



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN  
ACUMULADOR DE ENERGÍA  
VIBRACIONAL PIEZOELÉCTRICO  
PARA APLICACIONES VIALES EN  
EL PEAJE DE GUACARA**

**Autores:**

Darwin Daniel Flores Delgado

Víctor Enrique López Tortolero

Urb. Yuma II, calle N° 3. Municipio San Diego  
Teléfono: (0241) 8714240 (master) – Fax: (0241) 8712394



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA**  
**UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN ACUMULADOR DE ENERGÍA VIBRACIONAL  
PIEZOELÉCTRICO PARA APLICACIONES VIALES EN EL PEAJE DE GUACARA**

Proyecto del Trabajo de Grado para optar al título de  
**INGENIERO MECÁNICO**

**Autores:**

Darwin Daniel Flores Delgado

Víctor Enrique López Tortolero

**Tutora:**

Ing. Alicia Yánez de Pizzella

San Diego, julio de 2023



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
COORDINACIÓN DE PASANTÍA Y TRABAJO DE GRADO

**ACTA DE APROBACIÓN**

INFORME FINAL DE PASANTÍA

TRABAJO DE GRADO

El jurado designado por la Facultad de Ingeniería para la evaluación del Informe Final de Pasantía o Trabajo de Grado titulado:  
Diseño y Simulación de un Acumulador de Energía Vibracional Piezoeléctrico para Aplicaciones Viales en el Peaje de Guacara

Realizado por el (la) Br. Darwin Daniel Flores Delgado  
C.I. N° 29726060 cursante de la carrera de Ing. Mecánica  
hace constar después de analizar su contenido y oída la exposición oral, considera que el Informe Final o Trabajo de Grado ha obtenido la calificación de:

APROBADO

NO APROBADO

**El Jurado**

Alfonso Vizcaino  
Tutor Académico (Coordinador)  
Nombre: alfonso vizcaino  
C.I.: 4598600

Irahit Rodriguez  
Jurado  
Nombre: IRAHI RODRIGUEZ  
C.I.: 4871349

Wiston Espinoza  
Jurado  
Nombre: Wiston Espinoza  
C.I.: 9885395

Fecha: 6 / 7 / 2023

[Signature]





UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
COORDINACIÓN DE PASANTÍA Y TRABAJO DE GRADO

**ACTA DE APROBACIÓN**

INFORME FINAL DE PASANTÍA

TRABAJO DE GRADO

El jurado designado por la Facultad de Ingeniería para la evaluación del Informe Final de Pasantía o Trabajo de Grado titulado: Diseño y Simulación de un Acumulador de Energía Vibracional Piezodérmico para Aplicaciones Viales en el Peaje de Guacara

Realizado por el (la) Br. Victor Enrique López Tortolero  
C.I. N° 27356521 cursante de la carrera de Ing. Mecánica  
hace constar después de analizar su contenido y oída la exposición oral, considera que el Informe Final o Trabajo de Grado ha obtenido la calificación de:

APROBADO

NO APROBADO

El Jurado

[Signature]  
Tutor Académico (Coordinador)  
Nombre: Alina del Rizo  
C.I.: 4598890

[Signature]  
Jurado  
Nombre: IRANY RODRIGUEZ  
C.I.: 4871349

[Signature]  
Jurado  
Nombre: Wiston Espinosa  
C.I.: 9885895

Fecha: 6/17/2023

[Signature]





REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**CONSTANCIA DE APROBACIÓN PARA LA PRESENTACIÓN  
PÚBLICA DEL TRABAJO DE GRADO**

Quien suscribe, Alicia Yánez de Pizzella, portador de la cédula de identidad N° 4.598.880, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por los ciudadanos Darwin Flores y Víctor López, portadores de las cédulas de identidad N° 29.726.060 y 27.356.521, titulado **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN ACUMULADOR DE ENERGÍA VIBRACIONAL PIEZOELÉCTRICO PARA APLICACIONES VIALES EN EL PEAJE DE GUACARA.**, presentado como requisito parcial para optar al título de ingeniero mecánico, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los 16 días del mes julio del año dos mil veintidós.

Alicia Yánez de Pizzella

C.I: 4.598.880



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA

FI N 013 2022-3CR TG

Valencia, 14 de abril de 2023

Ciudadanos:  
FLORES DELGADO, DARWIN DANIEL  
29.726.060  
LÓPEZ TORTOLERO, VICTOR ENRRIQUE  
27.356.521  
Presente -

Cumplo con informarles que la comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 02-2023 de fecha 08/02/2023 aprobó el proyecto de grado titulado:

**Diseño y simulación de un acumulador de energía vibracional piezoeléctrico para aplicaciones viales en el peaje de Guacara.**

Presentado por ustedes como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Tutor Académico que lo asesorará en el desarrollo de este proyecto a:  
Ing. Alicia Teresa Yáñez de Pizzella, titular de la cédula de identidad V-4.598.880

Atentamente

**Dra. Laura Aurora Sáenz Palencia**  
Decana de la Facultad de Ingeniería



c.c. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado de la Facultad de Ingeniería

## **DEDICATORIA**

Le dedicamos el presente trabajo principalmente a nuestros familiares, seres queridos y amigos. Quienes nos brindaron su apoyo incondicional durante toda la carrera y nos ayudaron a ser mejores para alcanzar nuestra meta.

Nuestros profesores quienes han sido pilares fundamentales en nuestra formación como ingenieros y siempre han estado para nosotros para guiarnos por el mejor camino.

Nuestra tutora Alicia Yáñez de Pizzella, que nos ha guiado hasta el final pese a las adversidades ha sido una gran mentora, siempre presente y atenta con sus alumnos, tuvimos el honor de que fuera nuestra tutora en este trabajo de grado para que nos guiará a realizarlo de la mejor manera posible.

*-Darwin Flores y López Víctor*

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primeramente a mi madre Nohemy Delgado, quien me ha brindado su apoyo incondicional desde que tengo memoria, siempre guiándome por el mejor camino para ser la persona que soy en día, todos mis logros son tuyos madre porque sin ti no los hubiera conseguido, gracias por todo el amor y el cariño que siento por ti es inconmensurable.

A mí padre Ángel Flores, que ha hecho un esfuerzo desmedido para que yo pueda estudiar y tener tantas comodidades, pese a las adversidades siempre has salido adelante y es un ejemplo que quiero seguir el resto de mi vida, gracias por todo.

