

**EVALUACION TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA VIABILIDAD DE
IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE COSECHAMIENTO DE ENERGÍA
PARA EL APROVECHAMIENTO DEL FLUJO VEHICULAR**

ALONSO DAVID CARRILLO NIETO



unab

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA INGENIERÍA EN ENERGÍA

BUCARAMANGA

2016

**EVALUACION TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA VIABILIDAD DE
IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE COSECHAMIENTO DE ENERGÍA
PARA EL APROVECHAMIENTO DEL FLUJO VEHICULAR**

ALONSO DAVID CARRILLO NIETO

Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero en Energía

Director: Yecid Alfonso Muñoz Maldonado (PhD)

Asesor: Sebastián Roa Prada (PhD)

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA INGENIERÍA EN ENERGÍA

BUCARAMANGA, COLOMBIA

2016

Nota de aceptación

Firma Director de proyecto de grado

Firma Asesor de proyecto de grado

Firma calificador

Bucaramanga, 2016.

A mis padres, hermanas y a Dios, de quienes sentí su apoyo incondicional a lo largo de mi carrera profesional.

AGRADECIMIENTOS

A mi director de proyecto de grado, Yecid Muñoz el cual depositó su confianza en mí para el desarrollo de este proyecto de investigación.

Al co-director Sebastián Roa, quien siempre estuvo pendiente para asesorarme de forma positiva en la realización del proyecto.

Al profesor Luis Eduardo Jaimes el cual me apoyo en muchos momentos de la carrera.

A Marvin Torres, quien durante toda la carrera me apoyo en distintas situaciones.

Agradezco igualmente a todos mis compañeros, quienes siempre estuvieron a mi lado y contribuyeron a la culminación de esta importante etapa.

CONTENIDO

OBJETIVOS.....	10
Objetivo General.....	10
Objetivos específicos.....	10
RESUMEN.....	11
ABSTRACT.....	12
INTRODUCCIÓN.....	13
1. MARCO CONCEPTUAL.....	14
1.1 COSECHAMIENTO DE ENERGÍA “ENERGY HARVESTING”.....	14
1.1.1 Fuentes comunes en la cosecha de energía.....	15
1.1.2 Principales elementos en un sistema de cosechamiento de energía..	22
1.2 COSECHAMIENTO DE ENERGÍA MEDIANTE PIEZOELECTRICIDAD..	23
1.2.1 Efecto piezoeléctrico directo.....	23
1.2.2 Efecto piezoeléctrico inverso.....	24
1.2.3 Materiales piezoeléctricos.....	27
1.2.4 Ecuaciones constitutivas del efecto piezoeléctrico.....	28
1.3 COSECHAMIENTO DE ENERGÍA MEDIANTE TECNOLOGÍA ELECTROMAGNÉTICA.....	31
1.3.1 Principios básicos.....	32
1.3.2 Materiales magnéticos.....	32
1.3.3 Escala de los generadores electromagnéticos.....	33
2. ESTADO DEL ARTE.....	34
2.1 TECNOLOGIAS BAJO ASFALTO.....	34
2.1.1 INNOWATECH.....	34
2.1.2 ABACCUS.....	36

2.1.3	TREEVOLT	37
2.2	DISPOSITIVOS “ENERGY HARVESTING” REDUCTORES DE VELOCIDAD	38
2.2.1	Dispositivo “LYBRA”	38
2.2.2	Rampa fabricada por empresa New Energy Technologies, Inc.	39
2.2.3	Generación de energía mediante el uso de generadores magnetoeléctricos aprovechando el tráfico vehicular	41
2.2.4	Diseño y optimización de reductor de velocidad por medio de generador tubular	43
2.2.5	Reductor de velocidad cosechador de energía mediante volante de inercia	45
2.2.6	Generación de electricidad mediante rodillos unidos por cadenas en reductor de velocidad	48
2.2.7	Generación de potencia utilizando la energía cinética desperdiciada por rotación de tambor	50
2.2.8	Rampa para la generación de energía eléctrica mediante la energía cinética.....	52
3.	SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA	54
3.1	COMPARACIÓN TECNOLOGÍAS BAJO PAVIMENTO.....	54
3.2	COMPARACIÓN TECNOLOGÍAS COMO REDUCTORES DE VELOCIDAD	54
4.	SELECCIÓN DEL LUGAR DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA ..	57
4.1	FLUJO VEHICULAR	57
4.2	UBICACIÓN DEL SISTEMA	62
5.	PRODUCCIÓN ENERGÉTICA Y FACTIBILIDAD ECONÓMICA.....	64
5.1	METODOLOGÍA	64

5.1.1	Energía producida por año	64
5.1.2	Factibilidad económica del proyecto	65
5.2	DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA	65
6.	PROTOTIPO DEMOSTRATIVO	69
6.1	EXPLICACIÓN DEL PRINCIPIO	69
6.2	MATERIALES UTILIZADOS	70
6.3	RESULTADOS	71
	CONCLUSIONES	82
	RECOMENDACIONES	83
	BIBLIOGRAFÍA.....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Celdas solares fotovoltaicas	16
Figura 2. Aerogeneradores de eje vertical	18
Figura 3. Aerogenerador de eje vertical	18
Figura 4. Energía mareomotriz	19
Figura 5. Sistema de energía undimotriz	20
Figura 6. Central Maremotérmica	21
Figura 7. Elementos de un sistema de cosechamiento de energía.....	22
Figura 8. Efecto piezoeléctrico directo	24
Figura 9. Mono-cristal	25
Figura 10. Poli-cristal	25
Figura 11. Poli-cristal sometido a campo eléctrico.....	26
Figura 12. Alineación de dipolos	26
Figura 13. Efecto Piezoeléctrico inverso.....	27
Figura 14. Clasificación numérica de los ejes	30
Figura 15. Representación matricial	30
Figura 16. Instalación del sistema INNOWATECH en vías terrestres.....	35
Figura 17. Instalación de dispositivos de Innowattech en vías de ferrocarril.	36
Figura 18. Dispositivos instalados de Treevolt.....	37
Figura 19. Dispositivos LYBRA.....	39
Figura 20. Dispositivo MOTION POWER.....	40
Figura 21. Esquema del dispositivo reductor de velocidad	42
Figura 22. Esquema del sistema básico de generación del dispositivo	42
Figura 23. Diagrama del dispositivo generador tubular.....	44
Figura 24. Prototipo experimental usado en el banco de pruebas	44
Figura 25. Dispositivo implementado en escala real.....	45
Figura 26. Diagrama de bloques del sistema con volante de inercia	46
Figura 27. Vehículo pasando por el sistema reductor de velocidad.....	47

Figura 28. Reductor de velocidad con rodillos	49
Figura 29. Prototipo implementado a escala real.....	50
Figura 30. Esquema del modelo principio de rotación de tambor	51
Figura 31. Estructura de la "Electro Kinetic Road Ramp"	52
Figura 32. Diagrama de procesos "Electro Kinetic Road Ramp"	53
Figura 33. Carrera 33 con calle 63 y Carrera 21 con calle 56.....	58
Figura 34. Carrera 15 con calle 3.....	58
Figura 35. Carrera 33 con calle 63.....	62
Figura 36. Diseño del prototipo en CAD	70
Figura 37. Materiales utilizados para el desarrollo del prototipo	70
Figura 38. Prototipo demostrativo	71
Figura 39. Voltaje generado por el prototipo	72
Figura 40. Corriente generada por el prototipo	73
Figura 41. Potencia generada por el prototipo	74
Figura 42. Voltaje generado por motocicleta de 96 Kgs	76
Figura 43. Corriente generada por motocicleta de 96 Kgs.....	77
Figura 44. Potencia generada por motocicleta de 96 Kgs	78
Figura 45. Voltaje generado por motocicleta de 230 Kgs	79
Figura 46. Corriente generada por motocicleta de 230 Kgs.....	80
Figura 47. Potencia generada por motocicleta de 230 Kgs	81

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Fuentes comunes en cosechamiento de energía	15
Tabla 2. Comparación materiales cerámicos y polímeros	28
Tabla 3. Variables de las ecuaciones constitutivas piezoeléctricas	29
Tabla 4. Notación de Voigt.....	31
Tabla 5. Propiedades electromagnéticas	33
Tabla 6. Comparación de dispositivos reductores de velocidad generadores de energía.....	55
Tabla 7. Datos del conteo carrera 21 con calle 56.....	59
Tabla 8. Datos del conteo carrera 33 con calle 63.....	59
Tabla 9. Datos del conteo carrera 15 con calle 3.....	59
Tabla 10. Conteo de vehículos por día carrera 21 con calle 56.....	60
Tabla 11. Conteo de vehículos por día carrera 33 con calle 63.....	60
Tabla 12. Conteo de vehículos por día carrera 15 con calle 3.....	61
Tabla 13. Paso de vehículos por zona diariamente	61
Tabla 14. Payback de la implementación del sistema	67
Tabla 15. Ganancias obtenidas por la implementación del sistema.	68

OBJETIVOS

Objetivo General

Realizar una evaluación técnica y económica de la viabilidad del uso de un sistema de cosechamiento de energía en una vía terrestre.

Objetivos específicos

- Realizar una revisión del estado del arte de los sistemas de cosechamiento de energía, en aplicaciones vehiculares.
- Evaluar el sistema más factible técnicamente para incorporar en vías terrestres.
- Analizar flujos vehiculares en zonas de mayor tráfico, para determinar la ubicación del sistema.
- Evaluar cuantitativamente la producción energética del sistema en el punto seleccionado
- Evaluar la factibilidad económica para la determinación de la viabilidad.
- Prototipo demostrativo de la tecnología seleccionada.

RESUMEN

Este proyecto de investigación busca evaluar la viabilidad de la implementación de un sistema de cosechamiento de energía en una zona específica de la ciudad de Bucaramanga, mediante el uso de la tecnología piezoeléctrica o tecnología electromagnética, aprovechando el flujo vehicular que se concentra en determinados puntos de la ciudad.

Dentro de la investigación se llevará a cabo la revisión del estado del arte de las tecnologías usadas para el desarrollo de sistemas de cosechamiento de energía en vías terrestres, y con el resultado de esta revisión se realizará un análisis comparativo entre las tecnologías para determinar cuál de estas resulta más factible para implementar en el contexto de la zona.

Se realizará la evaluación del flujo vehicular en Bucaramanga, con el fin de determinar los puntos estratégicos para la ubicación del sistema de cosechamiento de energía y de esta forma seleccionar la zona en la que se llevará a cabo el estudio planteado. Teniendo como base el análisis realizado, se evaluará la producción energética que se obtendría en el punto seleccionado mediante el conteo de vehículos, y posteriormente se evaluará la factibilidad económica para determinar la viabilidad para realizar la inversión para la implementación de este sistema en el punto seleccionado.

Finalmente se procederá a concluir los resultados que arrojó esta evaluación de viabilidad para la implementación del sistema de cosechamiento de energía, y a su vez proponer mejoras al sistema que lo hagan viable, en caso de que el resultado de la evaluación de viabilidad sea negativo.

PALABRAS CLAVE

Piezoelectricidad, electromagnetismo, energía eléctrica, generación.

ABSTRACT

This research project seeks to evaluate the viability of implementing an Energy Harvesting system in a specific area of Bucaramanga, by the use of piezoelectric technology or electromagnetic technology, taking advantage of the vehicular flow that is concentrated in certain points of the city.

In the research will be conducted the review of the state of the art of technologies used for the Energy harvesting devices development in land routes, and the result of this review a comparative analysis between the technologies will be conducted to determine which of these is more feasible to implement in the context of the area.

The evaluation of traffic flow in Bucaramanga will be conducted in order to determine the strategic points for the Energy Harvesting system location and then select the area in which the proposed study will take place. Based on the analysis performed, we will evaluate the energy production at the selected point by counting vehicles, and then the economic feasibility will be evaluated to determine the viability to realize the investment for the implementation of this system in the selected point.

Finally, we will conclude the results of this feasibility assessment for the implementation of the energy harvesting system, and propose improvements to the system that make it feasible, in case the result of the feasibility evaluation is negative.

KEY WORDS

Piezoelectricity, electromagnetism, electric power, generation.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se ha intensificado la búsqueda de nuevas fuentes para la generación de energía, ya que cada vez es más notoria la escasez y la alta contaminación que se produce con la utilización de los recursos convencionales; la mayoría de países invierten una importante suma en la investigación científica de fuentes alternativas de energía, ya que estas en un futuro son las que aportaran en gran medida al sistema eléctrico.

Los sistemas “Energy Harvesting” o de cosechamiento de energía son dispositivos o sistemas que almacenan las distintas formas de energía presentes en el ambiente en pequeñas cantidades, para luego poder ser aprovechadas en distintas aplicaciones según los requerimientos.

En las principales ciudades del país al igual que en Bucaramanga se presenta un gran flujo vehicular a diferentes horas del día, el cual puede ser aprovechado de forma óptima mediante un sistema de cosechamiento de energía “Energy Harvesting” en carretera. La velocidad cinética que tiene el vehículo cuando está en movimiento, la tensión y fricción del automóvil con el pavimento, o la velocidad cinética que se pierde en el momento del frenado al instante en el que pasa por algún reductor de velocidad es la que se busca no desperdiciar con la implementación de estos sistemas. Tanto el efecto piezoeléctrico como el electromagnético, son los más utilizados para el desarrollo de tecnologías destinadas al almacenamiento de energía en carreteras.

A lo largo de la historia se han desarrollado prototipos e investigaciones con respecto al tema, tanto dispositivos reductores de velocidad, como tecnologías instaladas bajo asfalto; cada investigación tiene un principio de funcionamiento y características diferentes de generación de energía los cuales se verán reflejados en este trabajo de investigación a manera de comparación entre cada uno de ellos, para así determinar el más factible en la ciudad.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1 COSECHAMIENTO DE ENERGÍA “ENERGY HARVESTING”

El cosechamiento de energía o “Energy Harvesting” es el proceso de captura de pequeñas cantidades de energía de fuentes naturales, esta energía posteriormente es acumulada y almacenada para su posterior uso según la aplicación específica. Los sistemas cosechadores de energía dependen de dispositivos encargados de almacenar, acumular, acondicionar y administrar de forma efectiva esta energía y suministrarla de tal modo que pueda ser utilizada para alguna tarea específica según los requerimientos.

Igualmente, un módulo cosechador de energía es un dispositivo electrónico que tiene como función realizar todas las mencionadas funciones para proveer energía a una variedad de circuitos sensores y de control para aplicaciones con intermitencia.

La cosecha de energía de fuentes naturales para implementarse en aplicaciones remotas, y sobre todo cuando tales fuentes son prácticamente inagotables, está siendo cada vez más una alternativa atractiva comparándola con los inconvenientes contactos eléctricos o con baterías muy costosas. Esta fuente de energía es básicamente gratis cuando está diseñada e instalada apropiadamente; está disponible con un mantenimiento virtualmente sin costo y con los recientes diseños está disponible a lo largo de toda la vida útil de los dispositivos o equipos donde se aplica. Estos sistemas pueden ser más confiables que los contactos o las baterías.

Asimismo, el cosechamiento de energía puede ser utilizado como una fuente de energía alternativa para complementar cualquier fuente de poder principal, para mejorar la confiabilidad del todo el sistema y prevenir interrupciones por falta de energía [1], [2], [3].

1.1.1 Fuentes comunes en la cosecha de energía

Las fuentes usadas o aprovechadas de manera significativa en la actualidad para el cosechamiento de energía o “Energy Harvesting” se pueden apreciar en la tabla 1:

Tabla 1. Fuentes comunes en cosechamiento de energía

Energía Mecánica	Vibración, tensión, presión mecánica.
Energía Térmica	Energía residual de hornos, calentadores, fuentes de fricción.
Energía Lumínica	Captura de luz solar, o luz de interiores.
Energía Electromagnética	Inductores, bobinas o transformadores.
Energía Natural	Viento, flujos de agua, corrientes oceánicas.
Cuerpo Humano	Combinación de energía térmica y mecánica.
Otras	Proveniente de fuentes químicas o biológicas.

Vale la pena resaltar que todas estas fuentes de energía naturalmente son ilimitadas y esto permite aprovecharlas tantas veces como se necesiten sin peligro alguno de agotarlas.

Existen diversas formas de aprovechamiento de estas fuentes, entre las cuales están:

1.1.1.1 Energía mecánica

Cuando un dispositivo es sujeto a vibración, un tipo de masa inerte se puede usar para crear movimiento, el cual puede ser aprovechado para convertirlo en energía eléctrica.

Mediante mecanismos piezoeléctricos, electrostáticos y electromagnéticos se puede dar esta conversión.

1.1.1.2 Energía Térmica

Los generadores térmicos se rigen por el principio de la termoelectricidad para producir la energía eléctrica requerida, el cual es un fenómeno en el cual se usan diferencias de temperatura para generar potencial eléctrico. La energía térmica es almacenada para transformarla en energía eléctrica, y de este modo usarla en dispositivos electrónicos.

La generación termoeléctrica es una tecnología que tiene la capacidad de producir energía eléctrica a partir de fuentes de calor residual, por lo que supone una oportunidad de recuperación energética tanto en grandes sistemas industriales, como en edificios de viviendas. Solo entre un 35 y un 40% de la energía destinada a los diferentes procesos es empleada para su fin y el resto se emite al ambiente en forma de calor residual [4].

1.1.1.3 Energía lumínica

Las celdas fotovoltaicas son aquellos dispositivos los cuales convierten la energía lumínica en energía eléctrica. Comúnmente la luz solar es la más utilizada para esta conversión.



Fuente: Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) – Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE)

Figura 1. Celdas solares fotovoltaicas

El uso de celdas fotovoltaicas es muy común en zonas las cuales tienen el recurso solar garantizado la mayor parte del tiempo, y el costo de las baterías no es tan elevado [5].

1.1.1.4 Energía Natural

La energía proveniente de la naturaleza en la actualidad puede ser aprovechada como se reporta a continuación, hay maneras de aprovechamiento tanto del viento como del agua para la cosecha de energía.

1.1.1.4.1 Aprovechamiento del viento:

Las máquinas eólicas funcionan con la fuerza del viento, la cual produce el accionar de las palas fijadas a un buje. Las palas y el buje constituyen el rotor. Igualmente, el buje está conectado a un primer eje el cual es llamado eje de baja velocidad, el cual gira a la misma velocidad angular que el rotor.

Este eje de baja velocidad está conectado a un dispositivo multiplicador de giros, del cual sale un eje de alta velocidad que gira a una mayor velocidad. En el eje de mayor velocidad hay un generador eléctrico que produce la energía eléctrica canalizada por los cables al sistema de cosechamiento o a la red.

En la actualidad existen diferentes configuraciones de turbinas eólicas, las cuales pueden ser de: monopala, bipala, multipala. La relación que existe es que el aumento del número de palas disminuye la velocidad de rotación, aumenta el rendimiento del aerogenerador y así mismo encarece el precio de estas.

Los aerogeneradores se dividen en dos grupos según su eje de rotación: los de eje horizontal, los cuales son mayormente utilizados y eficientes, y los aerogeneradores de eje vertical [6].



Fuente: Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) – Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE)

Figura 2. Aerogeneradores de eje vertical



Fuente: Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) – Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE)

Figura 3. Aerogenerador de eje vertical

1.1.1.4.2 Energías Oceánicas:

La energía mareomotriz, es la energía obtenida debido al aprovechamiento de las mareas, mediante su acoplamiento a un alternador el cual es usado para la generación de electricidad, transformando así la energía mareomotriz en energía

eléctrica para de este modo poder ser almacenada. La imagen 4 permite observar el aprovechamiento de esta energía.

Existen tres métodos de generación mediante la energía mareomotriz:

- Los generadores de corriente de marea: quienes hacen uso de la energía cinética presente en el agua en movimiento a las turbinas.
- Las presas de marea: hacen uso de la diferencia de altura entre mareas altas y bajas para generar un potencial de energía.
- La energía mareomotriz dinámica: la cual es una tecnología de generación que explota la interacción entre la energía cinética y la energía potencial presentes en las corrientes de marea.



Fuente: Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) – Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE)

Figura 4. Energía mareomotriz

La energía undimotriz es aquella que es obtenida de las olas del mar, las cuales se generan por el efecto del viento sobre la superficie de los mares y océanos [7], [8].

