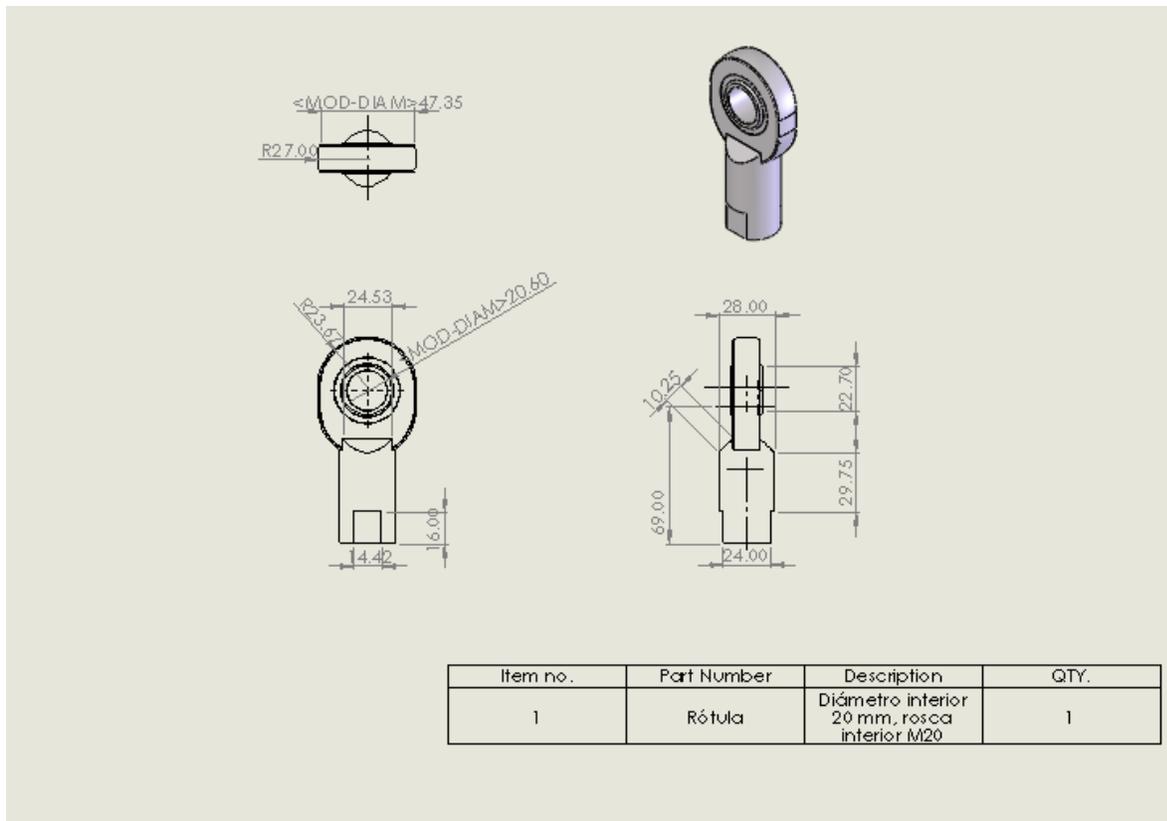
Descripción

Material:
Acero o acero inoxidable 1.4301.

Versión:
Acero galvanizado.
Acero inoxidable con acabado natural.

Características especiales:





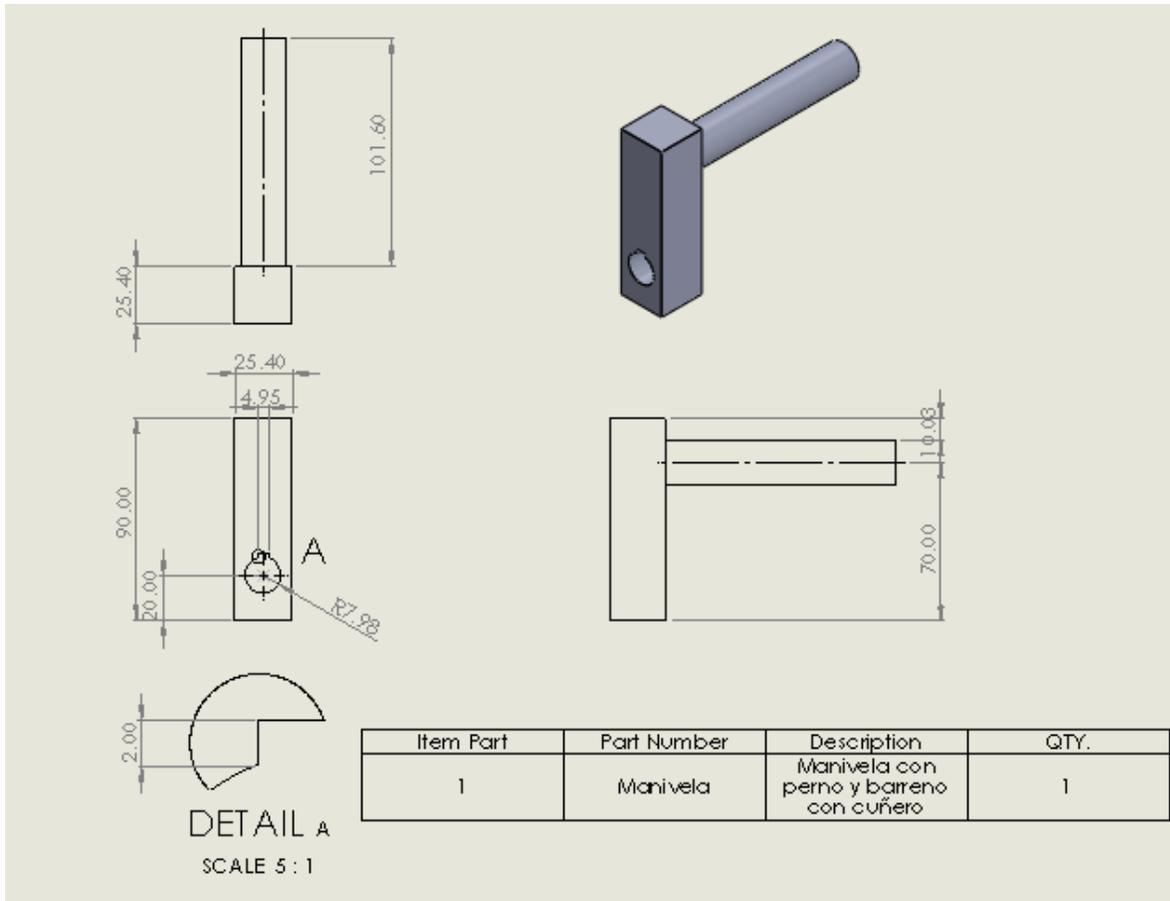
Dimensiones

Diámetro del agujero del aro interior del rodamiento	20 mm
Diámetro exterior/ojo del soporte	54 mm
Ancho del aro interior del rodamiento	16 mm
Designación de la rosca	M 20x1.5
Ancho del ojo del soporte	13.5 mm
Altura del centro, soporte (desde el extremo del vástago)	77 mm
Longitud del soporte, total	106 mm

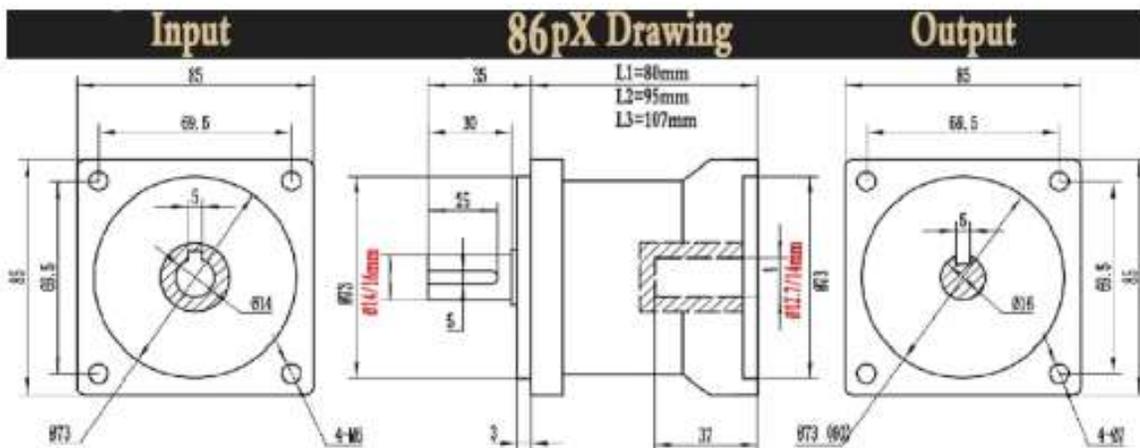
Rendimiento

Capacidad de carga dinámica básica	30 kN
Capacidad de carga estática básica	57 kN