A mi hermana Rosangel Flores, que siempre desea lo mejor para mí y sé que siempre voy a contar con ella, gracias por acompañarme durante toda mi vida y ser un pilar importante en ella.

A mis tías Nélide Delgado, Gladys Delgado, Rosangel Córdova y Luisana Córdova. Han tenido atenciones y cuidados como si de madre e hijo se tratará y sinceramente así lo considero, no tengo palabras para todo lo que han hecho por mí y todo lo que me han enseñado, siempre me han apoyado y creído en mí, gracias a ustedes soy la persona que soy hoy en día con sus palabras de aliento, consejos y enseñanzas.

A mi padrino Héctor Nieves, que ha tenido mucha influencia en mi vida con sus consejos y palabras de aliento, siendo un buen ejemplo a seguir enseñándome valores de ética y responsabilidad durante gran parte de mi vida.

A mis primos Daniela Salcedo, Luis Lovera y Jorge Sánchez. Con quiénes he pasado muchos buenos momentos a lo largo de mi vida, me han brindado su apoyo y siempre están para mí, los considero mis hermanos.

A mí gran amigo, Luis Escobar. Hermano siempre me has apoyado y has estado para mí durante tantos años, sin duda eres una de las mejores personas de mi vida estoy agradecido por todo lo que has hecho por mí.

A todos los profesores de la escuela de mecánica por educarnos e inculcarnos tantos valores, transmitirnos tantos conocimientos al largo de estos años y ser pilares fundamentales en nuestra formación académica, gracias Alicia Yáñez, Giovanni Pizzella, Donato Romanello, Fredy Barragán, Yndira Rodríguez y Luis Ortega.

Y por último a mi compañero Víctor López, quien ha sido mi compañero de estudios durante mucho tiempo y junto a César Gómez y Dylan Rosales se han convertido en mis mejores amigos durante esta etapa, gracias por el apoyo y los buenos momentos que hicieron que el tiempo en la universidad fuera más ameno

*-Darwin Flores*

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradecer a Dios por darme la salud, sabiduría y paciencia necesaria para afrontar este recorrido académico, por no cerrarme los caminos y permitirme llegar a este momento.

A mi padre, Enrique López por hacer un esfuerzo inhumano para darme un estudio de calidad y cumplir este anhelado sueño, a pesar de todas las adversidades que se presentaron a lo largo de este camino nunca se rindió y me dio la fuerza e inspiración para seguir adelante, ante todo, por ser un ejemplo a seguir y siempre ayudándome a crecer y ser una mejor persona, por siempre apoyarme a pesar de los errores que pude haber cometido hasta llegar aquí.

A mi Madre, Arlenis Tortolero que siempre fue un apoyo emocional, por siempre estar para mí en todo momento y ayudarme a afrontar este largo camino dándome ánimos para conseguir mis objetivos y por el inmenso amor recibido, además de soportarme y guiarme en los caminos de la vida enseñándome las cosas buenas y malas que me permitieron convertirme en la persona que soy.

A mis familiares, por ser un apoyo incondicional y por estar pendiente para darme los consejos necesarios. Especialmente a mis abuelos, Gonzalo López y Victor Tortolero. Por cuidarme y guiarme desde el cielo a lo largo de todo este camino recorrido.

A la profesora Alicia Yanes de Pizzella, por todo su apoyo y su atención brindada en este camino, especialmente por tanta paciencia brindada y por estar tan pendiente del proceso que se realizó para llegar hasta aquí.

A los profesores, Fredy Barragán, Yndira Rodríguez, Giovanni Pizzella, Luis Ortega, Donato Romanello, Irahis Rodríguez, Wiston Espinoza, Manuel Aponte y Fernando Montero. Les agradezco su Orientación, conocimiento y experiencia brindadas a lo largo de toda la carrera los cuales han sido fundamentales en mi formación académica y personal.

A mis colegas de estudio, Cesar Gómez, Dylan Rosales, José Brito, Samuel Lovera, Alexander Figueroa, Ismael Ayaro, Jefferson Méndez, Luis Barrios y Luis Bueno, y a todos los compañeros que compartieron junto a mí este largo camino académico. Especialmente a mi compañero y hermano Darwin Flores, por ser un apoyo incondicional durante gran parte de la carrera, le agradezco por su colaboración, amistad y compañerismo. Juntos hemos afrontado desafíos y celebrado logros.

*-Víctor López*

## ÍNDICE GENERAL

<b>CONTENIDO</b>	<b>pp.</b>
LISTA DE CUADROS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE GRÁFICOS.....	xii
LISTA DE TABLAS.....	xiii
RESUMEN INFORMATIVO.....	x
INTRODUCCIÓN.....	1
<b>CAPÍTULO</b>	
<b>I EL PROBLEMA</b>	
1.1 Planteamiento del Problema.....	3
1.2 Formulación del Problema.....	4
1.3 Objetivos de la Investigación.....	5
1.3.1 Objetivo General.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos.....	5
1.4 Justificación.....	5
1.5 Alcance y Limitaciones.....	6
<b>II MARCO TEÓRICO</b>	
2.1 Antecedentes.....	7
2.2 Bases Teóricas.....	10
2.2.1 Piezoelectricidad.....	10
2.2.2 Constantes Piezoeléctricas.....	12
2.2.3 Clasificación de los Materiales Piezoeléctrico.....	14
2.2.4 Aplicaciones de los Materiales Piezoeléctricos.....	16
2.4 Bases Legales.....	16
2.4.1. Normas COVENIN.....	16
2.5 Definición de Términos.....	17

### III MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de Investigación.....	19
3.2 Diseño de la Investigación.....	20
3.3 Nivel de la investigación.....	20
3.4. Población y muestra.....	21
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	21
3.5.1. Técnicas de Recolección de Datos.....	22
3.5.2. Instrumentos de Recolección de Datos.....	22
3.6. Técnicas de análisis de resultados.....	24
3.7. Fases Metodológicas.....	25
2.8. Cuadro de Operacionalización de Variables.....	26
3.9. Confiabilidad de la investigación.....	26