Existen tres tecnologías actualmente para el aprovechamiento y almacenamiento de esta energía:

- El sistema denominado “Pelamis”, el cual se compone de cilindros que flotan unidos por un tipo de articulaciones. El movimiento de estos cilindros el cual

lo resisten las articulaciones genera energía, la cual es aprovechada para el bombeo de aceite de alta presión a los acumuladores.

- Las boyas o columnas de agua oscilante. El sistema consiste en que cuando se produce el movimiento de una ola, gran volumen de agua impulsa un pistón en un cilindro lo cual hace que se fuerce a que el aire suba o baje. Este aire que es desplazado conlleva al giro de una turbina en la parte superior de 1,5 MW de potencia.
- “Oyster”. Este sistema consiste en que una máquina en forma de almeja se ancla al fondo del mar, aproximadamente a unos 10 metros del nivel de la superficie. Este brazo al abrirse actúa como un péndulo en respuesta al movimiento del océano.

En la figura 5 se observa un sistema de aprovechamiento de energía undimotriz en funcionamiento.



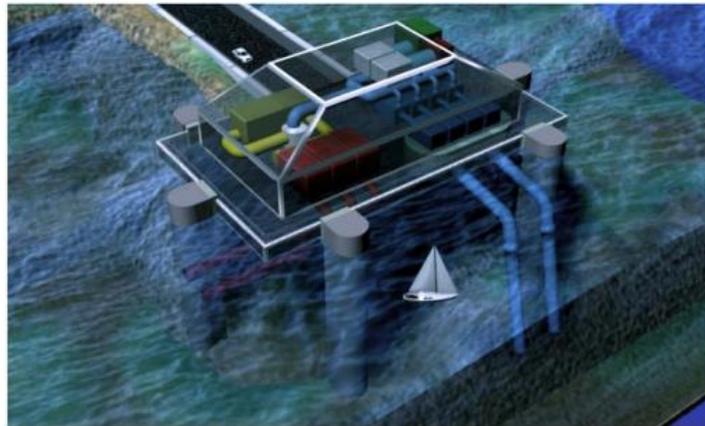
Fuente: Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) – Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE)

Figura 5. Sistema de energía undimotriz

La energía maremotérmica consiste en el aprovechamiento de los gradientes térmicos presentes en las aguas del océano, el cual se lleva a cabo en las denominadas plantas maremotérmicas.

En estas se lleva a cabo la transformación de la energía térmica presente en el mar en energía eléctrica, mediante un ciclo termodinámico denominado Rankine. Se emplea el calor para evaporar un líquido, el cual es utilizado para activar una turbina, la que se acopla a un generador para producir la energía eléctrica. [9]

En la figura 6, se observa una central maremotérmica.



Fuente: Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) – Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE)

Figura 6. Central Maremotérmica

1.1.1.5 Energía producida por el cuerpo humano

A través de diferentes estudios y mediciones realizadas anteriormente, se arrojaron resultados de que según la parte del cuerpo humano se tienen diferentes voltajes y corrientes, los cuales rondan entre 10 y 100 mili Volts, y entre los 10 y 30 mili Amperes, lo cual no resulta llamativo.

La disipación de calor del cuerpo, junto con la rotación de articulaciones, el peso, el desplazamiento vertical de centros de masa, las deformaciones de tejidos, al ser

combinadas con actividades cotidianas o con fenómenos metabólicos, se ha abierto una gran oportunidad para los “Energy Harvesting” como fuente de potencia móvil, inclusive para implantes en el campo de la medicina que requieran de energía eléctrica para su funcionamiento, los cuales podrían obtener una mayor autonomía al ser recargados permanentemente [10].

1.1.2 Principales elementos en un sistema de cosechamiento de energía

Un sistema de cosechamiento de energía, requiere de las fuentes mencionadas anteriormente para su funcionamiento, pero también requiere de unos elementos clave o principales los cuales son:

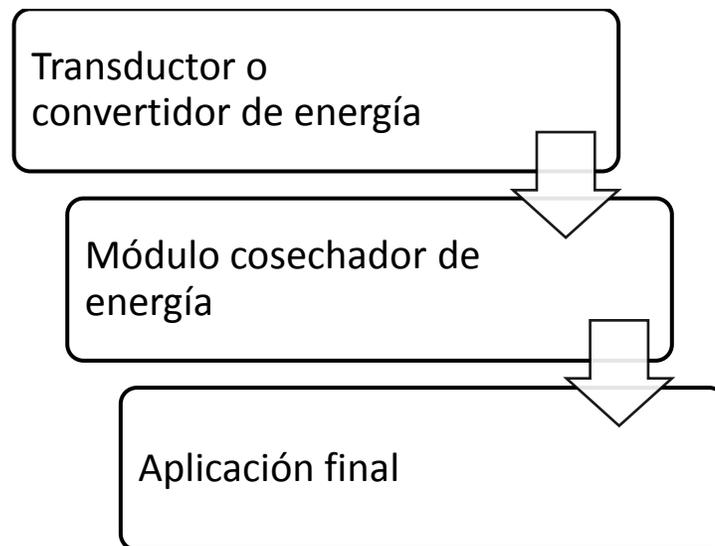


Figura 7. Elementos de un sistema de cosechamiento de energía

Los transductores que nos permiten aprovechar la energía mecánica o vibraciones que se producen en una malla vial son los dispositivos piezoeléctricos. Teniendo en cuenta la orientación del proyecto y la investigación realizada en los sistemas de cosechamiento de energía para aprovechamiento de flujo vehicular, pudimos

determinar que la tecnología piezoeléctrica junto con la electromagnética son las más adecuadas para el aprovechamiento óptimo del mismo, puesto que aprovechan las cantidades de energía producidas por los vehículos al pasar por ciertos dispositivos lo cual se verá reflejado en el siguiente capítulo [2].

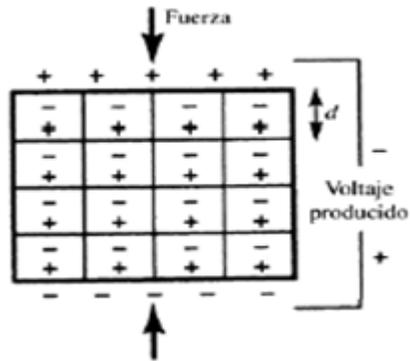
1.2 COSECHAMIENTO DE ENERGÍA MEDIANTE PIEZOELECTRICIDAD

El fenómeno de la piezoelectricidad fue descubierta en 1880 por los hermanos Jacques y Pierre Currie. Descubrieron que cuando se le aplicada cierta tensión a algunos materiales o cristales como la turmalina, el cuarzo, el topacio y la sal Rochele, en ellos aparecía una diferencia de potencial en sus extremos y por lo tanto una carga eléctrica en su superficie, su voltaje eléctrico era directamente proporcional a la tensión a la cual eran sometidos.

1.2.1 Efecto piezoeléctrico directo

El fenómeno o efecto piezoeléctrico directo consiste en la aplicación esfuerzos de compresión o tensión sobre el material o cristal, y por consiguiente se da la reducción de la distancia entre los dipolos unitarios del material, por lo cual, se reduce el momento dipolar global por unidad de volumen del material. Este cambio en el material piezoeléctrico consigue que haya una variación en la densidad de carga en los extremos del cristal y de este modo se cambia esta diferencia de potencial en los extremos, si están aislados uno del otro.

En la imagen que se observa a continuación se representa gráficamente el efecto piezoeléctrico directo el cual fue descrito anteriormente:



Fuente: Centro de Estudios en Medio Ambiente y Energías Renovables (CEMAER)

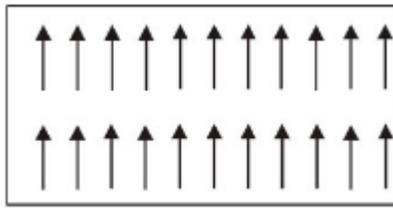
Figura 8. Efecto piezoeléctrico directo

1.2.2 Efecto piezoeléctrico inverso

El efecto piezoeléctrico inverso ocurre cuando el cristal es sometido a un campo eléctrico y en este ocurre una deformación mecánica, en el cual el material se contrae o se expande. Este efecto se forma con cristales que no tienen un centro de simetría.

Cada molécula por la que se compone un cristal tiene una diferente polarización, un extremo positivo y el otro negativo a lo cual se le conoce como dipolo. Esto es debido a la composición de la molécula y en la forma en que estas se forman. La línea imaginaria que se puede decir que atraviesa el cristal en el centro de estas dos cargas se le conoce como el eje polar.

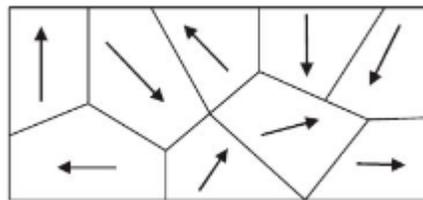
Existen dos tipos de cristales según sus ejes polares que son los mono-cristales y los poli-cristales. Se dice que un mono-cristal es simétrico debido a que si se llegara a cortar en algún punto el cristal, sus ejes polares después del corte irían en la misma dirección que iban antes de ser cortados; sus dipolos van en una sola dirección (Figuras 9 y 10)[11].



Fuente: Centro de Estudios en Medio Ambiente y Energías Renovables (CEMAER)

Figura 9. Mono-cristal

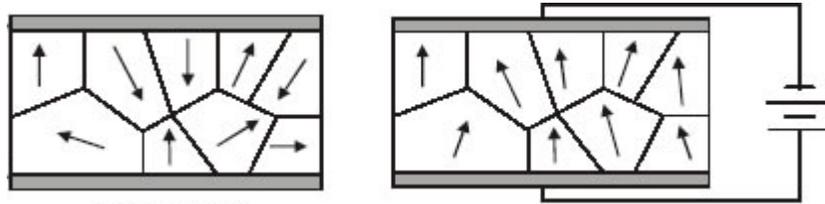
Por su parte un poli-cristal se dice que es totalmente asimétrico esto debido a que no existe algún punto en el cual este pueda ser cortado y el eje polar resultante sea el mismo en ambas piezas. Esto lo podemos observar en la siguiente figura:



Fuente: Centro de Estudios en Medio Ambiente y Energías Renovables (CEMAER)

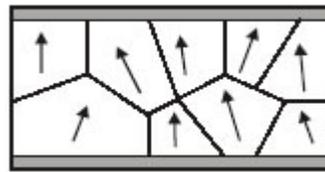
Figura 10. Poli-cristal

Al ser sometido al campo eléctrico o carga eléctrica, el cristal se calienta y permite de este modo a sus moléculas tener mayor libertad de movimiento y este campo eléctrico hace que los dipolos tengan una linealidad y prácticamente vayan hacia una misma dirección, para así producir el efecto piezoeléctrico. En las siguientes figuras observamos lo descrito anteriormente:



Fuente: Centro de Estudios en Medio Ambiente y Energías Renovables (CEMAER)

Figura 11. Poli-cristal sometido a campo eléctrico

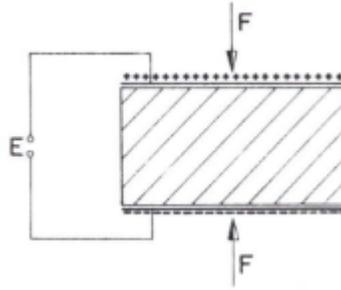


Fuente: Centro de Estudios en Medio Ambiente y Energías Renovables (CEMAER)

Figura 12. Alineación de dipolos

Si el campo eléctrico aplicado no es constante, es decir, es variable con el tiempo, los cambios de forma y de dimensiones del material son también una función del tiempo. Por tanto, aplicando una excitación eléctrica a una determinada frecuencia, obtenemos variaciones mecánicas a la misma frecuencia, es decir: el cristal vibra a la frecuencia a la que varía la excitación eléctrica. Gracias al principio de equivalencia de frecuencias podemos asegurar que las partículas de aire que envuelven al cristal están vibrando a la misma frecuencia.

En resumen, en la figura 13 podemos observar como al aplicar el campo eléctrico, aparecen fuerzas de compresión en los extremos del cristal sobre el cual fue aplicado el diferencial de potencial:



Fuente: Centro de Estudios en Medio Ambiente y Energías Renovables (CEMAER)

Figura 13. Efecto Piezoeléctrico inverso

1.2.3 Materiales piezoeléctricos

En la actualidad, solo el cuarzo es utilizado comercialmente. El resto, son cristales piezoeléctricos, conocidos de igual forma como ferro eléctricos, obtenidos de forma artificial. Los materiales que presentan propiedades piezoeléctricas tras ser sometidos a una polarización son el tantalio de litio, el nitrato de litio, bernilita, en forma de monocristalinos y cerámicas o polímeros polares bajo la forma de micro cristales orientales.

Si bien los materiales piezoeléctricos monocristalinos se siguen desarrollando actualmente, los materiales piezoeléctricos más utilizados son los materiales cerámicos poli cristalinos y polímeros. La cerámica piezoeléctrica más empleada se conoce como titanato zirconato de plomo (PZT). El polímero más desarrollado es el poli fluoruro de vinilideno (PVDF). Los materiales piezocerámicos tienen la propiedad de ser rígidos y dúctiles, por lo que son buenos candidatos para ser empleados como actuadores, debido a su gran módulo de elasticidad [12].

En cambio, los piezopolímeros están mejor preparados para actuar como sensores porque añaden una rigidez mínima a la estructura y además son de fácil elaboración.

En el momento de evaluar materiales piezoeléctricos hay que tener en cuenta las propiedades de cada uno de ellos. La comparación de coeficientes es de gran

ayuda, pero siempre teniendo en cuenta la aplicación a la que estará destinado el material. Lo más fácil es comparar los coeficientes de deformación (d) y acoplamiento (k), este último es un indicador por decirlo de otro modo de la habilidad que tiene el material para convertir energía mecánica en eléctrica.

Desde el punto de vista mecánico puede ser importante evaluar el módulo de Young (E) de la estructura, que es el que mide la facilidad o la dificultad para que un material sea estirado.

En la tabla 2 se aprecia la comparación de las propiedades generales de materiales piezocerámicos y polímeros [13], [14].

Tabla 2. Comparación materiales cerámicos y polímeros

Propiedad	PZT	PVDF
$d_{31}(pm/V)$	320	20
$d_{33}(pm/V)$	650	30
$k_{31}(CV/Nm)$	0.44	0.11
$k_{33}(CV/Nm)$	0.75	0.16
$E (Gpa)$	50	3

1.2.4 Ecuaciones constitutivas del efecto piezoeléctrico

La forma de representar las ecuaciones y variables estándar de los elementos piezoeléctricos, se rige por el estándar de IEEE en piezoelectricidad.

En las ecuaciones se tienen en cuenta tensiones (T), deformaciones (S), campo eléctrico (E) y desplazamiento eléctrico (D), las cuales dos de ellas son variables a

resolver. Suponiendo que el dispositivo piezoeléctrico trabaja bajo pequeñas tensiones, se considera un comportamiento eléctrico lineal.

Si la tensión y el campo eléctrico se tienen en cuenta como variables independientes, las ecuaciones en representación tensorial (deformación, desplazamiento eléctrico) quedan definidas tridimensionalmente de la siguiente manera [12], [14].

$$S_{ij} = s_{ijkl}^E T_{kl} + d_{kij} E_k$$

$$D_i = d_{ikl} T_{kl} + \varepsilon_{ik}^T E_k$$

En la tabla 3, se definen cada una de las variables y los parámetros que componen las ecuaciones constitutivas anteriores.

Tabla 3. Variables de las ecuaciones constitutivas piezoeléctricas

Comportamiento mecánico	
d_{ikl}	Coeficiente de deformación piezoeléctrica
s_{ijkl}^E	Constante mecánica (E=cte.)
S_{ij}	Deformación mecánica
T_{kl}	Tensión mecánica
Comportamiento eléctrico	
ε_{ik}^T	Constante dieléctrica
D_i	Desplazamiento eléctrico
E_k	Campo eléctrico

La notación mediante índices permite caracterizar el comportamiento electromecánico de cualquier material piezoeléctrico según la dirección. Debido a esto, en las ecuaciones que se apreciaron anteriormente aparecen los subíndices $ijkl$, cada uno con 3 valores posibles (x, y, z o 1, 2, 3 según nomenclatura). La figura 14 permite apreciar la clasificación numérica típica de los ejes mencionados.

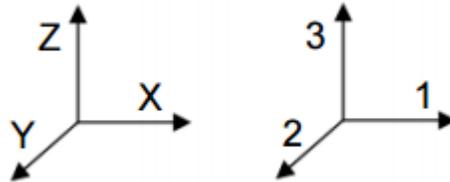


Figura 14. Clasificación numérica de los ejes

Esta es la representación más usada para caracterizar el comportamiento piezoeléctrico, sin embargo, la representación matricial también es una forma clara para su representación (Fig. 15).

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{13} \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{13} \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

Figura 15. Representación matricial

Cuando el material presenta simetría en su estructura, se puede utilizar la llamada notación de Voigt (Tabla 4.) para la representación el tensor de constantes elásticas [12], [15].

Tabla 4. Notación de Voigt

Índice del tensor	11	22	33	23 y 32	13 y 31	12 y 21
Índice en notación matricial	1	2	3	4	5	6

En este caso particular, los subíndices presentan valores de hasta seis números diferentes.

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{33} \\ 2S_{23} \\ 2S_{13} \\ 2S_{12} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{13} \\ T_{12} \end{bmatrix}$$

Se debe tener en cuenta también, que en la ecuación matricial (Fig.15), se han simplificado coeficientes debido a simetrías en la estructura ($s_{11}^E = s_{22}^E$, $d_{31} = d_{32}$).

1.3 COSECHAMIENTO DE ENERGÍA MEDIANTE TECNOLOGÍA ELECTROMAGNÉTICA

El electromagnetismo ha venido siendo usado a lo largo de los años como una fuente para la generación de electricidad.

La gran mayoría de generadores usados en la actualidad, se basan en la rotación y son usados en numerosas aplicaciones que van desde la generación de potencia a

gran escala, hasta aplicaciones de pequeña escala en la recarga de baterías de distinta capacidad [1].

1.3.1 Principios básicos

El principio básico en el que la gran mayoría de los generadores electromagnéticos están basados es la ley de inducción electromagnética de Faraday. Michael Faraday descubrió que cuando un conductor eléctrico pasa dentro de un campo magnético, una diferencia de potencial es inducida entre los extremos del conductor.

El principio de la ley de Faraday, establece que el voltaje o fuerza electromotriz, inducido en un circuito es proporcional a la tasa de tiempo de cambio de la relación de flujo magnético de ese circuito, es decir:

$$V = -\frac{d\phi}{dt}$$

1.3.2 Materiales magnéticos

El circuito magnético empleado en un generador electromagnético requiere de un campo magnético el cual es generado por el uso permanente de imanes. Los campos magnéticos pueden también ser generados por electroimanes, pero estos requieren un flujo de corriente lo que quiere decir que consumen energía. Por su parte, en el caso de los dispositivos de baja potencia a pequeña escala, el uso de electromagnéticos no es adecuado [1].

A continuación en la tabla 5, se observan las unidades de medida para las propiedades magnéticas:

Tabla 5. Propiedades electromagnéticas

Unidad	Símbolo	SI	cgs
Flujo	Φ	Weber (Wb)	Maxwell (Mx)
Densidad de Flujo	B	Tesla (T)	Gauss (G)
Intensidad del campo magnético	H	Ampere-trns/m	Oersted (Oe)
Permeabilidad	μ	H/m	-

1.3.3 Escala de los generadores electromagnéticos.

Es de suma importancia conocer y a su vez comprender, como la energía generada se relaciona con el tamaño del generador, y en particular el caso del generador electromagnético, en como la generación está limitada por las interacciones entre las bobinas y los magnetos cuando la escala se reduce.

Las siguientes suposiciones en relación con la estructura, se realizan con base en reportes de investigadores consultados [1], [3].

- La bobina permanece fija mientras que los imanes se mueven como respuesta a la vibración. Puesto que los imanes tienen generalmente una mayor masa, que la bobina, el movimiento de los imanes es más benéfico que el movimiento de la bobina.
- Solo las dimensiones del imán y la bobina se incluyen en el volumen. Cualquier generador práctico también debe incluir el volumen de la carcasa y el muelle. Pero para este análisis no se toman en cuenta [1].