Anexo 13

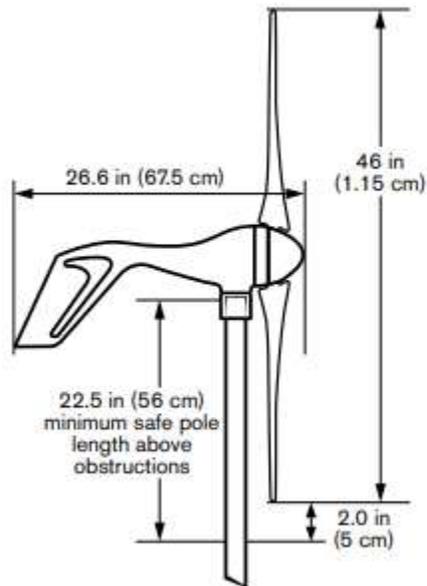


Anexo 14



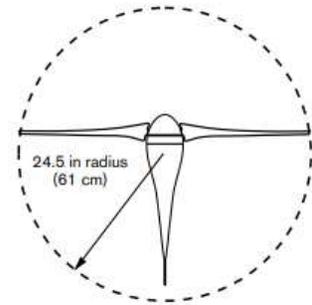
86PX Reducer Technical Parameters			
Stage	Stage 1 (L1)	Stage 2(L2)	Stage 3(L3)
Speed Ratio	3/4/5/6/8/10	15/20/24/30/ 36/40/50/60	100/120/150/200
Input (MM)	12.7/14	12.7/14	12.7/14
Output shaft (MM)	16/14	16/14	16/14
Keyway (MM)	5	5	5
Body length (MM)	80	95	107
Rated load (N.M)	30	50	60
Maximum load (N.M)	50	80	100
Full load efficiency (%)	95	90	85
Backlash Precision (arcmin)	≤ 18	≤ 25	≤ 35
Rated Input speed (RPM)	≤ 3000	≤ 3000	≤ 3000
Protection level (IP)	65	65	65
Noise (dB)	≤ 60	≤ 60	≤ 60
Average service life (H)	≈20000	≈20000	≈20000

Anexo 15



Air Breeze Technical Specifications

Model	Air Breeze
Weight	13 lb / 6 kg
Rotor Diameter	46 in / 1.17 m
Start Up Wind Speed	6 mph / 2.7 m/s
Kilowatt Hours/month	38 kWh/month @ 12 mph / 5.4 m/s avg. wind speed
Maximum Wind Speed	110 mph
Rated Power	160 watts @ 28 mph / 12.5 m/s wind speed
Certifications	CSA (certificate 1954979)
Operating Temperature Range	Air Breeze is certified under IEC requirements applying to the temperature range 14° F (-10° C) to 104° F (40° C)



Anexo 16

Technical drawing of a generator base. The drawing includes a top view, a front view, and an isometric view. Dimensions are provided in millimeters:

- Top view: Overall width 140.00, overall height 150.00. Four mounting holes are spaced 84.60 apart vertically and 100.00 apart horizontally. A dimension of 20.00 is shown from the top edge to the top of the holes. A note indicates a minimum diameter: $\leq \text{MOD-DIAM} > 10.95$.
- Front view: Overall height 177.00, overall width 140.00. A dimension of 25.40 is shown from the top edge to the top of the mounting holes. A note indicates a minimum diameter: $\leq \text{MOD-DIAM} > 117.00$.
- Isometric view: Shows the base with a circular hole and a mounting flange.

Part Number	Item	Description	QTY.
1	Base para generador	Acoplamiento con saque de 8 mm. Barrenos para tornillos	1

Anexo 17