### IV RESULTADOS

4.1 Diagnosticar el Estado del Alumbrado de la vía de la Autopista Regional del Centro desde el peaje de Guacara hasta San Joaquín.	27
4.1.1 Matriz FODA.....	30
4.1.2 Diagrama de Pareto.....	30
4.1.3 Diagrama de Ishikawa.....	31
4.2 Análisis y Cálculos Fundamentales del Diseño del Acumulador.....	32
4.2.1 Cálculo del consumo eléctrico de las luminarias.....	32
4.2.2 Flujo Vehicular y Peso de los Vehículos.....	34
4.2.2.1 Estudio del Tráfico.....	34
4.2.2.2 Cálculo de los vehículos livianos.....	37
4.2.2.3 Cálculo de los Vehículos Pesados.....	38
4.2.3 Selección de materiales adecuados en el diseño del acumulador de energía	39
4.2.3.1 Monocristales.....	41
4.2.3.2 Polímeros.....	43
4.2.3.3 Cerámicas.....	44
4.2.3.4 Aplicación de las Restricciones a las Probables Soluciones...	45

4.3.4.1	Ponderación de Criterios.....	46
4.3.4.2	Ponderación de Soluciones Respecto a cada Criterio.....	47
4.3.4.3	Ponderación Final.....	49
4.2.3.5	Soluciones para la Selección de la Geometría y Estructura del Piezoeléctrico.	49
4.2.3.6	Modelo PZT.....	53
4.4	Diseño y Simulación el Acumulador de Energía Vibracional Piezoeléctrico.....	55
4.4.1	Configuración de Conexiones del Piezoeléctrico PTZ.....	55
4.4.2	Modelado del Circuito de Carga.....	59
4.4.3	Colocación de los Piezoeléctricos PZTs.....	66
4.4.3.1	Conexión en Paralelo de 4 PZTs.....	66
4.4.3.2	Modelado de Circuito Equivalente.....	72
4.4.3.3	Cálculo de Potencia por Módulo de PZTs.....	74
4.4.4	Aplicación del Generador de Energía Vibracional Piezoeléctrico en el Sistema de Alumbrado	76
4.4.5	Cálculo del Banco de Baterías.....	
4.5	Evaluar la Viabilidad Ambiental y Económica del Proyecto.....	80
4.5.1	Viabilidad ambiental.....	81
4.5.2	Viabilidad económica .....	82
	CONCLUSIONES.....	85
	RECOMENDACIONES.....	86
	REFERENCIAS.....	87
	APENDICES.....	89
	ANEXOS.....	95
	PLANOS.....	108

## LISTA DE CUADROS

CUADRO	DESCRIPCIÓN	pp.
1	Guión de Preguntas.....	29
2	Matriz FODA.....	30
3	Probables soluciones con respecto a las restricciones.....	44
4	Comprobación lógica de los criterios.....	45
5	Soluciones con respecto al criterio 1.....	45
6	Soluciones con respecto al criterio 2.....	46
7	Soluciones con respecto al criterio 3.....	46
8	Soluciones con respecto al criterio 4.....	46
9	Soluciones con respecto al criterio 5.....	46
10	Valor final de cada solución.....	47
11	Comprobación lógica de los criterios de la geometría del material....	49
12	Soluciones con respecto al criterio 1.....	50
13	Soluciones con respecto al criterio 2.....	50
14	Soluciones con respecto al criterio 3.....	51
15	Valor final de cada solución.....	51
16	Indicadores de viabilidad ambiental.....	82
17	Precios de los materiales.....	84

## LISTA DE FIGURAS

### DESCRIPCIÓN

FIGURA		pp.
1	Diagrama esquemático para dos tipos de piezoeléctricos.....	10
2	Ejes de un elemento piezoeléctrico.....	12
3	Peaje de Guacara.....	28
4	Diagrama de Ishikawa.....	32
5	Distancia entre el Peaje de Guacara y San Joaquín.....	34
6	Canales del Peaje de Guacara.....	36
7	Representación de la superficie de Contacto entre el neumático y la carretera.....	38
8	piezoeléctrica platina.....	48
9	Piezoeléctrico Circular.....	48
10	Ilustración de transductores PZT para (A) plato, (B) puente, (C) puente con tapa de arco y (D) puente con tapa de arco.....	49
11	Circuito equivalente simplificado.....	54
12	25 Piezoeléctricos colocados en 5 series de 5.....	56
13	25 Piezoeléctricos conectados en 5 series de 5.....	57
14	Circuito equivalente de n PZTs conectados en paralelo.....	58
15	Circuito equivalente de n PZT conectados en serie.....	59
16	Señales producidas por los PZTs, (a) Señal continua, (b) Señal de pulsos.....	60
17	Onda generada por un piezoeléctrico al paso de vehículos a 20 km/h.....	61
18	Modelo con onda rectificadora.....	62
19	Condensador de filtrado Condensador (a), Señal filtrada (b).....	62
20	Modelos de regulador de tensión.....	63
21	Circuito de carga simple completo.....	64
22	Evolución de la forma de onda de	65

	impulsos según bloques del circuito.....	
<b>23</b>	Circuito con 4 PZTs conectados en paralelo.....	65
<b>24</b>	Panel tipo "Sándwich" para montaje de 4 PZTs.....	66
<b>25</b>	Circuito equivalente baldosa de 4 PZTs en paralelo.....	67
<b>26</b>	Modelo de 30 capas propuesto para reducir de forma.....	70
<b>27</b>	Colocación de módulos formados por piezoeléctricos en filas de 625 baldosas bajo las bandas de rodadura.....	72
<b>28</b>	Circuito equivalente en condiciones de tráfico normales.....	73
<b>29</b>	Tensión en la carga para un módulo en condiciones normales para $1M\Omega$ .....	74
<b>30</b>	Regulador de corriente colocado como protección entre el módulo y la carga.....	74
<b>31</b>	Montaje del Módulo PZT en l carreta.....	77
<b>32</b>	Montaje del Módulo PZT en l carreta.....	78

## LISTA DE GRÁFICOS

	DESCRIPCIÓN	
GRÁFICOS		pp.
1	Diagrama de Pareto.....	31
2	Voltaje pico frente a la tensión aplicada para un PZT NCE51.....	53
3	Gráfica de potencia entregada para modelo de 4 PZTs en paralelo.....	69
4	Potencia vs Resistencia de Carga en modelo de 120 PZTs en paralelo con distintas cargas.....	71
5	Curva de potencia para un módulo de PZTs en condiciones de tráfico normales.....	76