2. ESTADO DEL ARTE

El aprovechamiento del flujo vehicular para la generación de energía es una constante a analizar, empresas de diferentes partes del mundo desarrollan sistemas para aprovechar las vibraciones que los vehículos ejercen sobre el asfalto o bien sea la energía cinética de estos mismos. La ubicación de estos sistemas depende de las aplicaciones para las cuales se requieran o los sitios más convenientes para aprovechar el flujo vehicular. Estos han sido ubicados tanto en centros comerciales, carreteras, o bien reemplazando reductores de velocidad corrientes, por reductores de velocidad con tecnología de cosechamiento de energía. Las tecnologías más utilizadas o las más comunes en la actualidad son la tecnología piezoeléctrica y la electromagnética, de las cuales veremos los antecedentes reportados.

2.1 TECNOLOGIAS BAJO ASFALTO

Las empresas que han apostado por este tipo de tecnología que consiste en la implementación de dispositivos piezoeléctricos a lo largo de Kilómetros de carretera bajo el asfalto son las empresas INNOWATECH, TREEVOLT y ABACCUS.

2.1.1 INNOWATECH

Innowattech es la empresa que más le ha apostado a la tecnología piezoeléctrica para la generación de energía a macro escala, en el 2009 puso en marcha un proyecto en Israel el cual consistía en la generación de energía mediante dispositivos piezoeléctricos ubicados 5 centímetros por debajo del asfalto, a su vez desarrollaron un proyecto el cual buscaba aprovechar la vibración que producían los trenes y ubicaron dispositivos de este tipo en los carriles (Fig. 16) [2].



Fuente: INNOWATECH

Figura 16. Instalación del sistema INNOWATECH en vías terrestres

En aplicación para vías terrestres o carreteras se generan 200 KWh, esto basado en generadores ubicados debajo del asfalto a 5 cm de profundidad los cuales se pueden observar en la figura anterior. Se promedió un tráfico de vehículos de 600 por hora, estos viajando a una velocidad de 72 km/h aproximadamente.

Otra aplicación a la cual le dio uso esta compañía fue para las líneas de las vías de ferrocarril, aquí arrojan resultados de producción de 120 KWh, basándose en el paso de un tren con 300 vagones cargados aproximadamente por hora. Estos generadores se aprecian en la figura 17.



Fuente: INNOWATECH

Figura 17. Instalación de dispositivos de Innowattech en vías de ferrocarril.

2.1.2 ABACCUS

La empresa ABACCUS de España en el año 2013, desarrollo un estudio en una vía principal de la ciudad de Panamá por la cual pasaban aproximadamente 15000 vehículos por hora. El estudio consto de la implementación de dispositivos piezoeléctricos a lo largo de 14 Kms de la vía.

La inversión de material piezoeléctrico del proyecto para 14 Km tenía un valor de EUR 48.181.000.

Las estimaciones de generación de energía eléctrica de acuerdo al Índice Medio de Desplazamientos (IMD), se obtendrían aproximadamente 16 horas de generación.

Y por último la generación de electricidad en el tramo correspondiente de 14 Km llegaría a un promedio de 98.112 GWh/año [2].

2.1.3 TREEVOLT

El proyecto que se ha convertido en un instrumento para recopilar información por medio de unas membranas ubicadas en el asfalto, las cuales han sido estudiadas tanto en las calles de Medellín como en Múnaco, estas no solo buscan la generación de energía sino también proveer datos para conocer los pesos promedio de los vehículos que pasan por estas, del mismo modo las velocidades promedio.

Esta tecnología aprovecha el peso de los vehículos cuando transitan por cualquier tipo de vía asfáltica.

En la generación de energía se maneja un porcentaje de por cada 1 Km instalado de esta tecnología, se genera entre 400 y 600 KWh en un estimado de 200 a 400 vehículos en 16 horas de tráfico normal.



Fuente: Treevolt

Figura 18. Dispositivos instalados de Treevolt

Con la prueba piloto de la instalación de 40 membranas o celdas representadas en la figura 18, las cuales se rigen por el efecto piezoeléctrico que es característico de

algunos materiales, quienes mediante la deformación mecánica producen pequeños impulsos eléctricos que son aprovechados mediante sistemas de rectificación electrónica [16].

2.2 DISPOSITIVOS “ENERGY HARVESTING” REDUCTORES DE VELOCIDAD

2.2.1 Dispositivo “LYBRA”

La empresa Underground Power Srl. es una empresa italiana formada por un grupo de jóvenes ingenieros, los cuales se dedican a diseñar y producir innovadores sistemas de recuperación de energía, ellos desarrollaron un dispositivo al cual denominaron LYBRA, el cual busca aprovechar el frenado de los carros actuando de la misma manera que un reductor de velocidad.

El dispositivo es instalado en sitios donde se requiere una reducción de velocidad, y del mismo modo aprovechar la energía cinética que gastan los vehículos al momento de desacelerar. Se busca con este proyecto que se respeten los límites de velocidad y generar energía al mismo tiempo (Fig. 19).



Fuente: Underground Power Srl.

Figura 19. Dispositivos LYBRA

Actualmente tienen instalado un dispositivo a modo de pruebas en un centro comercial en Milán, Italia.

Un dispositivo LYBRA genera 1 KWh por cada 100 carros que pasen sobre él. Si se encuentra ubicado en un lugar en el cual concurra un tráfico de 10000 vehículos aproximadamente por día, genera 100000 KWh al año, que es el equivalente al consumo de 40 familias promedio. El precio de cada dispositivo instalado rebasa los 100.000 euros [17].

2.2.2 Rampa fabricada por empresa New Energy Technologies, Inc.

Investigación reportada en noviembre del 2013 la cual reporta que estudios de tráfico muestran que más de 250 millones de vehículos están registrados en los Estados Unidos, y se estima que 6 millones de millas son conducidas o son representadas en flujo vehicular en las carreteras del país diariamente. Se plantea la hipótesis de que si la energía cinética generada por los vehículos que están en constante movimiento fuera capturada en un momento dado, se podría producir la

suficiente electricidad para hacer funcionar más de un cuarto de millón de hogares cada día.

Como se puede apreciar en la figura 20, la empresa New Energy Technologies, Inc. Presenta el desarrollo del dispositivo nombrado Motion POWER. Estos sistemas basados en la captación de energía en las carreteras, son una tecnología de energía alternativa que capta la energía cinética al momento de la desaceleración de automóviles y camiones, y creativamente convierte esta energía capturada en electricidad utilizable.



Fuente: New Energy Technologies, Inc

Figura 20. Dispositivo MOTION POWER

Cuando un vehículo frena, su energía de movimiento se reduce y se disipa en los frenos y en la fricción que se produce, e incrementa el desgaste del vehículo. Esta energía cinética que se pierde en el proceso de frenado es lo que este dispositivo busca capturar y convertir en electricidad. La energía de la rodadura del automóvil y la fuerza del neumático debido al peso del carro se utiliza para presionar un

actuador el cual hace girar un dispositivo de generación eléctrica propia para así generar potencia.

Una vez completamente optimizados e instalados, los ingenieros anticipan que los dispositivos MotionPower™ se pueden utilizar para suministrar electricidad a una variedad de aplicaciones futuras [18].

2.2.3 Generación de energía mediante el uso de generadores magnetoeléctricos aprovechando el tráfico vehicular

Esta investigación reporta la construcción de un dispositivo basado en el uso de Terfenol-D, el cual es una aleación de Terbio, Disprosio e Hierro, para la conversión de energía generada por un vehículo pasando por un reductor de velocidad [19]. Se propone el uso de generadores magnetoeléctricos en estos dispositivos de cosecha de energía, y además se presenta el modelo matemático basado en la teoría de Preisach, óptima para la predicción la variación de la magnetización contra el tiempo y la fuerza electromotriz inducida en el dispositivo reductor de velocidad mencionado anteriormente.

El sistema de reducción de velocidad es diseñado para ser mecánicamente cargado por el tráfico ordinario; la presión de cada llanta genera una fuerza mecánica en el Terfenol, el cual es convertido en una variación de campo magnético que puede ser colectado o cosechado para producir la fuerza electromotriz.

Se asume en la investigación una ruta con un tráfico moderado y un sensor; se toma como ejemplo un automóvil (Peugeot 307) el cual tiene un peso promedio de 1250 Kg, pasando por el sensor a una velocidad de 30 Km/h aproximadamente. El esquema del dispositivo reductor de velocidad, y del elemento generador se observan en las figuras 21 y 22 respectivamente.

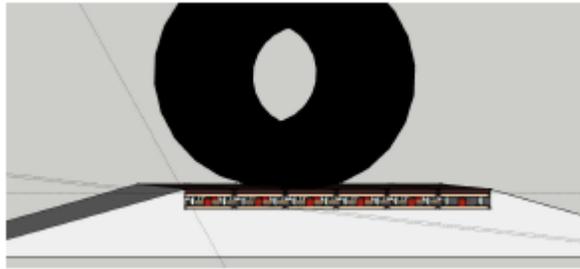


Figura 21. Esquema del dispositivo reductor de velocidad

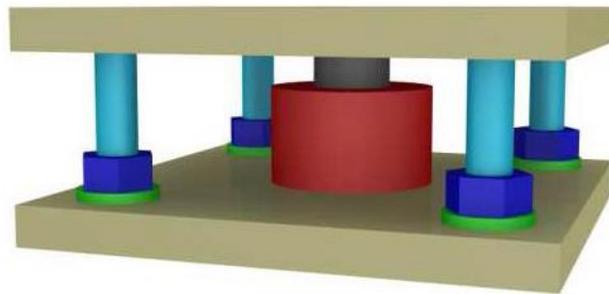


Figura 22. Esquema del sistema básico de generación del dispositivo

Esencialmente mediante la aplicación de la Ley de Faraday se computa el voltaje de salida de acuerdo a la siguiente expresión:

$$V_{out} = N \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot \frac{\Delta M}{t}$$

Dónde,

N = Número de espiras.

d = diámetro de la bobina.

M = Variación de la magnetización.

t = Tiempo característico.

En la investigación se realizaron mediciones experimentales, las cuales fueron llevadas a cabo con dos objetivos principalmente: primero para determinar cuan exacto era el modelo matemático adoptado, y en segundo lugar para evaluar el rendimiento técnico del generador evaluado. Dejando como resultados que el poder generado por el elemento básico en el dispositivo de reducción de velocidad, fue en el orden de 0.0001 W sometido a una carga de 100 Kg en una escala de tiempo de 0.2 segundos. Esto demuestra que el poder de generación del sistema con la carga del automóvil anteriormente descrito, está en el orden de los 0.01 W/m².

De acuerdo con la geometría usada, cerca de 20 barras de Terfenol pueden ser añadidas por cada baldosa. Esto quiere decir que el poder de generación alcanza los 3.2 W/m². El resultado es definitivamente menor siendo comparado con los sistemas fotovoltaicos en la actualidad, los cuales están en el orden de los 100/200 W/m², pero está en el mismo nivel de los materiales piezoeléctricos, quienes alcanzan los 10 W/m².

2.2.4 Diseño y optimización de reductor de velocidad por medio de generador tubular

En esta investigación que fue presentada en el año 2013, se reemplazan las bombas hidráulicas y los “flywheel”, implementados anteriormente por diferentes tipos de investigadores y desarrollados en sistemas de cosecha de energía, por un generador tubular y un controlador dinámico de potencia con el cual se busca incrementar la eficiencia del sistema, drásticamente reduciendo la vulnerabilidad debido a las fallas y daños, dado que en los generadores tubulares, no se utiliza ninguna transmisión mecánica. La figura 23 permite apreciar el diagrama del sistema implementado al momento del paso de una llanta y la figura 24 el prototipo experimental usado en el banco de pruebas [20].

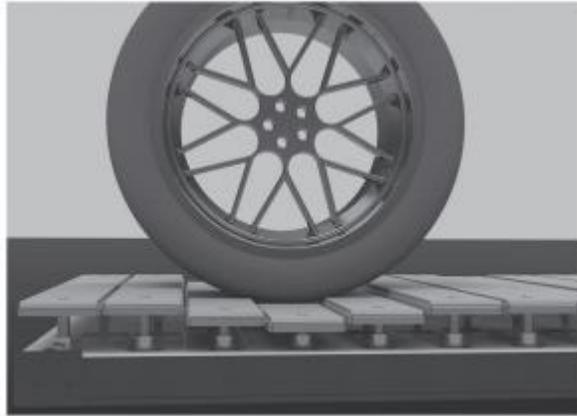


Figura 23. Diagrama del dispositivo generador tubular

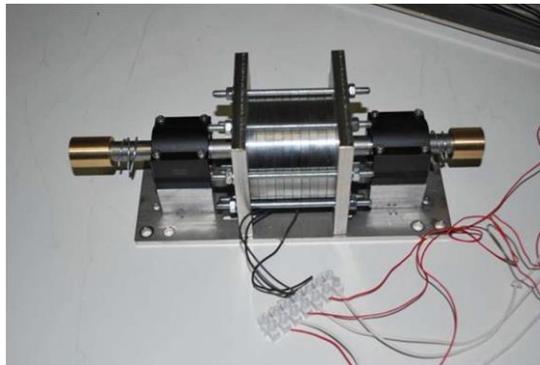


Figura 24. Prototipo experimental usado en el banco de pruebas

Se maneja la hipótesis de que cada vez que un vehículo reduce su velocidad de 50 a 20 Km/h, se produce un gasto de 67 Wh de energía cinética E_w , la cual es disipada completamente por los frenos basados en:

$$E_w = \frac{1}{2}m(v_f^2 - v_o^2)$$

Teniendo en cuenta que no toda la energía cinética es aprovechada para el desarrollo de las pruebas se toma como referencia un vehículo de aproximadamente unos 3000 Kg. En la figura 23 es posible observar el sistema descrito anteriormente implementado a escala real, y se maneja la hipótesis de la instalación de estos sistemas en las zonas donde los vehículos requieren de una desaceleración, con lo cual se busca recuperar una parte de la energía gastada en el momento del frenado.



Figura 25. Dispositivo implementado en escala real

El sistema que fue propuesto produce una generación de 70 W a la escala estipulada en el banco de pruebas, proponen mejoras a gran escala pero no están desarrolladas aún.

2.2.5 Reductor de velocidad cosechador de energía mediante volante de inercia

La investigación de la Universidad Islámica de Malasia, reportada en el año 2014 tiene como principal objetivo el almacenamiento de la energía cinética gastada por los carros en el momento del paso sobre una rampa reductora de velocidad [21].

Un sistema de almacenamiento electromecánico de volante de inercia electromecánico es usado para mejorar la electrificación. En la investigación se desarrolla la implementación de un sistema de almacenamiento de energía el cual obtiene voltaje generado a medida del paso de vehículos. El mecanismo interconectado acciona un desarrollado volante de inercia el cual es capaz de almacenar un significativo monto de energía cinética, el cual sucesivamente deriva a un generador electromagnético para alcanzar las revoluciones por minuto requeridas.

Es diseñado este sistema principalmente para la demostración de la habilidad de producción de electricidad mediante el paso de vehículos a baja velocidad generando un promedio entre 500 y 800 Watts adecuados para diferentes aplicaciones en carreteras.

El diagrama de bloques del sistema descrito anteriormente se observa en la figura 26:

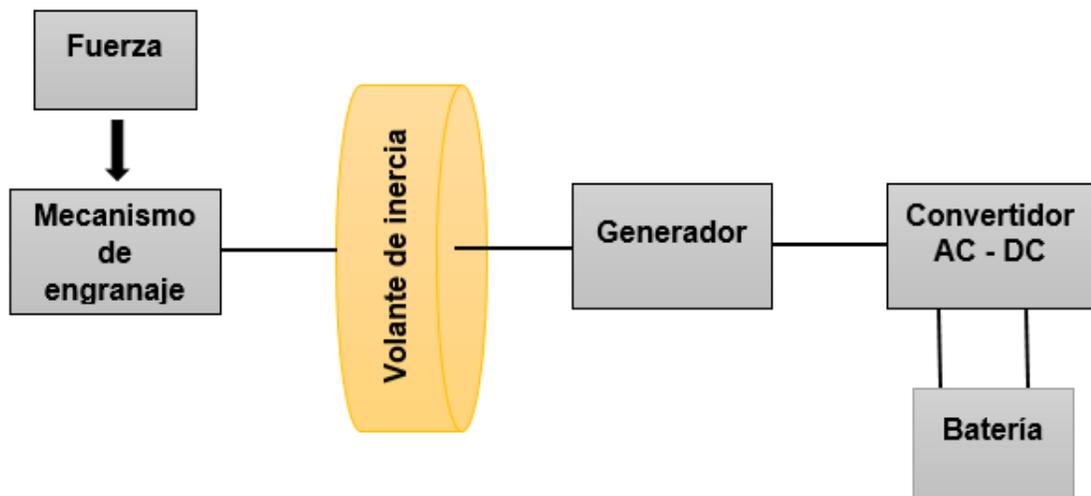


Figura 26. Diagrama de bloques del sistema con volante de inercia

El volante de inercia es hecho de 85 Kg de hierro fundido con un diámetro de 355 cm, permitiendo la continua rotación debido a la velocidad de la inercia por un periodo de tiempo lo suficientemente largo luego del paso del vehículo. Se plantea el sistema mediante un reductor de velocidad de 30 centímetros de largo completamente cuando es instalado; el automóvil al momento que pasa por la rampa que actúa como reductor de velocidad hace que esta baje a ras del suelo, por unos resortes implementados en el sistema, lo cual permite el roce del vehículo y así la activación del volante de inercia para la posterior producción de energía, luego del paso del vehículo la rampa vuelve a estar al mismo nivel del comienzo como se puede apreciar en la figura 27.

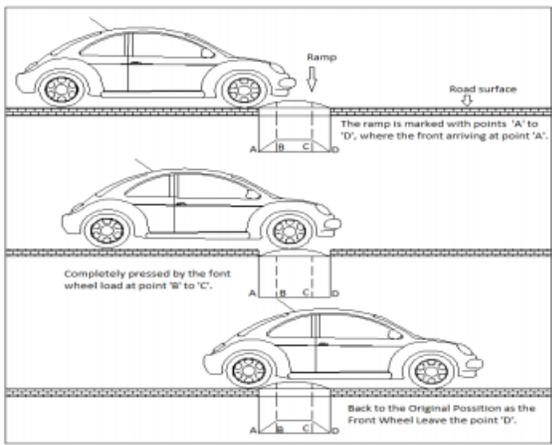


Figura 27. Vehículo pasando por el sistema reductor de velocidad

El cálculo de la generación se realizó de la siguiente manera:

El peso del vehículo el cual pasaba por el reductor de velocidad era de aproximadamente una tonelada y la masa aplicada sobre la rampa cuando este cruzaba era de aproximadamente 450 Kg, el reductor de velocidad tenía un tamaño de 15,24 cm.

Entonces el trabajo realizado se hallaba mediante la relación:

$$W = F \times d$$

La fuerza (F) es la masa del vehículo por la gravedad, y como resultado se obtienen 4414,5 N y la distancia (d) es la distancia atravesada por el automóvil, en este caso el tamaño del reductor de velocidad 0.15 metros.

$$\text{Generación} = \frac{W}{\text{seg}}$$

La generación obtenida por un vehículo es de 11,212 Watts.

La velocidad del vehículo cuando pasa por el dispositivo debe ser baja, puesto que entre mas baja sea, habrá mayor generación según los resultados de la experimentación. También cabe resaltar que la relación entre el peso del vehículo y la generación es directamente proporcional.

2.2.6 Generación de electricidad mediante rodillos unidos por cadenas en reductor de velocidad

En esta publicación reportada en Mayo del 2014 se propone un dispositivo “Energy Harvesting” que busca aprovechar la energía cinética de los carros al paso por reductores de velocidad, el modelo propuesto como se presentó anteriormente se puede observar en la figura 28 [22].

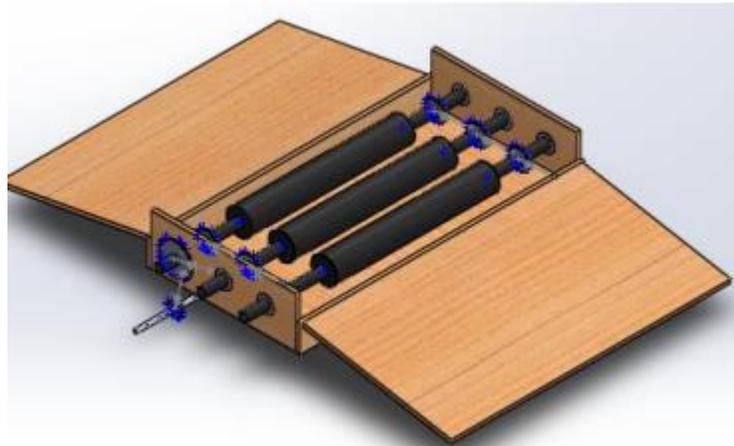


Figura 28. Reductor de velocidad con rodillos

Los rodillos están unidos por cadenas para proporcionar un movimiento uniforme en los demás rodillos. El rodillo final es conectado mediante una cadena a una rueda de dientes más pequeña la cual está unida al eje del generador. La rueda más grande al estar en constante movimiento hace que la pequeña gire más rápido debido al engranaje entre estas dos. Esta velocidad es suficiente para hacer girar el rotor del generador. El rotor que gira dentro de un estator magnético estático corta el flujo magnético que lo rodea, lo cual produce la fuerza electromotriz. Esta fuerza electromotriz se envía a un inversor, donde se regula, luego esta se envía a una batería de almacenamiento para luego definir su uso para una variedad de aplicaciones cotidianas. El sistema elimina completamente el uso de resortes que se desgastan debido a la rápida expansión y compresión.

En la figura 29, se muestra el prototipo desarrollado a escala real el cual fue probado a diferentes velocidades al paso de una llanta; la velocidad a la cual pasa el vehículo varía entre 10 y 15 Km/h, y el voltaje producido está dentro del rango entre 3 y 4 Volts.



Figura 29. Prototipo implementado a escala real

Para un flujo vehicular promedio del día a día el cual incluye vehículos de 2, 3, 4, 6, 8 llantas, la energía producida va a ser mucho más significativa comparada con los resultados experimentales obtenidos, lo cual es una apuesta interesante debido a que esta energía es perdida de todas formas en los reductores de velocidad.

2.2.7 Generación de potencia utilizando la energía cinética desperdiciada por rotación de tambor

Publicación reportada en el 2012 la cual describe una técnica para la generación de energía a partir del gasto de energía de los vehículos a baja velocidad. El principio de funcionamiento está basado en la rotación de un tambor debido al paso de vehículos [23].

El diagrama del esquema del modelo propuesto se muestra en la figura 30. La rotación de las llantas (4) con la tracción del vehículo es transmitida al tambor en el punto de contacto, lo que hace que el tambor gire. Debido a la relación de velocidad entre el neumático y el tambor y la polea de accionamiento (5) giran con la misma velocidad de rotación que el tambor, usando una correa plana (9), la polea pequeña gira con una velocidad superior. La segunda polea (13) va a rotar a la misma velocidad. Por lo tanto, usando una segunda correa plana (7) la polea del generador va a girar a una velocidad mayor. Esto produce la generación (8) de energía

eléctrica la cual es almacenada en una batería para posteriormente ser usada en distintas aplicaciones.

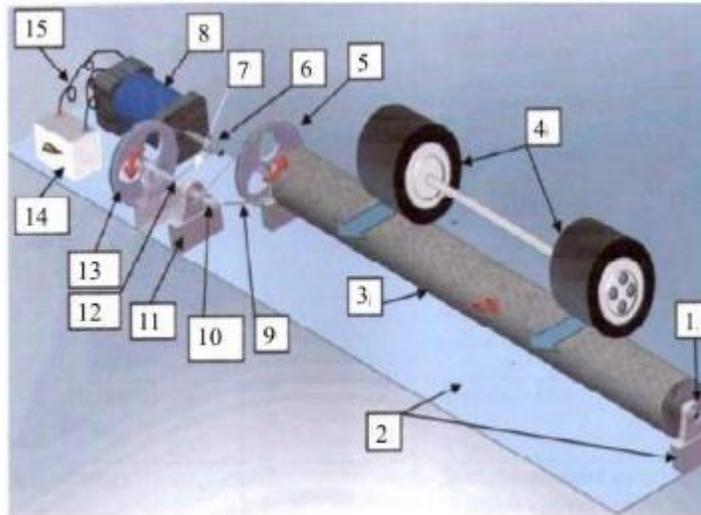


Figura 30. Esquema del modelo principio de rotación de tambor

El sistema depende del peso del vehículo, cuando el peso del vehículo aumenta, las revoluciones del tambor se incrementan, teniendo la misma relación para la fricción entre la llanta y el tambor con respecto al peso del vehículo.

Se encontró que a 35 rpm es la rotación efectiva en el tambor con la que empieza la carga. Los estudios indicaron que la mínima velocidad a la que debe pasar un vehículo es de 20 Km/h.

El costo total del sistema desarrollado es aproximadamente 600 dólares y produce un aproximado de 142 Watts por vehículo en un tiempo de 3 segundos.

2.2.8 Rampa para la generación de energía eléctrica mediante la energía cinética

La "Electro Kinetic Road Ramp" fue una investigación reportada en mayo del 2015. La rampa fue diseñada para aprovechar la energía cinética de los automóviles que pasen sobre ella para de esta forma generar electricidad. No es como un reductor de velocidad común, lo que quiere decir que no es dañino para los vehículos en cuanto al gasto de gasolina o a la suspensión de estos que es lo que sucede la mayoría del tiempo [24].

En la figura 31 se aprecia la estructura de la rampa, la cual está compuesta por un mecanismo de engranaje el cual va instalado por debajo del suelo, también está compuesta por un volante de inercia y finalmente un alternador como observamos a continuación:

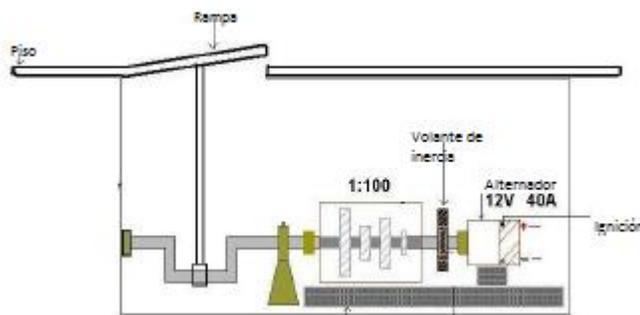


Figura 31. Estructura de la "Electro Kinetic Road Ramp"

Consiste en una baldosa o un bloque plano el cual es presionado al momento del paso de un vehículo el cual produce un movimiento de translación. En adición a esto se instala una batería al alternador la cual almacena la energía.

El proceso de la rampa se resume con el siguiente diagrama:

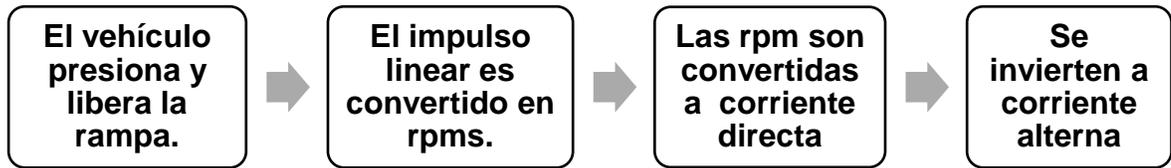


Figura 32. Diagrama de procesos "Electro Kinetic Road Ramp"

Según las pruebas realizadas experimentalmente arrojan los resultados de que un carro produce entre 12 y 14 Volts y 9 Amperes en 2 segundos. Un carro produce el monto de aproximadamente 240 W de energía cinética. La energía eléctrica que se produce a partir del aprovechamiento de una parte de la energía cinética, está en el orden entre los 96 a los 126 W.

Mediante el uso efectivo de alternadores e inversores se disminuirían las pérdidas de potencia. La rampa es una alternativa eficiente que combina las energías mecánicas y eléctricas y que contribuye a las energías alternativas.

3. SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

Para la selección de la tecnología a implementar en este proyecto de investigación, se evaluaron todos los antecedentes reportados en el capítulo anterior, se tuvo en cuenta tanto la generación, como el costo de instalación del dispositivo.

3.1 COMPARACIÓN TECNOLOGÍAS BAJO PAVIMENTO

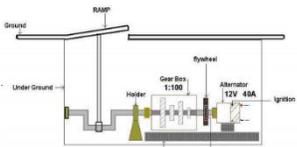
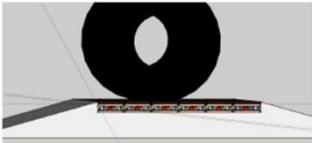
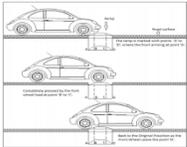
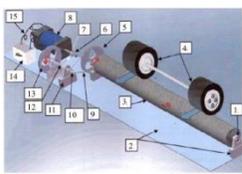
En primer lugar se compararon 3 tecnologías piezoeléctricas, las cuales están diseñadas para su instalación por debajo del asfalto, tales tecnologías fueron desarrolladas por las empresas TREEVOLT de Colombia, INNOWATECH en Israel, y la empresa ABACCUS de España.

Estas tecnologías piezoeléctricas se descartan para la implementación en Bucaramanga debido a su elevado costo de instalación, ya que se debe levantar el pavimento en los lugares que se quiera instalar, y con respecto a la generación, los KWh producidos por estas tecnologías no compensan ni siquiera una tercera parte de la inversión, esto en base a investigaciones consultadas [2].

3.2 COMPARACIÓN TECNOLOGÍAS COMO REDUCTORES DE VELOCIDAD

Como se mencionó anteriormente, se llevó a cabo la comparación de tecnologías tanto piezoeléctricas como electromagnéticas, usadas en sistemas de reducción de velocidad, para la generación y cosechamiento de energía (Tabla 6).

Tabla 6. Comparación de dispositivos reductores de velocidad generadores de energía.

TECNOLOGÍA	VELOCIDAD	GENERACIÓN	COSTO (COP)
Empresa "MOTION POWER ENERGY" 	5 - 90 Km/h	140 - 160 W en 2 seg.	72'000.000 – 90'000.000
Dispositivo "LYBRA" 	15 Km/h	100 W	360'000.000
"Electro kinetic road ramp" 	20 - 40 Km/h	96 - 126 W en 2 seg.	66'000.000 – 165'000.000
Generadores Magnetoeléctricos 	30 Km/h	3,2 W en 2 seg.	2'910.000
Generador Tubular 	20 - 50 Km/h	70 W en 2 seg.	8'250.000
Volante de inercia 	20 - 30 Km/h	11,26 W en 4,5 seg.	3'750.000
Rotación de Tambor 	20 - 60 Km/h	142 W en 3 seg.	1'800.000

La columna Velocidad de la Tabla 6, hace referencia a la velocidad promedio a la cual debe pasar cada vehículo para la activación del sistema de cosechamiento.

En la columna de generación se referencia la potencia que genera un vehículo en cada sistema y el tiempo constante en que se mantiene el pico de esta producción. Esto quiere decir que al momento que pasa un vehículo por el sistema, este produce la generación en un intervalo de tiempo específico y luego se detiene hasta el momento del paso del siguiente vehículo.

En la tercera casilla se reporta el valor en pesos colombianos de la implementación completa del sistema según los documentos consultados.

La tecnología de menor costo de implementación es la de rotación de tambor, según investigadores consultados [23], debido a que el sistema puede ser adecuado a distintas formas de rampa, y lo más adecuado en este caso es la adaptación a los reductores de velocidad convencionales de cemento que no tienen un valor elevado. El rodillo y el sistema completo serían adaptados en la mitad dentro del reductor convencional.

En cuanto a la generación de potencia, los vehículos al momento del paso por el sistema, hacen que este trabaje por un tiempo determinado, y teniendo en cuenta el valor que alcanzan cada uno de los dispositivos comparados y el tiempo en que se mantiene la generación al momento del paso del automotor, la tecnología que tiene una mejor relación entre generación y tiempo es la nombrada rotación de tambor, esto debido a la relación de tamaños de los rodamientos presentes en el sistema

Teniendo en cuenta estos tres aspectos, se llegó a la decisión de escoger la tecnología nombrada como “rotación de tambor”, esto comparando tanto el costo de implementación con respecto a las demás tecnologías como la generación de potencia por vehículo.

4. SELECCIÓN DEL LUGAR DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

Para la selección del lugar de implementación de la tecnología seleccionada en el capítulo anterior, se tuvo en cuenta tanto el elevado flujo de vehículos como la necesidad de reductores de velocidad en la vía los cuales pueden ser adaptados en sistemas de cosechamiento de energía.

4.1 FLUJO VEHICULAR

Según la revisión realizada en bases de datos de organizaciones que realizan estudios en las vías de la ciudad de Bucaramanga en base al conteo de vehículos que transitan, se preseleccionaron 3 opciones para la ubicación del sistema, los cuales son la carrera 21 con calle 56, la carrera 33 con calle 63 y la carrera 15 con calle 3; las cuales según la entidad AMB son las zonas más críticas con respecto al paso de vehículos y en las cuales se realizan estudios previos al proyecto del día sin carro, el cual es un proyecto que se lleva a cabo en la ciudad aproximadamente 3 días al año. El conteo de vehículos proporcionado por esta entidad se ve reflejado en las tablas 7, 8 y 9. El mayor flujo vehicular según esta recopilación se presenta en la calle 33 con 63.

La ubicación de los puntos preseleccionados se ve representada en las figuras 33 y 34.

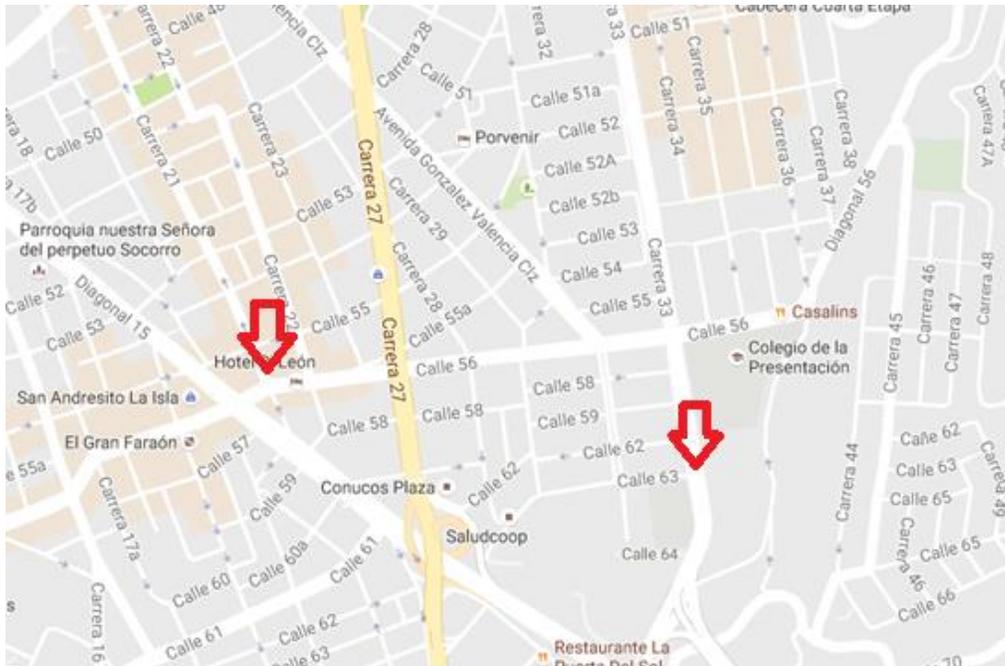


Figura 33. Carrera 33 con calle 63 y Carrera 21 con calle 56

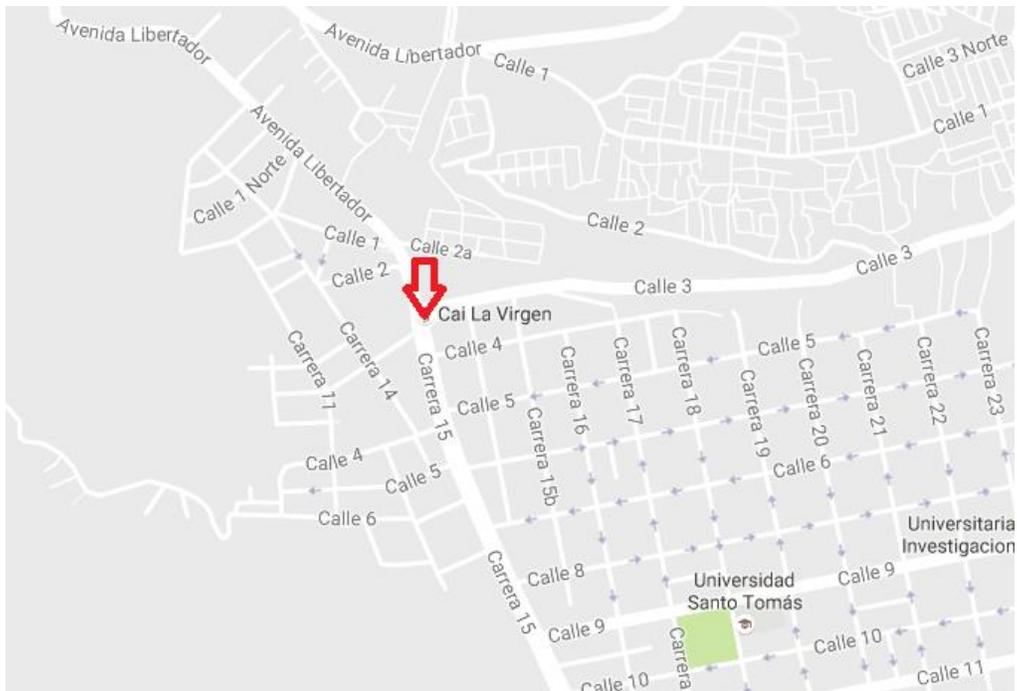


Figura 34. Carrera 15 con calle 3

Tabla 7. Datos del conteo carrera 21 con calle 56

CARRERA 21 CON CALLE 56						
CLASE	AUTOMOVIL	CICLA	CAMPERO	COLECTIVO	MOTO	TAXI
HORA PICO 6-8 AM	245	75	251	59	444	387
VALLE 8-10 AM	177	5	277	53	384	298

Tabla 8. Datos del conteo carrera 33 con calle 63

CARRERA 33 CON CALLE 63						
CLASE	AUTOMOVIL	CICLA	CAMPERO	COLECTIVO	MOTO	TAXI
HORA PICO 6-8 AM	1964	85	207	81	2950	1843
VALLE 8-10 AM	2216	40	258	82	1908	1454

Tabla 9. Datos del conteo carrera 15 con calle 3

CARRERA 15 CON CALLE 3						
CLASE	AUTOMOVIL	CICLA	CAMPERO	COLECTIVO	MOTO	TAXI
HORA PICO 6-8 AM	264	49	61	211	3184	499
VALLE 8-10 AM	591	8	123	185	1189	269

Según los datos proporcionados por la empresa AMB de las horas pico que son las de mayor congestión y las horas valle que son las horas más transitables, se realizó un aproximado de los vehículos que pasan al día por estos tres sectores preseleccionados, los cuales se aprecian en las tablas 10, 11 y 12.

Cabe resaltar que estos datos son del promedio de todos los días de la semana en la ciudad de Bucaramanga.