## LISTA DE TABLAS

### DESCRIPCIÓN

TABLA		pp.
1	Datos del diagrama de Pareto.....	31
2	Tipos de vehículos y sus respectivas tarifas.....	35
3	Temperatura Aproximada del Asfalto en la Carretera a Diferentes Temperaturas del Aire.....	28
4	Espesor Aproximado del Asfalto Según el Tipo Carretera.....	40
5	Propiedades piezoeléctricas y mecánicas del titanato de circonato de plomo (PZT).....	42
6	Propiedades piezoeléctricas y mecánicas del Fluoruro de polivinilideno.....	43
7	Propiedades piezoeléctricas y mecánicas del titanato de estroncio (SrTiO3).....	43
8	Propiedades de PZT NCE51.....	52
9	Voltaje pico frente según la fuerza aplicada para piezoeléctrico NCE51 (datos teóricos).....	53
10	Valores obtenidos en modelo de 4 pzts en paralelo con distintas cargas, (condiciones exteriores de un vehículo ligero cada 5 segundos).....	68
11	Valores obtenidos en modelo de 120 PZTs en paralelo con distintas cargas, (condiciones exteriores de un vehículo ligero cada 5 segundos).....	71
12	Valores obtenidos en módulo de 2 5metros y un carril de 4 PZTs en paralelo con distintas cargas, (condiciones exteriores de un vehículo ligero cada 5 segundos).....	75
13	Costo total del proyecto.....	85



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

## **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN ACUMULADOR DE ENERGÍA VIBRACIONAL PIEZOELÉCTRICO PARA APLICACIONES VIALES EN EL PEAJE DE GUACARA**

**Autores:** Darwin Daniel Flores Delgado  
Víctor Enrique López Tortolero  
**Tutora:** Ing. Alicia Yáñez de Pizzella  
**Fecha:** junio 2023

### **RESUMEN INFORMATIVO**

El presente trabajo tuvo la finalidad de realizar el diseño y simulación de un acumulador de energía vibracional piezoeléctrico para aplicaciones viales en el peaje de Guacara. Siendo la investigación desarrollada identificada en cuanto al tipo de investigación como proyecto factible, con un diseño de trabajo de campo y nivel descriptivo, bajo la línea de investigación: Gestión ambiental, hábitat y vivienda. El objetivo principal de la investigación es lo que permitirá el desarrollo del trabajo, respaldándose de bibliografías y herramientas de adquisición de datos para comprender el funcionamiento de los materiales piezoeléctricos, tanto sus propiedades mecánicas como eléctricas y su comportamiento al sufrir deformación debido a una tensión mecánica, así mismo se realiza el estudio de los sistemas harvesting de energía y la viabilidad tanto económica como ambiental de un sistema alimentado por la energía transmitida por la circulación de vehículos en la Autopista Regional del Centro. Por medio de un diagnóstico en la zona de estudio se obtuvieron datos importantes en la investigación a través de observación directa, entrevista estructurada y revisión documental. Los resultados demuestran que, pese a ser una inversión costosa del proyecto e mismo ofrece una gran confiabilidad en el rendimiento y durabilidad del mismo, además de que su funcionamiento se realiza con energía renovable es ideal para el medio ambiente. La investigación contempla el modelado de los circuitos, montaje del modelo piezoeléctrico seleccionado, planos y simulación del funcionamiento del acumulador de energía vibracional piezoeléctrico.

**Descriptor:** propiedades mecánicas, energía, piezoelectricidad, propiedades eléctricas

## INTRODUCCIÓN

Las fallas en el sector energético que se han ido desarrollando a lo largo de varios años han tenido un gran impacto a nivel social por la falta de confiabilidad en el servicio eléctrico convencional. Dichas fallas han ido evolucionando con el tiempo debido a una mala administración, falta de mantenimiento, falta de combustible, ausencia de personal técnico, etcétera.

Dichas fallas se han tratado de distintas maneras a través de la instalación de centrales termoeléctricas, con racionamientos en todo el país y a través de importación de energía eléctrica desde Colombia. Entre 2008 y 2015 empresas como PDVSA y Corpoelec pudieron instalar un total de 16.000 MW de generación de energía eléctrica lo que generó en su momento un gasto de 33.000 millones de dólares americanos. Actualmente se ha perdido gran parte de esa capacidad de producción por la falta de mantenimiento y la incapacidad de suministrar el combustible necesario. Esto ha traído como consecuencia múltiples apagones a nivel nacional siendo el significativo en 2019 que afectó a 23 estados del país y se prolongaron desde el 7 de marzo hasta el 15 del mismo mes, esto causó alrededor de 1.100 millones de dólares en pérdidas.

Para la realización de este diseño del acumulador de energía fue necesario adquirir conocimientos de distintas áreas como lo son la transformación de la energía, circuitos y máquinas eléctricas, simulación y análisis de diseño mecánico, etcétera. Para lograr cumplir con el desarrollo del diseño y simulación del acumulador de energía vibracional piezoeléctrico para aplicaciones viales, aprovechando la energía que ejercen los vehículos que transitan por la Autopista Regional del Centro. Energía que puede ser utilizada en el alumbrado público de la vía para brindar mayor seguridad a los usuarios que transitan por esta autopista. Al tener un suministro de energía alternativo al convencional aumenta la confiabilidad de la vía ya que puede ser utilizado en caso de emergencia cuando falle el servicio eléctrico convencional, con la finalidad de evitar accidentes de tránsito en horarios nocturnos donde se dificulta para un conductor tener un buen campo de visión. Se estima que con este diseño se reduzca el uso de combustible, proporcione mayor seguridad en la autopista y tenga una mayor viabilidad tanto económica como ambiental.

**Capítulo I:** se plantea el análisis del problema y su formulación, del mismo modo, se describe el objetivo general y los objetivos específicos, como también la justificación del por qué se realiza este proyecto, el alcance que posee y sus limitaciones.

**Capítulo II:** Se desarrolla el marco teórico, donde se muestran algunos antecedentes a nivel local,

nacional e internacional. Se expone el basamento teórico para el entendimiento y desarrollo del proyecto, así como también se muestran las bases legales vinculadas al proyecto y la definición de términos básicos en la investigación.

**Capítulo III:** Expone el marco metodológico que permiten describir de manera detallada y concisa las actividades que se realizarán para alcanzar los objetivos generales y específicos, de este modo se expone el tipo de diseño, tipo de investigación, su nivel de investigación correspondiente, población y muestra, técnicas e instrumentos de recolección de datos y sus fases metodológicas.

**Capítulo IV:** En este capítulo se exponen los resultados obtenidos trazados por los objetivos específicos, con la finalidad de dar resultado al objetivo general planteado en la investigación. Por otro lado, se presenta las conclusiones alcanzadas tras la realización del análisis minucioso de los datos recolectados. Finalmente se proponen recomendaciones fundadas en los descubrimientos y aplicaciones derivadas del proyecto, con la finalidad de instruir y orientar las futuras investigaciones y potenciar la aplicabilidad de los resultados obtenidos.

# **CAPÍTULO I**

## **EL PROBLEMA**

### **1.1 Planteamiento del Problema**

Uno de los servicios más importantes en Venezuela es el alumbrado público el cual debe brindar seguridad a los habitantes en horarios nocturnos y minimizar en gran medida accidentes en la vía, todo esto, Siguiendo la normativa COVENIN. De esta manera, es importante recalcar la necesidad de niveles de iluminación adecuados en la vía, las rutas con más prioridad son las que tienen el mayor volumen y velocidad de tráfico. La distribución del sistema eléctrico de las luminarias debe hacerse de manera que cada equipo reciba la energía eléctrica en las condiciones básicas.

Según la norma COVENIN 3290-97 sección 10.3, se tiene que la alimentación de las luminarias para iluminación pública podría ser: Directamente de la red de distribución del servicio eléctrico o por sistema de distribución propio de la iluminación pública. Sabiendo que las luminarias se alimentan conectadas en paralelo a circuitos monofásicos de dos hilos, de tres hilos y en ciertos casos trifásicos de tres y cuatro hilos. Las instalaciones de iluminación vial deben diseñarse, construirse y mantenerse en condiciones de operación tales que se cumplan con todos los requisitos de iluminación mínimos exigidos en la norma COVENIN.

En la última década, Venezuela ha tenido una gran deficiencia en el servicio eléctrico, una crisis que viene alertándose desde abril del 2008. Esto haciendo que en ocasiones la vía en horas nocturnas dificulte la visión de los conductores dejándolos expuestos a sufrir accidentes automovilísticos, las fallas eléctricas también causan el daño prematuro de los equipos del alumbrado público. Los graves problemas eléctricos que ha venido presentando el país en los últimos años sumado a la falta de mantenimiento del alumbrado de las vías públicas y autopistas regionales han provocado diversos accidentes automovilísticos. Según los datos de OMS publicados en el año 2020 las muertes causadas por accidentes de tránsito en Venezuela han llegado a 11.127 (7,06% de todas las muertes) la tasa de mortalidad por edad es de 29,75 por 100.000 de población, Venezuela actualmente ocupa el puesto 26 en el mundo. Los accidentes de tránsito entran en el top 5 de las causas de muerte en el país. Entre lunes y jueves los accidentes mortales suelen suceder durante el día, los fines de semana ocurre un caso contrario estos suelen suceder de noche. Indagando acerca del tema se llegó a la conclusión que una parte de los accidentes automovilísticos son ocasionados por la falta de iluminación en las vías públicas.

Actualmente, en la Autopista Regional del Centro el tramo de la vía que va desde el peaje de Guacara hasta San Joaquín, dispone de un alumbrado público muy ineficiente dificultando el tránsito por la vía en horas nocturnas, ya sea por la falta de mantenimiento, un disminuido número de revisiones del estado del alumbrado, fallas en el sistema de energía eléctrica, entre otros factores que influyen en la disponibilidad de un buen servicio de alumbrado público. Una comunidad, sector o ciudad sin alumbrado público es vulnerable a sufrir a causa de la delincuencia ya que estos individuos aprovechan estos lugares oscuros para cometer asaltos a los transeúntes que circulan por las calles. Aparte de que estas vías pierden su estética y generan desconfianza en los habitantes, al no disponerse de una buena iluminación en las vías, se maximiza la probabilidad de que ocurran accidentes tales como: colisiones entre vehículos que pueden ocasionar lesiones, arrollamientos a viandantes o incluso el daño de la infraestructura vial.

En el caso de los usuarios de estas vías, pueden tener consecuencias económicas al verse involucrados en algún accidente de tránsito ya que se presentan gastos adicionales a su presupuesto, gastos aún mayores si se generan daños a algún tercero. También puede darse el caso de que la salud de los conductores o incluso la de algún viandante, se hayan visto perjudicadas. Es posible que se tenga que asumir el pago de algún tipo de indemnización adicional a los lesionados, si así lo demandan. En los últimos años ha llamado la atención de muchos investigadores el tipo energía vibracional, debido a que esta puede ser aprovechada mediante distintas técnicas de recolección como piezoeléctrica, electromagnética, electrostática y triboeléctricas. De esta manera se puede obtener una fuente de energía de gran potencial. Se ha logrado obtener pequeñas y grandes cantidades de energía eléctrica a través de acumuladores piezoeléctricos utilizando distintas fuentes, una de ellas, el flujo vehicular.

El uso de vehículos para la generación de energía eléctrica aprovechando el tráfico y circulación en avenidas concurridas o casetas de cobro. Aprovechando su peso y movimiento puede ser una gran alternativa al sistema eléctrico convencional. Debido a la gran demanda de energía eléctrica y los altos precios de combustibles fósiles, se debe de tener otras formas de generación de energía ecológica y que además sea económica, para garantizar una buena distribución de la energía recolectada.

## **1.2 Formulación del Problema**

Considerando lo expuesto anteriormente se plantea la siguiente interrogante: ¿Cómo se puede mejorar el alumbrado público en la Autopista Regional del Centro entre el peaje de Guacara y el sector San Joaquín?

### **1.3 Objetivos de la Investigación**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar y simular un acumulador de energía vibracional piezoeléctrico para aplicaciones viales.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Diagnosticar el estado del alumbrado de la vía de la Autopista Regional del Centro desde el peaje de Guacara hasta San Joaquín.
- Determinar los parámetros fundamentales del diseño del acumulador.
- Realizar el diseño y simulación del acumulador piezoeléctrico.
- Evaluar la viabilidad económica y ambiental.