Tabla 10. Conteo de vehículos por día carrera 21 con calle 56

CARRERA 21 CON CALLE 56						
CLASE	AUTOMOVIL	CICLA	CAMPERO	COLECTIVO	MOTO	TAXI
HORAPICO 6 - 8 AM	245	75	251	59	444	387
VALLE 8 - 10 AM	177	5	277	53	384	298
10 - 12 AM	180	10	280	55	390	300
12 - 2 PM	250	80	250	60	452	390
2 - 4 PM	172	16	270	52	380	280
4 - 6 PM	170	12	265	56	377	275
6 - 8 PM	265	85	290	50	500	405
8 - 10 PM	140	15	260	45	320	280
10 - 12 PM	100	8	150	5	150	200
12 - 5 AM	80	10	120	0	0	150
TOTAL	1779	316	2413	435	3397	2965

Tabla 11. Conteo de vehículos por día carrera 33 con calle 63

CARRERA 33 CON CALLE 63						
CLASE	AUTOMOVIL	CICLA	CAMPERO	COLECTIVO	MOTO	TAXI
HORAPICO 6 - 8 AM	1964	85	207	81	2950	1843
VALLE 8 - 10 AM	2216	40	258	82	1908	1454
10 - 12 AM	2200	42	258	80	2000	1500
12 - 2 PM	2000	80	200	78	3000	1900
2 - 4 PM	2230	45	260	85	2100	1325
4 - 6 PM	2230	40	262	86	2050	1400
6 - 8 PM	2050	95	190	88	3300	2000
8 - 10 PM	1600	50	263	75	1600	1600
10 - 12 PM	1200	30	220	10	1000	1300
12 - 5 AM	800	20	300	0	0	600
TOTAL	18490	527	2418	665	19908	14922

Tabla 12. Conteo de vehículos por día carrera 15 con calle 3

CARRERA 15 CON CALLE 3						
CLASE	AUTOMOVIL	CICLA	CAMPERO	COLECTIVO	MOTO	TAXI
HORA PICO 6 - 8 AM	264	49	61	211	3184	499
VALLE 8 - 10 AM	591	8	123	185	1189	269
10 - 12 AM	580	6	150	180	1200	282
12 - 2 PM	390	50	72	220	3500	580
2 - 4 PM	585	12	145	187	1320	320
4 - 6 PM	593	25	152	190	1320	300
6 - 8 PM	350	62	82	253	4230	615
8 - 10 PM	577	40	120	130	1000	350
10 - 12 PM	402	15	80	0	700	285
12 - 5 AM	650	12	30	0	0	320
TOTAL	4982	279	1015	1556	17643	3820

Del conteo que se obtiene diariamente cabe resaltar que tanto los taxis, como los autos camperos clasifican dentro de los vehículos estudiados para la implementación del sistema propuesto, según esto el número total de vehículos que pasan por día por cada uno de las zonas preseleccionadas es el siguiente.

Tabla 13. Paso de vehículos por zona diariamente

CLASE	AUTOMOVIL	CAMPERO	TAXI	TOTAL
CARRERA 21 CON CALLE 56	1779	2413	2965	7157
CARRERA 33 CON CALLE 63	18490	2418	14922	35830
CARRERA 15 CON CALLE 3	4982	1015	3820	9817

Esto quiere decir que el número de vehículos que pasan diariamente por la carrera 33 con calle 63, es de aproximadamente 35830 vehículos. A este número de vehículos se le puede añadir los colectivos, puesto que el sistema tiene que ser resistente a este tipo de vehículos puesto que va a ser instalado en una zona donde transitan, entonces el número de vehículos que pasan por la será 36.495.

4.2 UBICACIÓN DEL SISTEMA

Este punto de la ciudad el cual fue escogido para la implementación del sistema de cosechamiento de energía además de la generación de energía, es una medida de gran importancia para la prevención de accidentes puesto que es una zona escolar, y no hay nada que haga que los vehículos disminuyan su velocidad al pasar por allí.

A continuación se observa la carrera 33 con calle 63, y así mismo se observa la necesidad de instalación de un tipo de reductor de velocidad en la zona escolar (Fig. 35).



Fuente: Google Maps

Figura 35. Carrera 33 con calle 63

El sistema de cosechamiento de energía al estar ubicado en medio de una autopista, abre paso a la discusión por implementar un reductor de velocidad, pero se tiene en cuenta para la realización del proyecto, que el sistema escogido en el

capítulo 3, se puede adecuar para que los vehículos no reduzcan bruscamente su velocidad, que ocasionaría infinitos trancones en la zona. Sino que por el contrario, las rampas implementadas en el sistema se instalarían con un ángulo menor de inclinación para que de este modo los vehículos reduzcan un poco su velocidad y se eviten accidentes, y de igual modo no ocasionen trancones en una de las principales vías de la ciudad.

Un vehículo podría atravesar esta rampa a una velocidad promedio de 50 Km/h, y además de contribuir con la seguridad, presentaría un potencial de generación de energía eléctrica.

5. PRODUCCIÓN ENERGÉTICA Y FACTIBILIDAD ECONÓMICA

Para obtener la factibilidad tanto económica como ambiental del proyecto es necesario realizar una serie de cálculos a través de los cuales es posible determinar la energía en KWh producida por el sistema de cosechamiento propuesto en total durante su vida útil [25], [26].

5.1 METODOLOGÍA

La metodología mediante la cual se llevarán a cabo los cálculos se explica a continuación, en primer lugar está la obtención de la energía producida por año por el sistema de cosechamiento, en segundo lugar, la factibilidad económica de la implementación del sistema y por último la factibilidad ambiental que no se puede dejar de lado en este tipo de proyectos pues es un plus muy importante ya que son energías alternativas.

5.1.1 Energía producida por año

- Determinar producción media de energía por cada vehículo.
- Estimar el número aproximado de vehículos que pasan por el sistema de cosechamiento de energía implementado diariamente.
- Identificar el número de días en que no hay tránsito de vehículos en el año (día sin carro).
- Multiplicar el valor de energía producida por cada día, por el número de días de flujo vehicular en la ciudad al año.

5.1.2 Factibilidad económica del proyecto

- Cálculo de la vida útil del sistema de cosechamiento de energía en años.
- Multiplicar el valor de la energía producida en la vida útil del sistema por el valor estimado del KWh en Colombia en el período de vida útil del sistema.
- Comparar el ahorro que se da en la energía eléctrica generada por el sistema contra el costo de implementación del sistema a escala real.

5.2 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

Para determinar la energía que produce el sistema en Wh, es importante tener en cuenta que un vehículo genera aproximadamente 160 W al pasar, durante tres segundos. Es decir, que para tener 160 Wh, primero se deben hallar el número de carros que deben circular, lo cual es sencillo debido a que una hora tiene 3600 segundos y si un carro al pasar por el sistema genera 3 segundos de esta potencia, se necesitan 1200 carros para generar 160 Wh.

$$\text{Número de carros} = \frac{3600}{3} = 1200$$

A partir de estadísticas consultadas se conoce que, en un día, por esa vía circulan aproximadamente 36495 vehículos, y si 1200 vehículos producen 160 Wh como ya se dijo anteriormente, 36495 vehículos producirán 4866 Wh o 4.866 KWh en un día.

Para obtener la generación de energía del sistema en un año, al número de días del año, se le deben descontar los días que son declarados sin carro, por esta razón, se plantean los cálculos con 360 días.

Si en un día se produce 4.86 KWh en un año el sistema producirá 1750 KWh

$$4,86 \text{ KWh} * 360 \text{ días/año} = 1750 \text{ KWh/año}$$

El valor hallado anteriormente corresponde a la energía en un año de vida útil del dispositivo, se proyecta que el sistema en plena generación tenga 7,5 años de vida útil, por lo tanto, en este periodo llegaría a producir 13.125 KWh.

En Colombia, actualmente el costo del KWh para alumbrado público es de \$479,2 a partir de este valor se puede calcular el costo de la energía que produciría el sistema.

El valor de la producción energética (PE) sería,

$$PE = 13.125 \text{ KWh} * 479,2 \text{ \$/KWh}$$

$$PE = \$6'289.500$$

Valor de la inversión de instalación del sistema:

\$ 1'800.000 según bibliografía consultada, se consideró que para el cubrimiento total de la vía el precio rondaría los \$3'600.000, incluyendo mano de obra y demás.

Para determinar la factibilidad económica se debe comparar el ahorro generado (AG) por el sistema el cual es el valor de la producción energética contra el valor de la inversión (VI) [25], de esta manera se obtiene que la factibilidad económica (FE) es:

$$FE = \frac{AG}{VI}$$

Entonces,

$$FE = \frac{6'289.500}{1'800.000 * (2)}$$

$$FE = 1,74$$

Como resultado se obtiene que el valor de la factibilidad económica es de 1,74, lo que quiere decir que, al finalizar los 7,5 años de vida útil, se tienen ganancias.

En la tabla 14 se evidencia el periodo de recuperación de la inversión con relación a la producción energética durante el periodo de vida útil del sistema. Teniendo en cuenta que el valor de la inversión inicial es de \$3.600.000 se establece que el valor anual del costo de mantenimiento se establece como el 5% del valor de la inversión, teniendo en cuenta que el costo aproximado del mantenimiento de instalaciones fotovoltaicas es del 2% anual, se toma este valor debido a la fricción a la que está expuesta el sistema a comparación de la instalación fotovoltaica.

El valor del costo de mantenimiento es de \$126.000 cada año.

Tabla 14. Payback de la implementación del sistema

Periodo de recuperación de la inversión		
AÑO	Producción energética	Producción estimada
1	\$ 838.600	\$ (658.600,00)
2	\$ 1.677.200	\$ (1.497.200,00)
3	\$ 2.515.800	\$ (2.335.800,00)
4	\$ 3.354.400	\$ (3.174.400,00)
5	\$ 4.193.000	\$ (4.013.000,00)
6	\$ 5.031.600	\$ (4.851.600,00)
7	\$ 5.870.200	\$ (5.690.200,00)
7,5	\$ 6.289.500	\$ (6.109.500,00)

Periodo de recuperación de la inversión	4,46 años
--	------------------

Se concluye que a la mitad del quinto año de vida útil se recupera el total de la inversión inicial realizada para la implementación del sistema. En la siguiente tabla se observan las ganancias que se obtienen luego de recuperar la inversión inicial.

Tabla 15. Ganancias obtenidas por la implementación del sistema.

Estimación de ganancias	
AÑO	Producción energética
Año 1 (Año 4,5 - Año 5,5)	\$ 658.600
Año 2 (Año 5,5 - Año 6,5)	\$ 1.497.200
Año 3 (Año 6,5 - Año 7,5)	\$ 2.335.800

Se obtiene así, un valor total de ganancias recibidas de \$ 2.335.800 por la implementación del sistema al finalizar su vida útil.

6. PROTOTIPO DEMOSTRATIVO

Para la explicación de la tecnología seleccionada en el capítulo 3, se desarrolló un prototipo demostrativo, el cual busca simular a pequeña escala la generación de energía eléctrica para su posterior almacenamiento, según la bibliografía consultada [27], [28], [29], [30], [31]. Como primera medida se realizó el diseño en CAD del prototipo, para su posterior construcción y por ultimo una serie de pruebas de generación de voltaje, corriente y potencia respecto al tiempo.

6.1 EXPLICACIÓN DEL PRINCIPIO

Al momento del paso del vehículo por el dispositivo, se produce un movimiento giratorio del rodillo, este debido a la fricción y a la velocidad del vehículo, el cual hace que gire el volante de inercia y este se mantenga girando por un periodo un poco más largo de tiempo, el rodillo y el volante de inercia están conectados a una rueda, la cual al momento de estar en movimiento, y al tener mayores dimensiones que el eje del generador al que está unido, hace que este tenga más revoluciones por minuto, y se produzca la generación de energía eléctrica para su posterior almacenamiento.

El diseño del prototipo en CAD se observa en la figura 36.

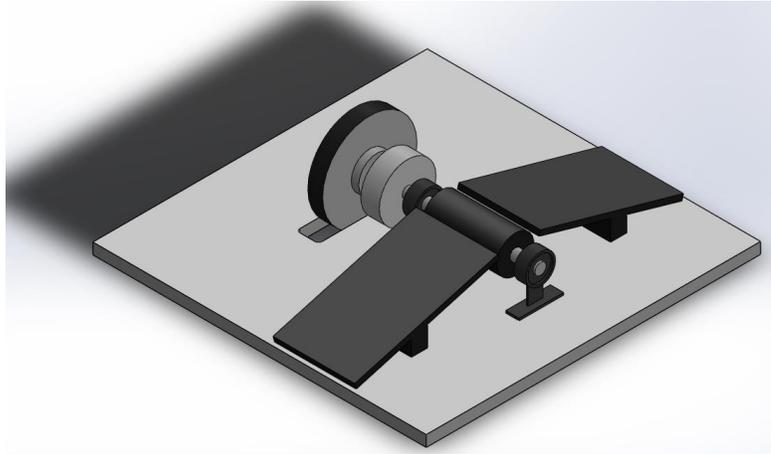


Figura 36. Diseño del prototipo en CAD

6.2 MATERIALES UTILIZADOS

- Rodillo de lámina metálica
- Generador
- Volante de inercia de 3 pulgadas, metal
- Rueda de diámetro 5 Pulgadas de aluminio
- 2 Rampas



Figura 37. Materiales utilizados para el desarrollo del prototipo

En la figura 38, se observa el prototipo demostrativo.

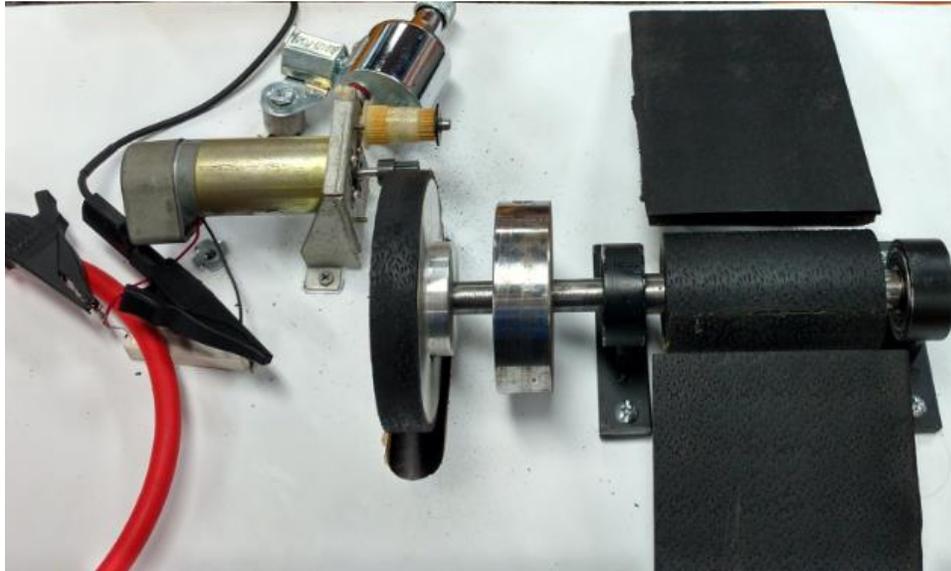


Figura 38. Prototipo demostrativo

6.3 RESULTADOS

Se realizaron pruebas de voltaje y corriente generadas al momento del paso de una moto de un peso aproximado de 130 Kg.

Las pruebas se realizaron durante un minuto, con 5 pasos de la moto sobre el prototipo. Las medidas se registros se llevaron a cabo con un data logger FLUKE 1735 y se comprobaron picos de voltaje mediante multímetro EXTECH. Se registraron voltajes entre 11 y 18 Volts, los cuales se generaron durante aproximadamente 2,5 segundos que es el tiempo en que el dispositivo se mantiene en generación.

En la figura 39, se aprecia el comportamiento del voltaje durante el minuto de pruebas, los picos de generación y el tiempo que se mantiene el voltaje en su máximo punto representa el momento del paso de la moto.

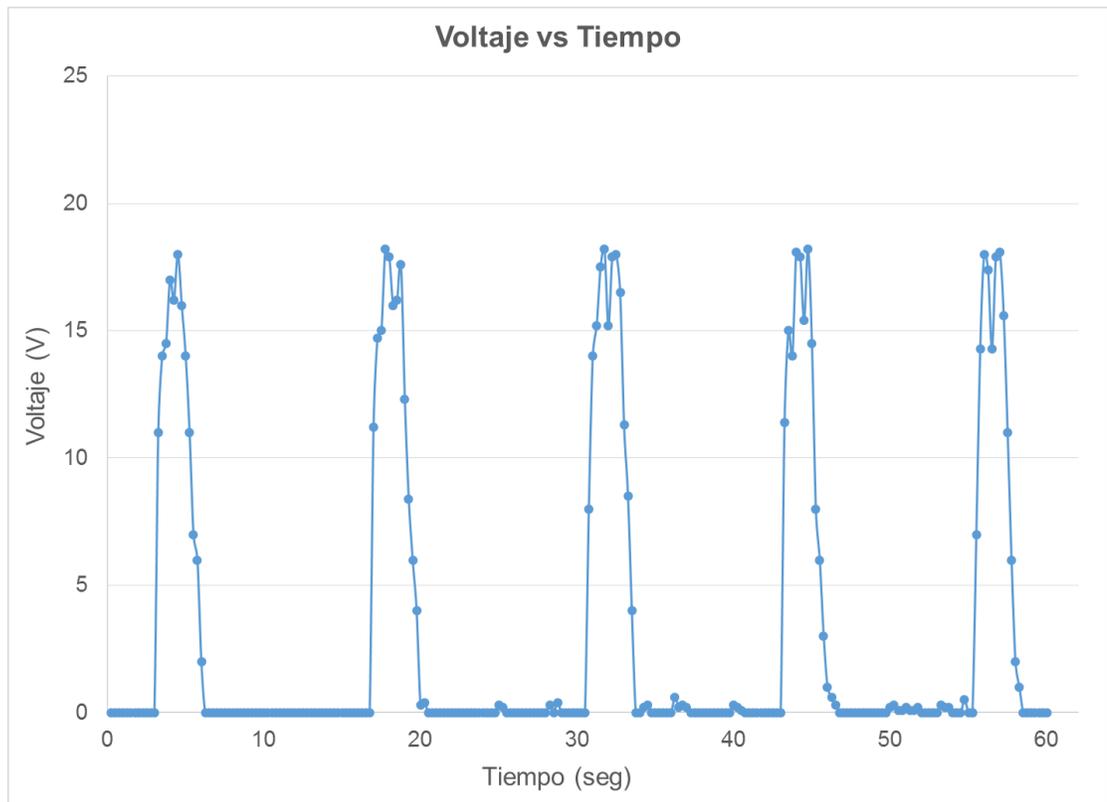


Figura 39. Voltaje generado por el prototipo

La figura 40, representa la corriente que registró el prototipo, en el minuto de pruebas que se realizaron, se registraron Amperajes entre 0,22 y 0,35 Amperios.

De la misma forma en la que se presentó en la medición de voltaje, la corriente se mantuvo por aproximadamente 2,5 segundos, que es el tiempo de generación promedio del dispositivo desarrollado.

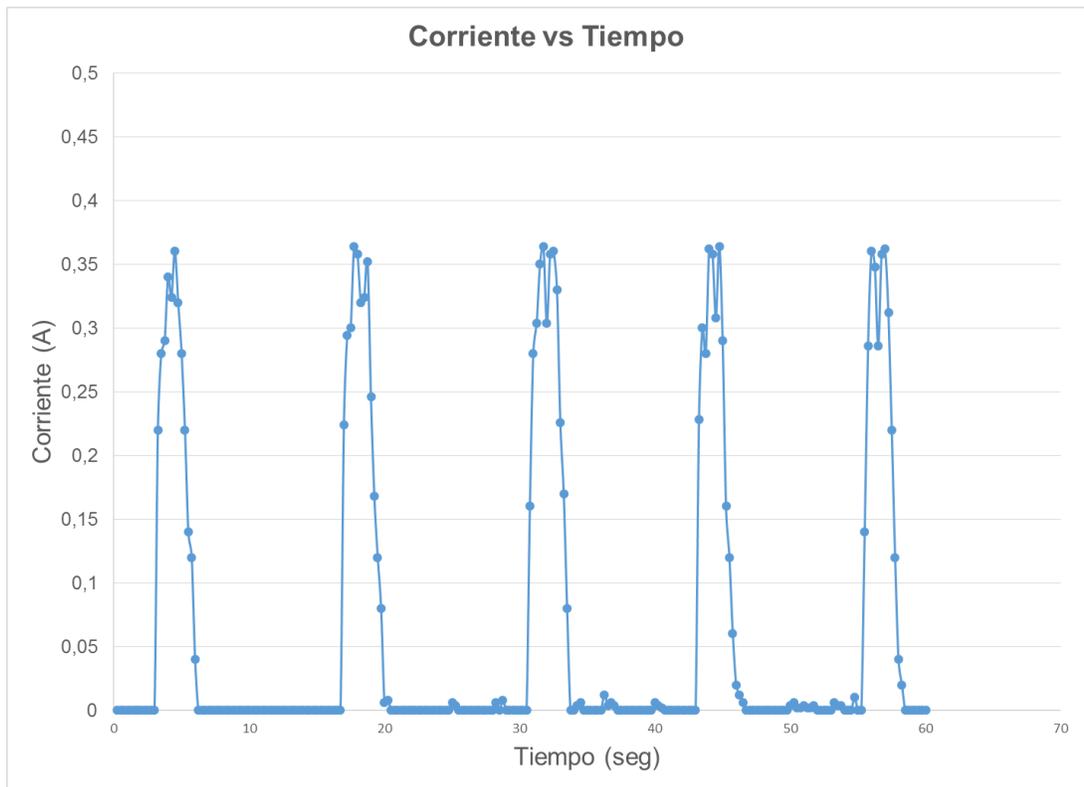


Figura 40. Corriente generada por el prototipo

La potencia generada se cuantificó tomando como carga una resistencia de 50 Ohms, y nos arroja los valores presentados en la figura 41.