### **1.4 Justificación de la Investigación**

Respecto a la problemática expuesta se planteó diseñar un sistema autosuficiente que permita alimentar los faros que iluminan en la Autopista Regional del Centro en el tramo de la vía que va desde el peaje de Guacara hasta San Joaquín por medio acumulador de energía vibracional piezoeléctrico con el propósito de reducir no solo el consumo eléctrico en el país si no también el riesgo de accidentes automovilísticos durante las noches por la falta de iluminación en esta vía públicas. El proyecto a diseñar pretende ser de gran utilidad a la comunidad permitiendo tener las vías públicas alumbradas reduciendo el riesgo de accidentes automovilísticos o de atropellos a peatones y también disminuyendo el consumo electro a la central hidroeléctrica “Guri”, indirectamente el proyecto favorece económicamente no solo al país también a los ciudadanos. Un accidente de tránsito, además de la pérdida humana supone una importante pérdida económica para el Estado, al reducir el riesgo de que estos ocurran se puede evitar un gasto mayor al del costo de mantenimiento general de las vías públicas.

Debido a que en el país no se encuentra fuentes de energías alternativas a la planta hidroeléctrica, el presente proyecto de investigación es conveniente para empezar una revolución eléctrica a nivel nacional que no solo dependa de la planta “Guri” teniendo también fuentes de energía alternativas que permitan un mejor rendimiento eléctrico a lo largo del territorio nacional disminuyendo las fallas eléctricas que han sido un problema constante en las últimas décadas. Por

otra parte, el trabajo contribuye a ampliar el conocimiento sobre las nuevas tecnologías desarrolladas para generar energía eléctrica renovable y poco contaminante, para constatarlos con estudios y diseños similares que puedan ser estudiadas o planteadas en un futuro.

### **1.5 Alcance y Limitaciones**

La investigación tuvo la finalidad de realizar el diseño y simulación de un acumulador de energía vibracional piezoeléctrico, para sustentar el alumbrado público de la vía que va desde el peaje de Guacara hasta San Joaquín. La investigación cuenta con la recopilación de información necesaria para llevar a cabo los cálculos del diseño de los acumuladores de energía, estableciendo así la modelación matemática de los mismos además de la simulación de los distintos parámetros del piezoeléctrico, con la ayuda de distintos softwares como Solidworks para diseñar las piezas en 3D con sus respectivos planos. Presentando así, una alternativa energética renovable para facilitar el suministro de energía eléctrica al alumbrado de la vía. No se garantiza que el proyecto sea llevado a cabo ya que la investigación desarrolla de forma analítica el rendimiento del acumulador de energía piezoeléctrica.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes

A continuación, se mencionarán un conjunto de trabajos de investigación que guardan relación con el estudio desarrollado.

Vásquez (2019), realizó una investigación para optar al doctorado en ingeniería de telecomunicaciones titulado *Contribución al Estudio de la Generación de Energía Eléctrica a Partir de Materiales Piezoeléctricos*, para la Universidad Politécnica de Madrid (España). Dicha investigación se centra en la investigación de la capacidad para producir energía eléctrica de los materiales de tipo piezoeléctrico cuando se encuentran sometidos a estimulación mecánica procedente del tráfico vial. Se realiza el diseño completo de un sistema original que dote a la parte práctica de investigación de un nuevo instrumento de laboratorio que de forma automatizada permita realizar ensayos con los elementos piezoeléctricos y los sistemas harvesting (Cosechamiento de energía) de generación de energía eléctrica simulando el entorno vial.

Se tratan aspectos como la influencia de la instrumentación de medida sobre los resultados recogidos del comportamiento eléctrico de los micro-generadores o la contribución de parámetros tales como la tasa de tráfico o la amplitud de la tensión piezoeléctrica en la prospección de generación a gran escala, guardando una estrecha relación con la presente investigación, aportando información y conceptos básicos de gran valor sobre el comportamiento de los materiales piezoeléctricos y la generación de energía a mayor escala con dichos materiales.

Posteriormente Castellano (2017), que realizó una investigación titulada *Diseño de un Prototipo para un Sistema de Generación de Energía Eléctrica Basada en la Transformación de la Energía Magnética en Energía Mecánica*. presentada a la Universidad José Antonio Páez para optar al título de Ingeniero Mecánico. El objetivo principal de dicha investigación es el de diseñar un prototipo para un sistema de generación de energía eléctrica basado en la transformación de la energía magnética en energía mecánica. Es denominada esta investigación como proyecto factible. ya que consiste en la elaboración y desarrollo de una propuesta de un modelo operativo viable, para ayudar a solventar un problema en cuanto a la generación de energía eléctrica y a la contaminación ambiental los investigadores se trazaron el diseño de un prototipo para un sistema de generación de energía eléctrica basado en la transformación de la energía magnética en energía mecánica. En cuanto al tipo de investigación, se define como documental o de campo.

La población y muestra de la investigación está constituida por dos especialistas en Ingeniería Eléctrica y Mecánica a quienes se les aplicó una entrevista de conocimiento a fin de orientar el diseño del prototipo de generación de energía eléctrica basado en la transformación de la energía magnética en energía mecánica, conformando el prototipo parte de la población, en vista de que en la medida que se elaboró se aplicó lo denominado nota de campo, para asentar el desarrollo del mismo. Las técnicas para la recolección de datos utilizados son: Observación participativa directa y entrevistas no estructuradas. Como resultado de la investigación se realizaron los cálculos pertinentes del diseño, los planos de las piezas y el ensamble del prototipo. Se evaluó la fiabilidad tanto económica como energética del prototipo, además del presupuesto de su mantenimiento. La relación que guarda con la presente investigación es el enfoque en el sector energético y la evaluación de la fiabilidad del diseño con respecto al suministro de energía eléctrica convencional, además de compartir el mismo tipo y diseño de investigación aportando a su vez algunos conceptos sobre la transformación de energía.