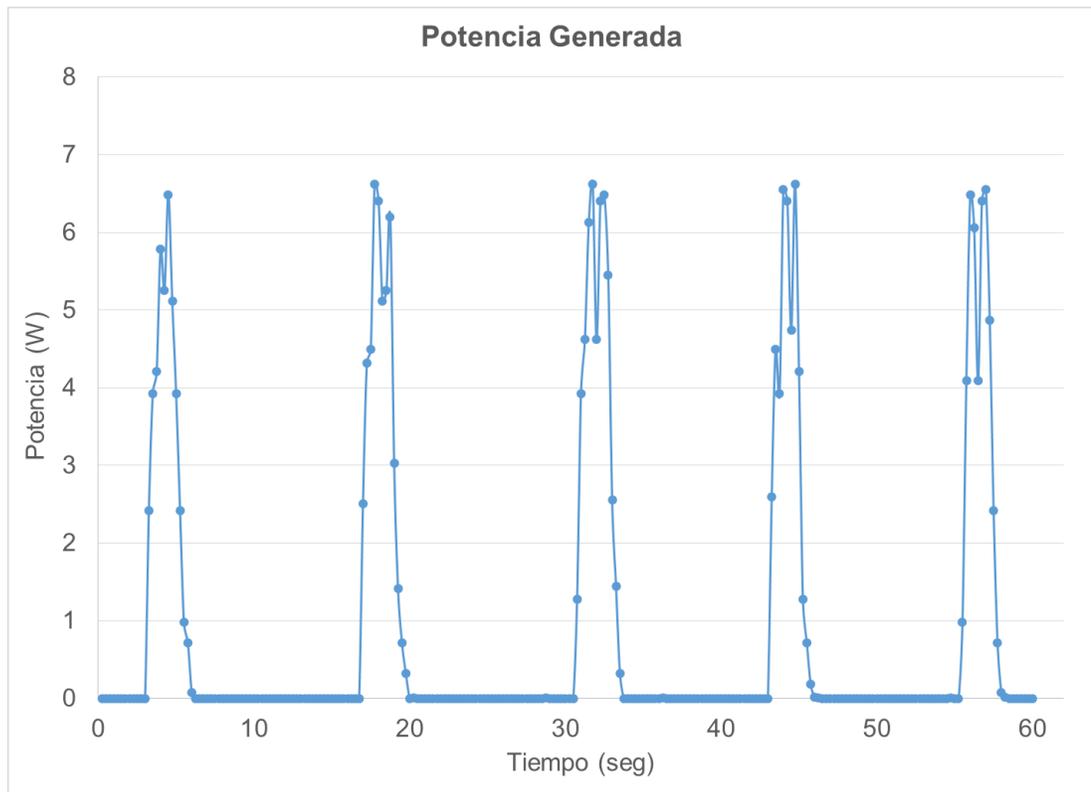


Figura 41. Potencia generada por el prototipo

En cuanto a potencia, se alcanzaron valores entre 5,5 y 6,8 Watts en los picos generados en el momento del paso de la moto.

Según el conteo registrado en el capítulo 4, el número de motos que pasan al día por el lugar seleccionado es de 17.643.

Para determinar la energía que produce el sistema en Wh, es importante tener en cuenta que una moto genera aproximadamente 6,5 W al pasar, durante 2,5 segundos. Es decir, que para tener 6,5 Wh, se deben hallar el número de motos que deben circular, lo cual es sencillo debido a que una hora tiene 3600 segundos y si una moto pasa por el sistema, por un tiempo de 2,5 segundos, se necesitan 1440 motos para generar 6,5 Wh.

$$\text{Número de motos} = \frac{3600}{2,5}$$

Número de motos = 1440

Si 1440 motos producen 6,5 Wh, 17643 que son las que transitan el punto seleccionado producirán 79,63 Wh o 0,08 KWh en un día.

Si en un día se produce 0,08 KWh en un año el sistema producirá 29,2 KWh

$$0,08 \text{ KWh} * 365 \text{ días/año} = 29,2 \text{ KWh/año}$$

Cabe resaltar que es un prototipo a pequeña escala y que aumentando su tamaño y consistencia de materiales, aumentaría su producción en gran tamaño y sería una importante alternativa a implementar a futuro, debido al crecimiento exponencial de las motos en el país.

El costo del prototipo a pequeña escala fue de 200 mil pesos, esto comparado con el precio del KWh en Colombia para alumbrado público que es de \$479,2 y la producción energética que sería de 14.000 pesos según los Kwh producidos al año, a pesar de ser un valor bajo con respecto a la inversión demuestra que es una alternativa a implementar a gran escala mejorando su eficiencia y por lo tanto su producción energética.

6.4 PRUEBAS REALIZADAS CON DIFERENTES PESOS

Se repitieron las pruebas mencionadas anteriormente con una moto YAMAHA CRYPTON FI, de un peso de 96 Kilogramos, para evaluar la relación entre peso y producción energética.

La cual arrojó los siguientes resultados,

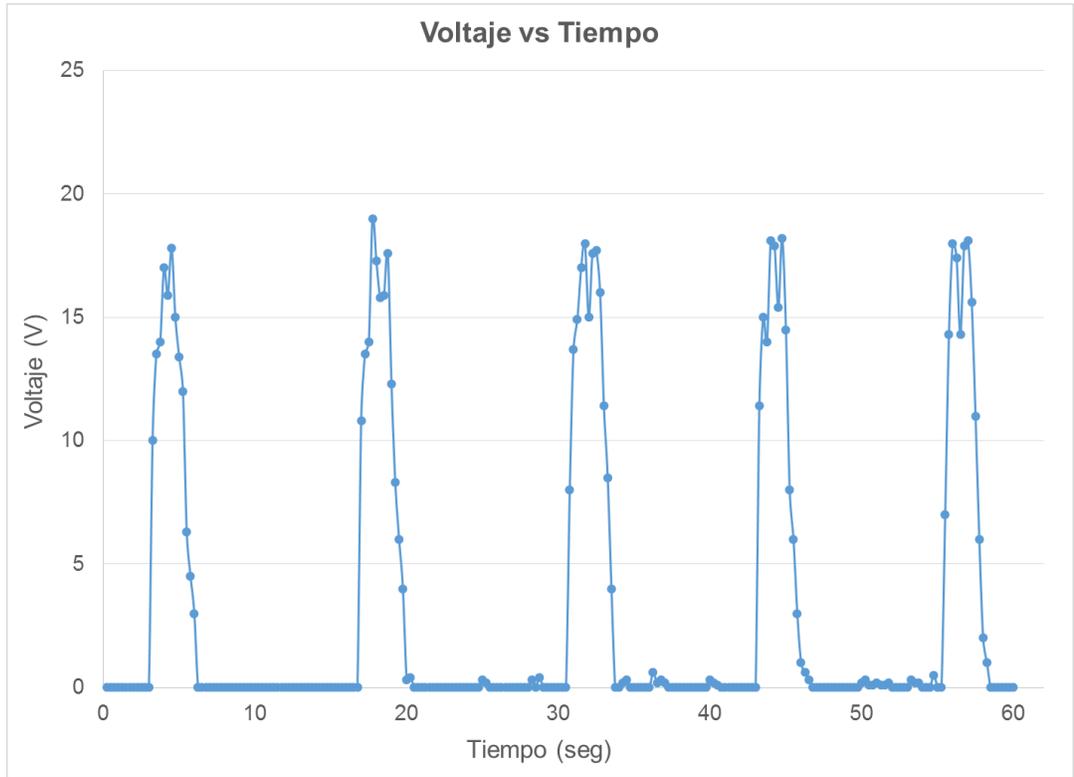


Figura 42. Voltaje generado por motocicleta de 96 Kgs

Como se aprecia en la figura 42, se registraron picos de voltaje entre los 10 y 17 Volts.

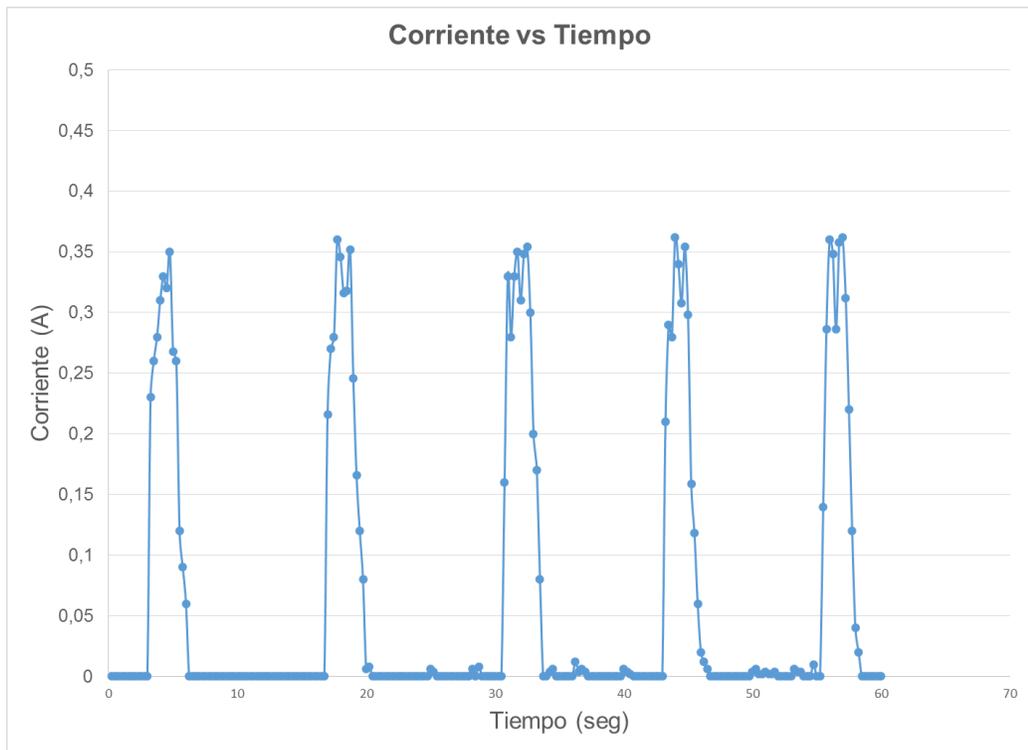


Figura 43. Corriente generada por motocicleta de 96 Kgs

Como se aprecia en la figura 43, se registraron picos de potencia con valores entre los 0,24 y 0,35 Amperes lo que quiere decir que se obtuvo una reducción de aproximadamente el 2% en comparación con la moto de 130 Kgs.

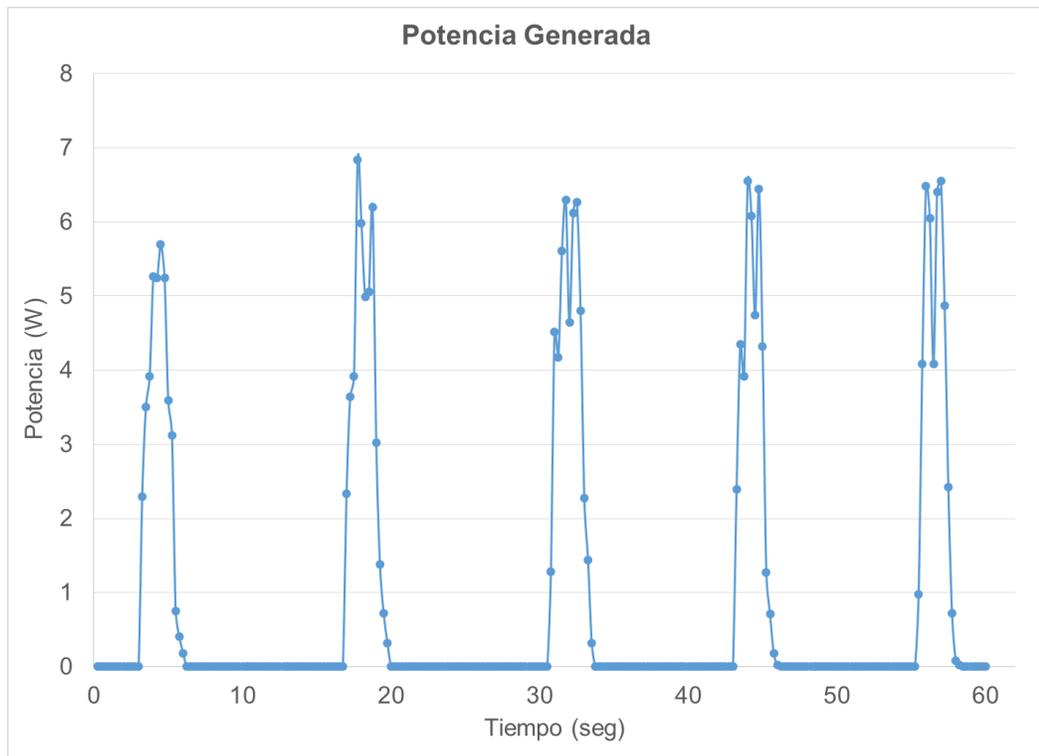


Figura 44. Potencia generada por motocicleta de 96 Kgs

Como podemos observar en la figura 44, se registraron valores de potencia entre los 5,3 y 6.5 Watts.

Todos los valores tanto de voltaje corriente y potencia disminuyeron en muy poca proporción con respecto a la moto de 130 Kg.

A su vez se repitieron las pruebas con una motocicleta YAMAHA BOLT de 230 Kilogramos la cual arrojó los siguientes resultados.

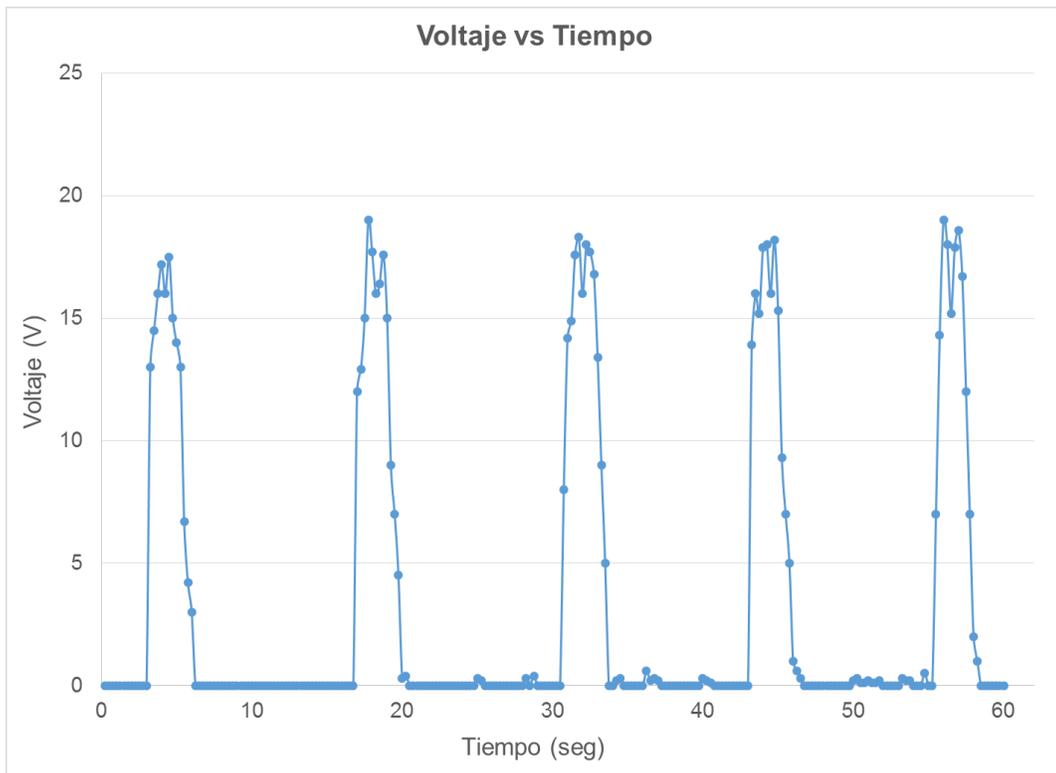


Figura 45. Voltaje generado por motocicleta de 230 Kg

En la figura 45 observamos picos de voltaje con valores entre 12 y 19 Volts, lo cual implica un aumento mínimo con respecto a la moto de 130 Kg.

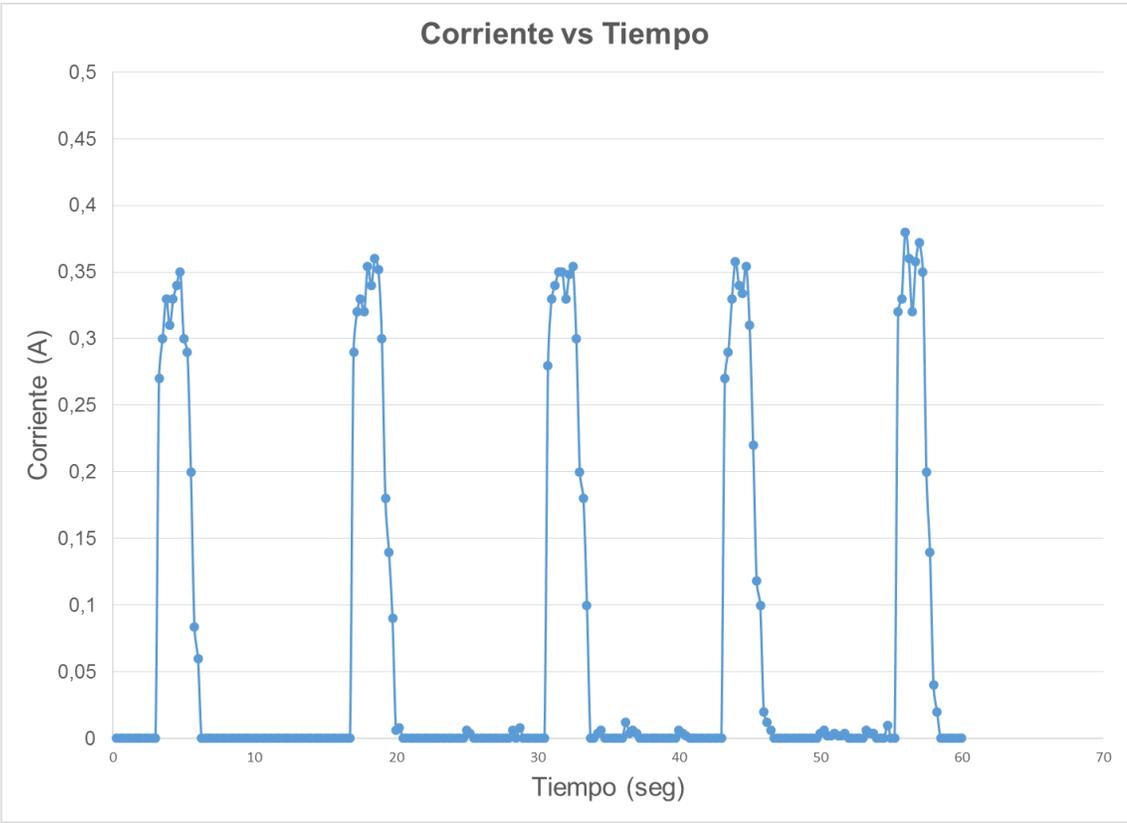


Figura 46. Corriente generada por motocicleta de 230 Kg

La corriente obtenida se dio en valores entre los 0,28 y 0,38 Amperes.

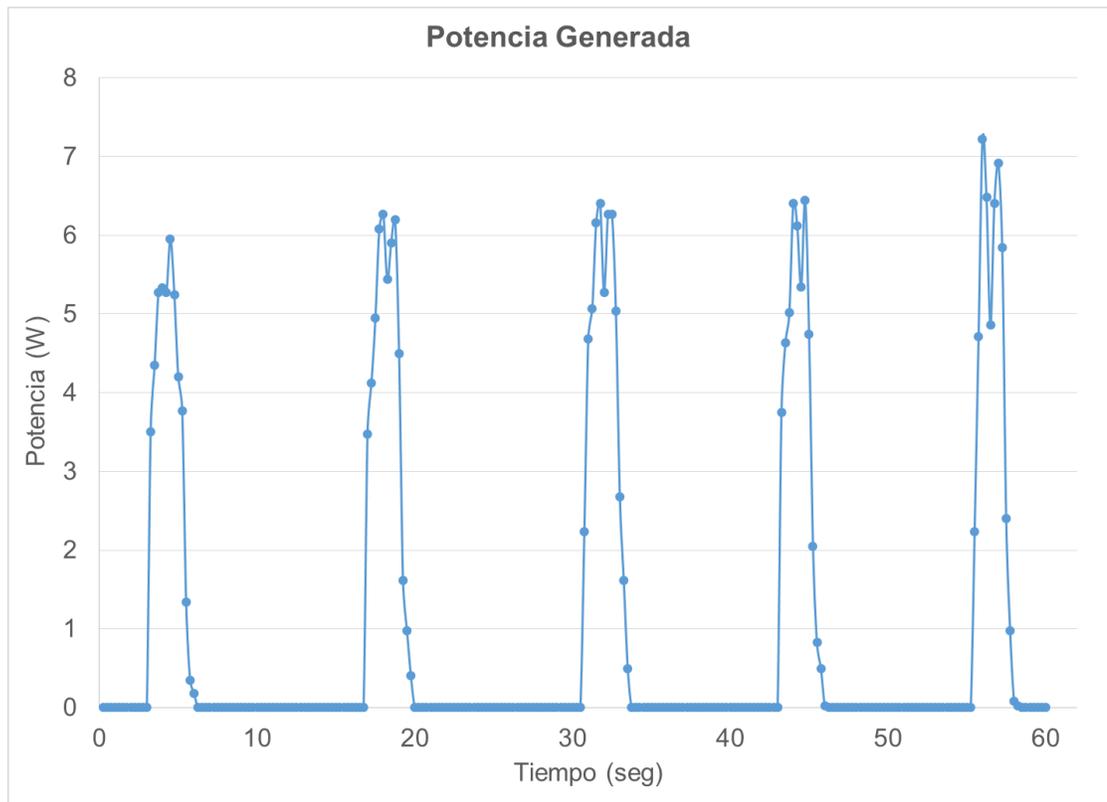


Figura 47. Potencia generada por motocicleta de 230 Kg

Potencia obtenida como se aprecia en la figura 47 de valores entre 5,5 y 7,2 Watts.

Los resultados obtenidos por la moto de 230 Kg permite concluir que el peso influye de manera mínima en los resultados obtenidos, mientras menor sea el peso del automotor menor es la producción, cabe resaltar que la diferencia entre las motos no es más del 5% del valor obtenido en cada una de ellas.

CONCLUSIONES

- Los sistemas de cosechamiento de energía “Energy Harvesting” optimizan el aprovechamiento de las fuentes naturales para la producción de energía, lo cual es una alternativa de gran importancia a futuro dado a su aumento exponencial en materia de eficiencia según la investigación realizada.
- El sistema con mayor factibilidad para implementarse en el ámbito de la ciudad es el de tecnología de generación mediante rotación de tambor, dado a su menor precio y mayor generación con respecto a las otras tecnologías comparadas.
- Según las bases de datos consultadas del flujo vehicular en Bucaramanga, se seleccionó la carrera 33 con calle 63 como el punto para la implementación del sistema, debido a la alta concentración vehicular.
- Los 36495 vehículos que transitan por la vía van a alcanzar una generación de 4.86 KWh diariamente.
- La implementación del sistema seleccionado es factible económicamente, se recuperaría la inversión inicial al año 4,5 de ser instalado.
- Las ganancias obtenidas al finalizar su periodo de vida útil son de 2'389.800, lo que representa un 66% de lo invertido inicialmente.
- El valor alcanzado de voltaje por el prototipo demostrativo, demuestra que un dispositivo ensamblado a gran escala tendría una generación de energía importante al ser aprovechado por un alto flujo vehicular.
- En el ámbito de la generación de potencia que presentó el prototipo, se resalta el valor alcanzado, teniendo en cuenta que es una aplicación a pequeña escala.
- Los relación entre peso y generación es directamente proporcional en el prototipo, teniendo en cuenta un aumento o disminución mínima.

RECOMENDACIONES

- La instalación del dispositivo se recomienda para sitios en los que sea necesaria la inversión de reductores de velocidad como parqueaderos, centros comerciales, etc. Con la generación de energía como valor agregado, y mayor tiempo de vida útil.
- Se recomienda orientar los estudios a motos, esto debido a que aproximadamente el 24% de familias del país tienen este vehículo como medio de transporte, según encuesta de calidad de vida del DANE, y también a que la relación es de 1 a 3 entre carro y motos.
- Además de generación el modelo propuesto puede ser útil para determinar las velocidades de los vehículos, según la relación de rpm generadas, por lo que se recomienda su uso para el control de velocidad en carretera.
- Según el complemento que puede representar este proyecto de investigación para el estudio en motos, se deja abierta la línea de investigación en orientación hacia motos, puesto a la escases de estudios sobre este automotor.

BIBLIOGRAFÍA

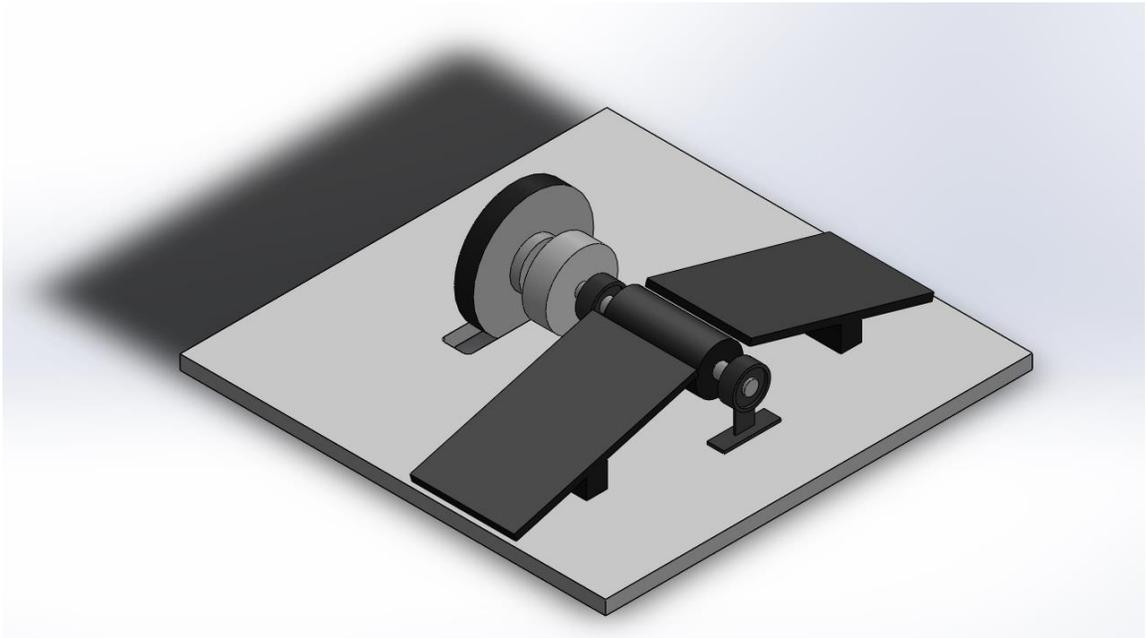
- [1] S. Priya and D. Inman, “Energy Harvesting Technologies”, Springer, 2009.
- [2] G. Martinez, “COSECHAR ENERGÍA: ENERGY HARVESTING una mirada desde la arquitectura a la ciudad”, Triángulo UNO Proyectos, Santiago de Chile, 2013.
- [3] G. Erdogan, “Energy Harvesting for Micro-Electromechanical-Systems (MEMS)”, University of Minnesota, 2005.
- [4] P. Aranguren, D. Astrain, A. Rodríguez, and A. Martínez. “Experimental investigation of the applicability of a thermoelectric generator to recover waste heat from a combustion chamber”. *Applied Energy*, 152:121–130, 2015. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.04.077.
- [5] A. Larrea, O. Barambones and J. Ramos, “Design and implementation of a predictive control system for a photovoltaic generator”, Universidad del País Vasco, Vitoria, España, 2016.
- [6] Nagusia K, “Aprovechamiento de la energía eólica”, Ayuntamiento de Pamplona, Irukeño Udala, Área de Medio Ambiente y Sanidad, 2006.
- [7] O. Farrok, M. R. Islam, “A new optimization methodology of the linear generator for wave energy conversion systems”, 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), pp. 1412 - 1417, 2016.
- [8] O. Farrok, M. R. Islam, “Fuzzy logic based and improved controller for wave energy conversion systems”, *Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT)*, pp. 1 - 6, 2015.
- [9] P. S. V. Jagadeesh; M. Suresh Kumar; M. M. Ali, “Estimation of Heat Content and Mean Temperature of Different Ocean Layers”, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 8, pp. 1251 - 1255, 2015.
- [10] E. Sepúlveda, “Diseño de un Colector de Energía Piezoeléctrico (Energy Harvesting) Mediante Optimización Topológica que Maximice la Transformación de Energía Mecánica en Eléctrica Generada por un Ser Humano al Caminar”, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Mecánica, Medellín, Colombia, 2014.

- [11] A.T. Papagiannakis, S. Dessouky, A. Montoya, “Energy Harvesting from Roadways”, The 6th International Conference on Sustainable Energy Information Technology (SEIT 2016) pp. 758 - 765, 2016.
- [12] J. Escalera, “Simulación de estructuras mecánicas para UAVs”, Universidad Nacional Politécnica de Catalunya, España, 2012.
- [13] Boletín vigilancia tecnológica, Ministerio de ciencia e innovación (2010), nº3 “Materiales Piezoeléctricos”, 12p.
- [14] Standards Committee of the IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Society (1987) IEEE Standard on Piezoelectricity, IEEE, New York.
- [15] Erturk, A., Inman, D. J., Piezoelectric energy harvesting, John Wiley & Sons, 2011, 416 p. ISBN: 978-0-470-68254-8.
- [16] www.treevolt.com, accessed 6-5-2016.
- [17] Lybra. Underground Power. [En línea]. Disponible en: <<http://www.upgen.it/>>
- [18] Z. Zola, D. Schultz, “Motion Power Energy”, Database for advancements in Science and Technology, IIT College of Architecture, Cloud Studio, Chicago City of New Technology, 2013.
- [19] A. Viola, V. Franzitta, G. Cipriani, V. Di Dio, “A Magnetostrictive Electric Power Generator for Energy Harvesting From Traffic: Design and Experimental Verification”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 51, 2015.
- [20] A. Pirisi, M. Mussetta, F. Grimaccia, R. E. Zich, “Novel Speed-Bump Design and Optimization for Energy Harvesting From Traffic”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 14, pp. 1983-1991, 2013.
- [21] U. Ahmed Khan, S. Khan, “Energy Harvesting for Back-up Power Supply Using Speed Humps”, Computer and Communication Engineering (ICCCCE), pp. 24-27, 2014.
- [22] P. Bhagdikar, S. Gupta, N. Rana, “Generation of Electricity with the use of Speed Breakers”, International Journal of Advances in Engineering & Technology, University Chennai Campus, India, 2014.
- [23] W. Adaileh, K. Al-Qdah, M. Mahasneh, “Potential of Power Generation Utilizing Waste Kinetic Energy from Vehicles”, Smart Grid and Renewable Energy, Vol. 3, pp. 104-111, 2012.

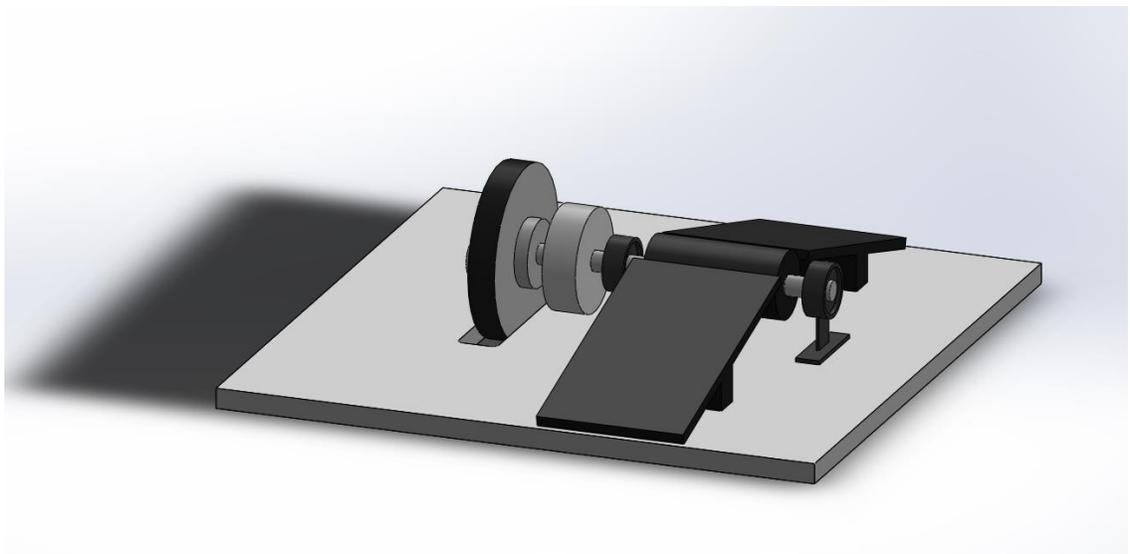
- [24] S. Jaiswal, A. Pundir, S. Saxena, "Electro-Kinectic Road Ramp", International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology (IARJSET), Vol. 2, 2015.
- [25] F. Agatón, "Análisis de la Factibilidad Económica y Ambiental de utilizar baldosas piezoeléctricas en el campus de la Universidad Militar Nueva Granada (UMNG)", Bogotá, Colombia, 2013.
- [26] R.Luna, "Manual para determinar la factibilidad económica de proyectos", Programa Ambiental Regional para Centroamérica PROARCA/CAPAS, 1999.
- [27] A. Ugljesa, J. Börcök, M. Schwarz "Validation and verification of an impulse coupling for safe energy generation by rotation", Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE), 2014 International Symposium, pp. 1 - 5, 2014.
- [28] Z. Y. Guo, X. P. Mu, Z. F. Bai and B. G. Cao, "Research on the Control of Flywheel Battery," Journal of Applied Sciences, Vol. 7, No. 21, 2007, pp. 3312-3316.
- [29] G. J. Aubrecht II, "Energy, Physical, Environmental and Social Impact," 3rd Edition, Pearson Prentice Hall, Saddle River, 2006.
- [30] J. E. Shegley, "Mechanical Engineering Design," McGraw Hill, Boston, 2008.
- [31] D. Amorndechaphon, "High-efficiency PWM DC-AC inverter for small PV power generation system" 2016 International Conference on Cogeneration, Small Power Plants and District, pp. 1 - 6, 2016.

ANEXOS

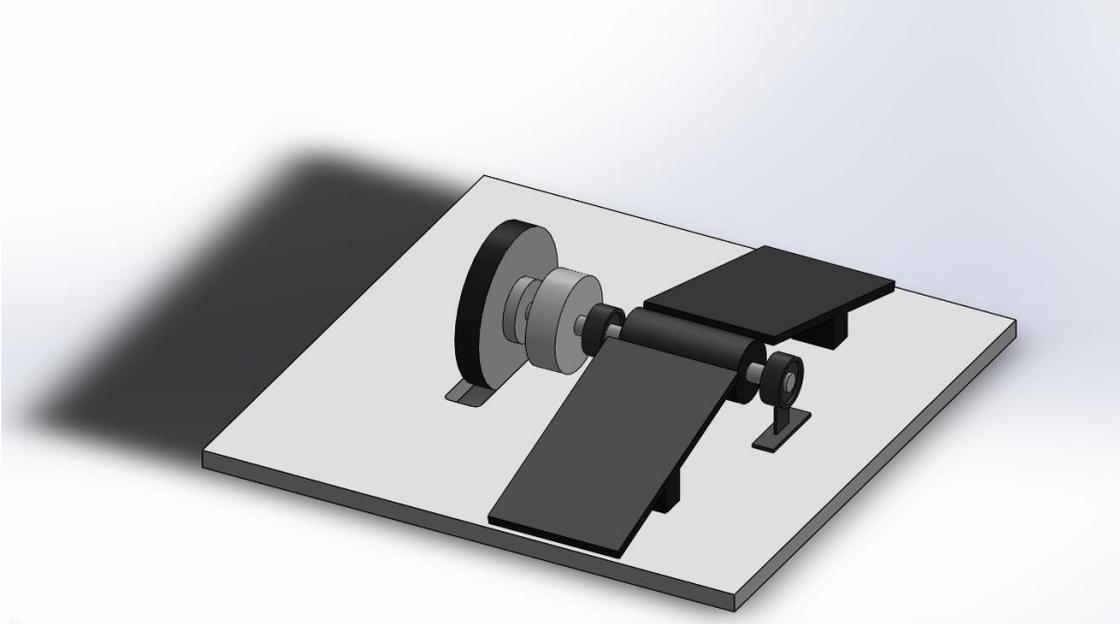
ANEXO A – Vista isométrica prototipo demostrativo



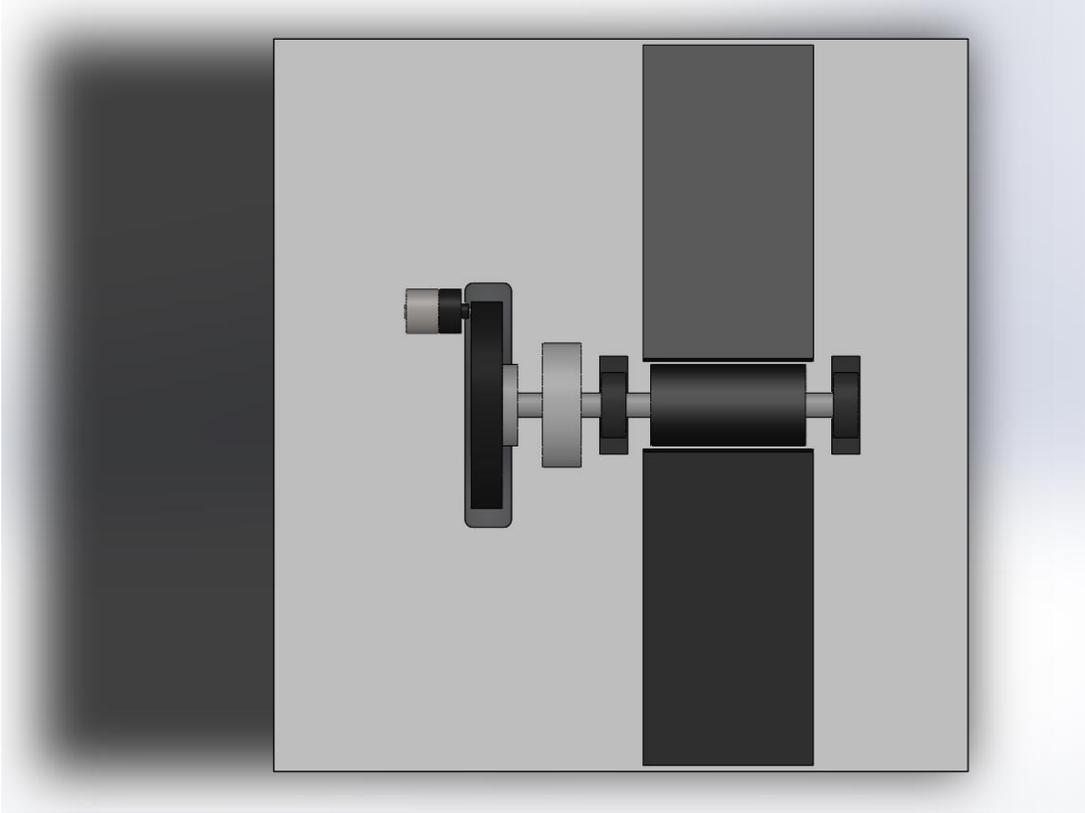
ANEXO B – Vista dimétrica prototipo demostrativo