Así mismo, Padilla (2017), en su trabajo para optar al grado de Magister en Ingeniería Ambiental titulado *Implementación de un Sistema de Energía Renovable Alternativo para la Electrificación del Comando de la Guardia nacional “Escuadrón Montado Guatopo”, Ubicado en el Parque Nacional Guatopo del Estado Miranda* en la Universidad de Carabobo, fue realizado con el fin de Implementar un sistema de energía renovable alternativo para la electrificación del Comando de la Guardia Nacional “Escuadrón Montado Guatopo”, ubicado en el Parque Nacional Guatopo del Estado Miranda. El trabajo contemplo el desarrollo de una investigación aplicada, donde se elaboró una propuesta de un modelo operativo viable, orientado a la solución de problemas. También atiende a las características de una investigación de campo puesto que se efectuó en el lugar donde ocurrieron los fenómenos objeto de estudio, esto permitió el análisis sistemático del problema en estudio, mediante la recolección de datos para describirlos e interpretarlos, entender su naturaleza y factores constituyentes, explicar sus causas y efectos.

La investigación se realizó como un diseño de campo bajo la modalidad de proyecto factible, puesto que consistió en la elaboración de una propuesta o modelo para solucionar un problema. Los instrumentos de recolección de datos utilizados en la investigación son: Lista de chequeo, cámara fotográfica, diario de campo, Entrevista no estructurada distribuida en varias sesiones (Reuniones), cuaderno de notas, fichas, laptop, informes técnicos, Manual de instalaciones de sistemas fotovoltaicos, Legislación y normativa vigente. La investigación como

resultado plantea una metodología para evaluar la factibilidad de usar un sistema de generación con energías renovables, en particular, fuente solar fotovoltaica, para alimentar poblaciones rurales de difícil acceso, adecuado a nuestro caso, basado en la caracterización estadística de los recursos y la evaluación energética de la zona, destacando que cada unidad energética proveniente de este sistema, no genere residuos contaminantes y haga uso de los recursos inagotables. El aporte que otorga dicha investigación, es el análisis de viabilidad de un sistema de energía renovable en Venezuela mediante distintos parámetros.

Por último, Vitriago (2017), quien llevo a cabo un trabajo de grado para optar por el título de ingeniero civil titulado *Propuesta de una Vivienda Unifamiliar de Desarrollo Progresivo: Empleando el uso de Tecnología Eólica y Solar como Suministro de Energía Alternativa. Los Taques-Estado Falcón*. Para la Universidad Nueva Esparta, teniendo como principal objetivo establecer el uso de tecnología eólica y solar como suministro de energía alternativa dentro del diseño de una vivienda unifamiliar de crecimiento progresivo en Los Taques, estado Falcón. Siendo esta una investigación del tipo exploratorio-descriptivo, ya que, la propuesta se hace en base a una serie de estudios cálculos, análisis, interpretación, comportamiento y requerimientos característicos del diseño propio sugerido por el autor y regulado por dichas especificaciones. La investigación se engloba dentro de lo que sería un diseño de campo ya que permite el análisis e interpretación de los datos donde se desarrolla el estudio sin ninguna intervención de variables y así determinar el alcance esperado.

La población de la investigación está representada por aquellas viviendas existentes que adoptan la tecnología eléctrica híbrida para suplir el consumo doméstico, la muestra definida para la propuesta que desarrolla la investigación está representada por las viviendas con suministro autónomo de energía eléctrica bajo el concepto híbrido: EO-FV. Los instrumentos utilizados para la recolección de datos responden al uso de normas, manuales, planos y especificaciones propias para el diseño del objetivo general propuesto. Como conclusión de la investigación esta se orientó al uso de los aerogeneradores de baja potencia y los paneles fotovoltaicos, realizando los cálculos pertinentes para la electrificación de la vivienda y su abastecimiento a través de estos dispositivos, notando que son equipos de alto costo de inversión inicial por su exportación al país, y que en su generalidad estas son fuentes que se desarrollaron en países donde los costos de servicios eléctricos son elevados y así al independizarse de éste, no costearían más tal servicio. Compartiendo el objetivo de la presente investigación de suministrar energía de una manera más fiable y factible

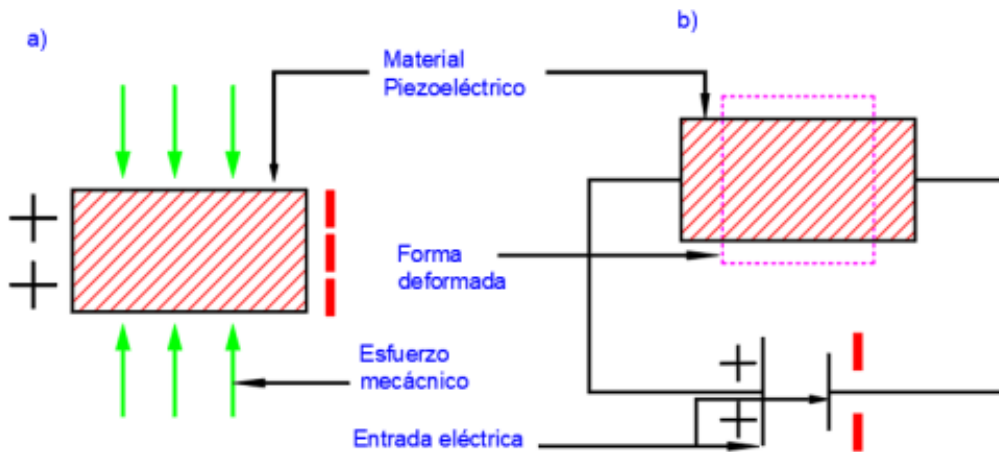
para la comunidad. Aportando una referencia con respecto a otras energías renovables en cuanto al costo e impacto en el país.

## 2.2 Bases Teóricas

### 2.2.1 Piezoelectricidad

La piezoelectricidad o efecto piezoeléctrico es la propiedad que presentan ciertos cristales al ser sometidos a presión o tensión mecánica, este es el denominado efecto piezoeléctrico directo. En cuanto al efecto directo el elemento actúa como un sensor en donde la tensión mecánica que experimenta produce un campo eléctrico.

Mientras que en el inverso la aplicación de un campo eléctrico genera deformaciones en el material obteniéndose una respuesta cinética en el elemento, en la figura 1 se puede observar de manera esquemática el efecto piezoeléctrico directo e inverso, los materiales con efecto piezoeléctrico trabajan como actuador. Algunos de estos materiales son: berlinita, cuarzo, titanato de zirconato de plomo (PZT) y nitruro de aluminio. (Mohanty, Parida, Kumar, 2019).



**Figura 1:** Diagrama esquemático para dos tipos de piezoeléctricos. a) efecto piezoeléctrico directo, b) efecto piezoeléctrico inverso.