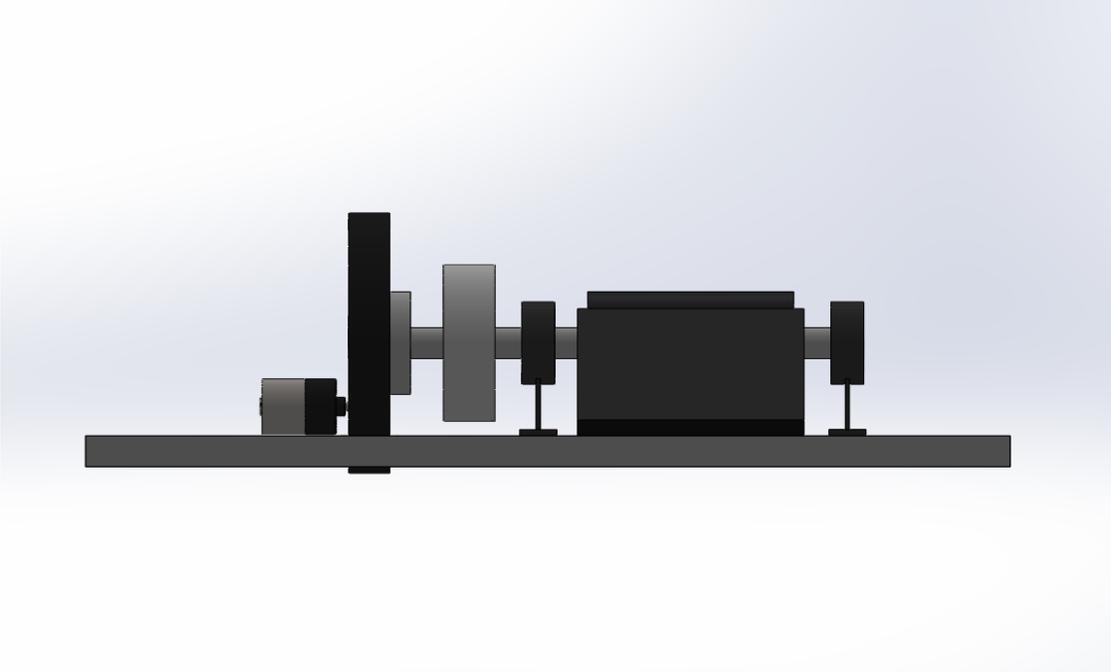
ANEXO C – Vista trimétrica prototipo demostrativo



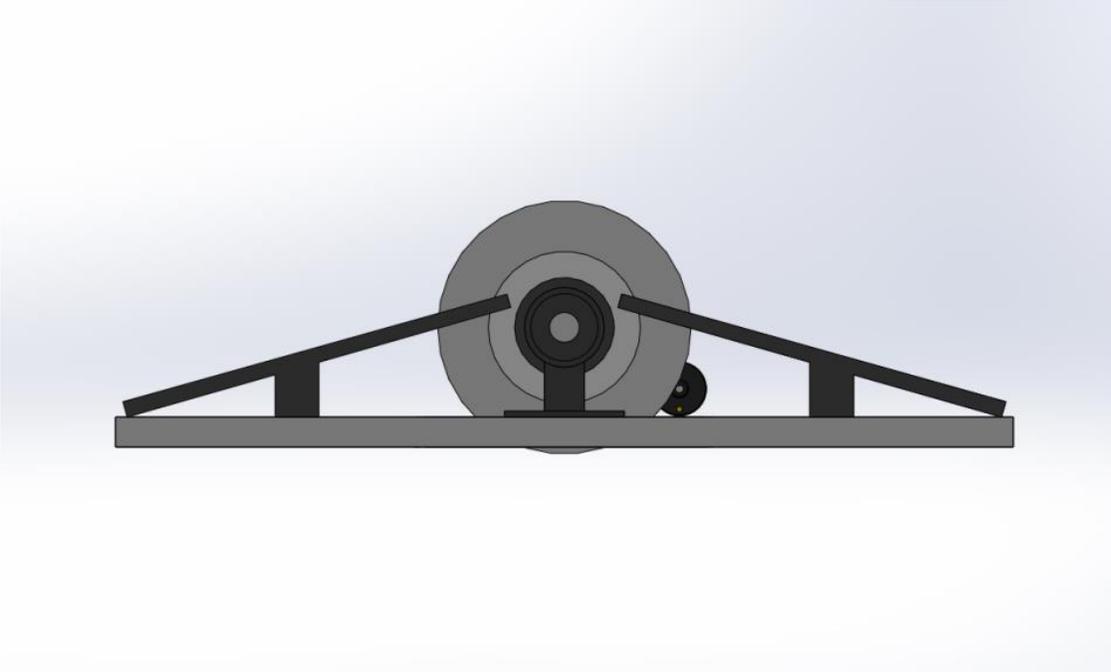
ANEXO D – Vista superior prototipo demostrativo



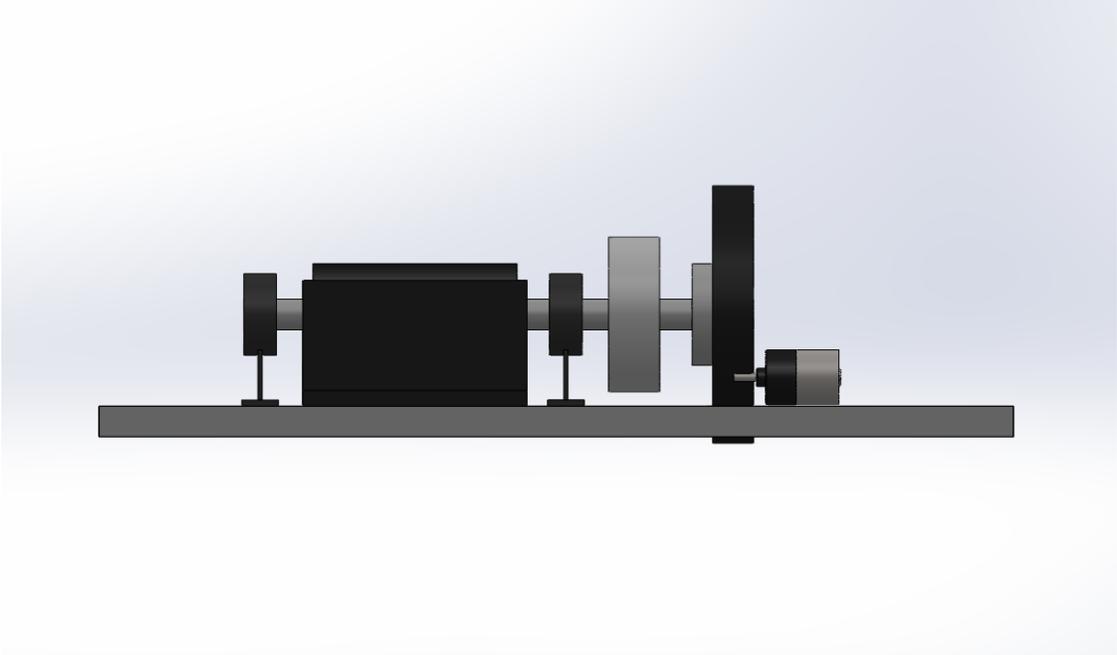
ANEXO E – Vista frontal prototipo demostrativo



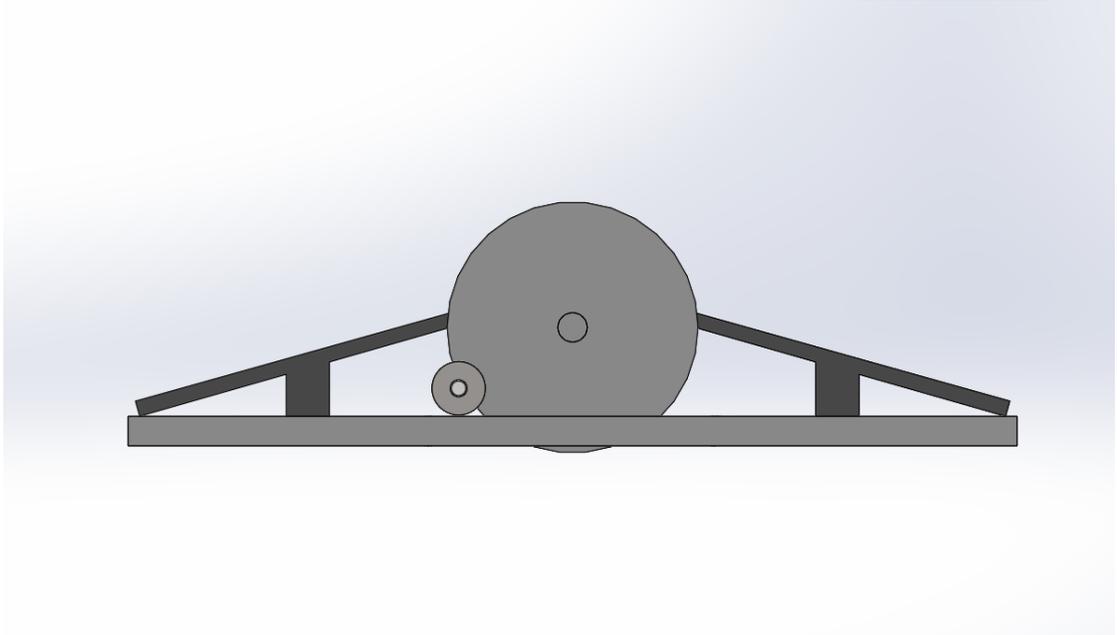
ANEXO F – Vista lateral derecha prototipo demostrativo



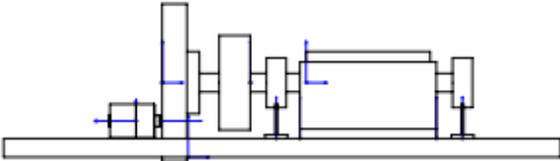
ANEXO G – Vista posterior prototipo demostrativo



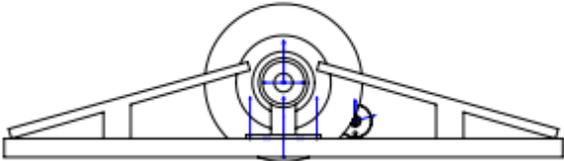
ANEXO H – Vista lateral izquierda prototipo demostrativo



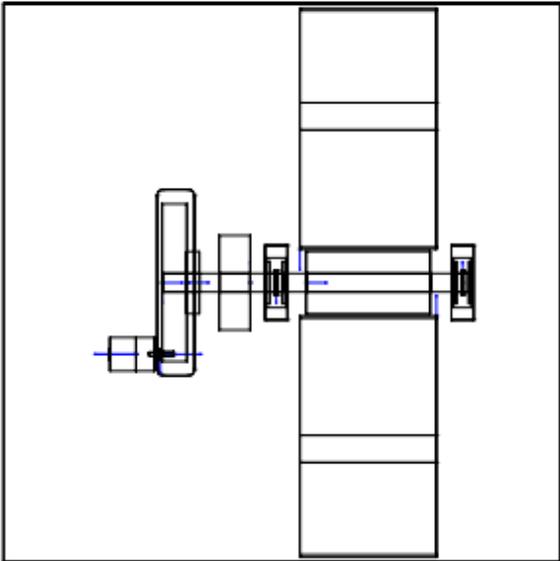
ANEXO I – Plano prototipo



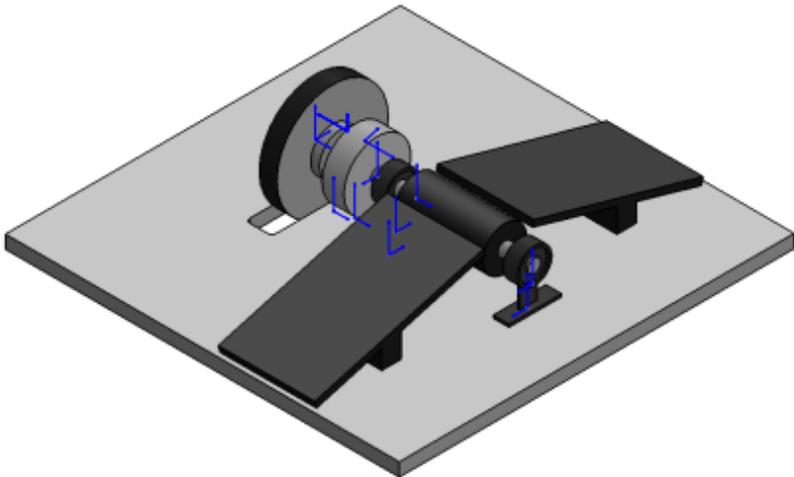
VISTA FRONTAL
ESC 1:5
PULGADAS



VISTA LATERAL
ESC 1:5
PULGADAS



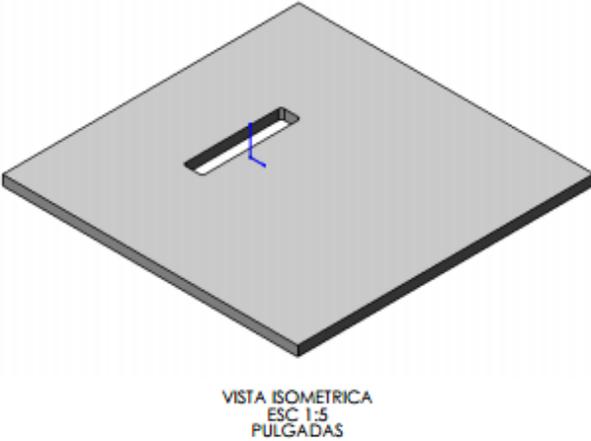
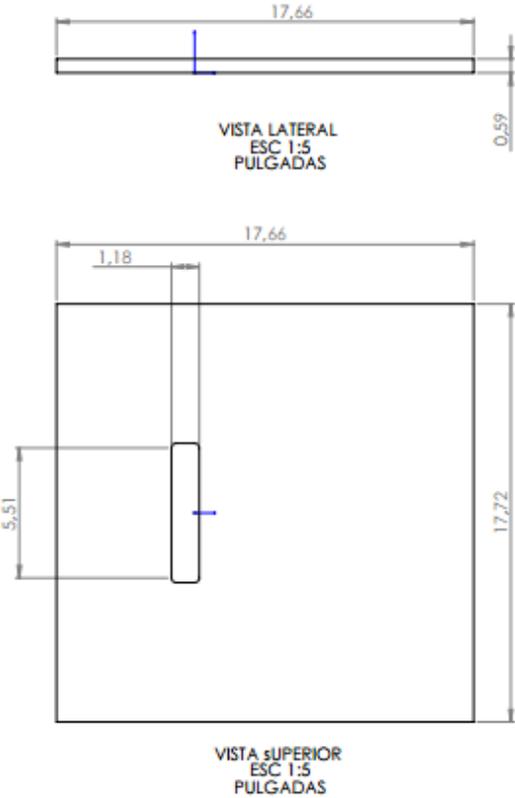
VISTA SUPERIOR
ESC 1:5
PULGADAS



VISTA ISOMETRICA
ESC 1:5
PULGADAS

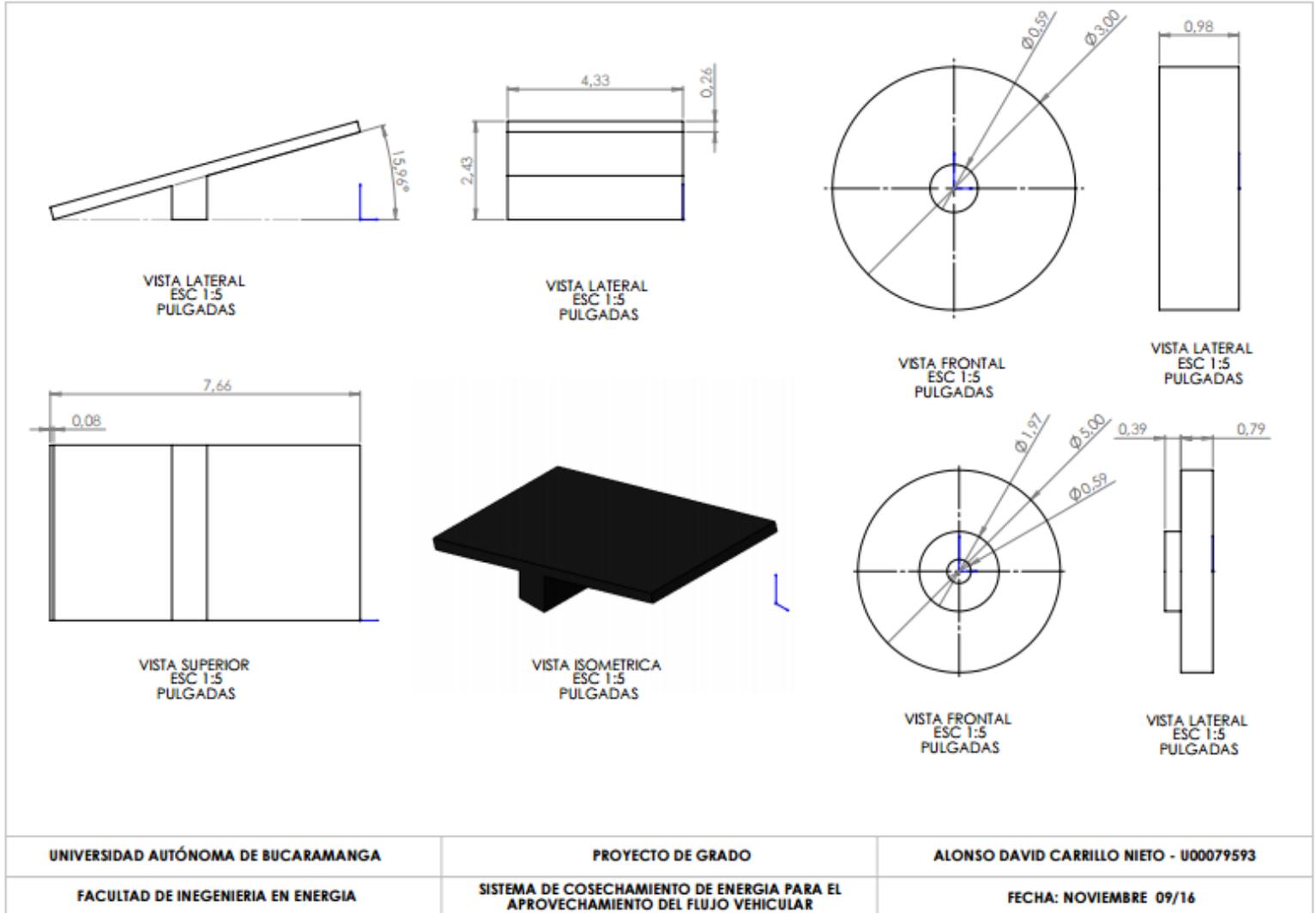
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA	PROYECTO DE GRADO	ALONSO DAVID CARRILLO NIETO - U00079593
FACULTAD DE INGENIERIA EN ENERGIA	SISTEMA DE COSECHAMIENTO DE ENERGIA PARA EL APROVECHAMIENTO DEL FLUJO VEHICULAR	FECHA: NOVIEMBRE 09/16

ANEXO J – Plano base



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA	PROYECTO DE GRADO	ALONSO DAVID CARRILLO NIETO - U00079593
FACULTAD DE INGENIERIA EN ENERGIA	SISTEMA DE COSECHAMIENTO DE ENERGIA PARA EL APROVECHAMIENTO DEL FLUJO VEHICULAR	FECHA: NOVIEMBRE 09/16

ANEXO K – Plano rampa y rodetes



ANEXO L – Plano rodillo y bases del rodillo