**Fuente:** Diseño y Simulación de un Acumulador de Energía Vibracional Piezoeléctrico para Aplicaciones Ferroviarias (2022).

#### 2.2.1.1 Formulación Matemática del Efecto Piezoeléctrico

El efecto piezoeléctrico directo viene caracterizado por la siguiente ecuación:

$$P = dT \quad \text{Ec. 1}$$

Donde,  $P$  es el vector de polarización piezoeléctrico,  $d$  (m/V o C/N) es la constante de carga piezoeléctrica, y  $T$  (N/m<sup>2</sup>) es la tensión a la que se ve sometido el material piezoeléctrico. A su vez, el efecto piezoeléctrico inverso viene caracterizado por la siguiente ecuación:

$$S = dE \quad \text{Ec. 2}$$

$$S = gD \quad \text{Ec. 3}$$

$$T = cS \quad \text{Ec. 4}$$

Donde  $c$  es la constante elástica que relaciona el estrés generado al aplicar una deformación (Ec. 4),  $S$  es la compilancia elástica del medio a un campo eléctrico constante que relaciona la deformación producida al aplicar una tensión ( $S = sT$ ),  $E$  es la constante piezoeléctrica de tensión.

Si el material piezoeléctrico está sujeto a una deformación ( $S$ ), esta deformación tendrá dos efectos. Por un lado, generara una tensión elástica ( $T_e = cS$ ), por otro lado, generara polarización piezoeléctrica ( $P_p = eS$ ), esta polarización creara un campo eléctrico (el subíndice  $p$  indica la causa del campo eléctrico es el efecto piezoeléctrico, el subíndice  $e$  indica que la causa de la tensión es de origen elástico):

$$E_p = \frac{P_p}{\varepsilon} = \frac{eS}{\varepsilon} \quad \text{Ec. 5}$$

Este campo eléctrico de origen piezoeléctrico produce a su vez una deformación ( $T_p = eE_p$ ).

$$T = T_e + T_p \quad \text{Ec. 6}$$

$$S = S_e + S_p \quad \text{Ec. 7}$$

Si el material piezoeléctrico está sujeto a un campo eléctrico ( $E$ ) entre los dos electrodos que contienen el material piezoeléctrico, se crea un desplazamiento eléctrico entre ellos, generando una densidad de carga superficial ( $\sigma$ ) cuya magnitud es  $D = \varepsilon E$ . Al ser el material además de dieléctrico, piezoeléctrico, este campo eléctrico produce una deformación  $S_p = dE$ . Esta deformación hace que aumente la densidad superficial de carga ( $P_p = eS = dT$ ). Por lo tanto, el desplazamiento eléctrico total será:

$$D = dT + \varepsilon E \quad \text{Ec. 8}$$

Esta ecuación representa el desplazamiento eléctrico inducido al aplicar una tensión mecánica y un campo eléctrico al material piezoeléctrico.

Así mismo la deformación  $S$  que se tendrá en el material piezoeléctrico, se obtendrá teniendo en cuenta que la aplicación de un campo eléctrico causa deformación ( $S_p = dE$ ). Esta deformación, produce una tensión elástica ( $S_p = sT_e$ ). Por otro lado, el campo eléctrico ejerce una fuerza en la estructura interna, provocando deformación ( $T_p = eE$ ). Aproximando las expresiones se puede concluir que:

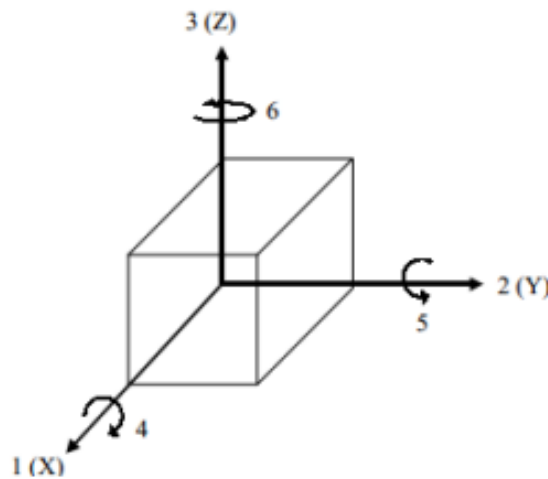
$$S = s^E T + dE \quad \text{Ec. 9}$$

Esta ecuación representa la deformación en el material piezoeléctrico al aplicar una tensión mecánica y un campo eléctrico externo.

### 2.2.2 Constantes Piezoeléctricas

La relación entre la fuerza aplicada y la respuesta del material, dependen de las propiedades piezoeléctricas de la cerámica, del tamaño, de la forma de la pieza, y, de la dirección de la excitación eléctrica y mecánica. Las constantes piezoeléctricas describen esa relación. Las constantes piezoeléctricas se representan con dos subíndices, que vinculan magnitudes eléctricas y mecánicas. El primer subíndice, explica la dirección del campo eléctrico asociado con el voltaje aplicado, o, la carga producida. El segundo subíndice, indica la dirección del esfuerzo o stress mecánico.

En un elemento piezoeléctrico se reconoce direcciones coincidentes con los ejes mostrados en la figura 2. Por referencia, el eje Z está orientado en paralelo a la dirección de polarización de la cerámica. En las operaciones de corte, cuando un esfuerzo mecánico o una tensión eléctrica, corta una de las caras del material, el segundo subíndice de la constante piezoeléctrica suele hacer referencia al eje 5.



## Figura 2: Ejes de un elemento piezoeléctrico

**Fuente:** Análisis de la operación y desempeño de un sistema de generación de energía con la utilización de baldosas piezoeléctricas (2012).

### Constante de Carga Piezoeléctrica $d_{ij}$

Estas constantes indican la relación entre la variación dimensional del material piezoeléctrico (m) y la diferencia de potencial aplicada (V), o, entre la generación de cargas eléctricas (C) y la fuerza aplicada en el material (N). Los valores típicos de estas constantes se encuentran entre 0,2 y  $8E^{-10} m/V$  o, entre 20 y  $800 \pi C/N$ .

$$d = \frac{\text{variación dimensional}}{\text{campo aplicado}}$$
$$d = \frac{\text{densidad de carga}}{\text{esfuerzo mecánico aplicado}}$$

### Constante de tensión piezoeléctrica $g_{ij}$

Estas constantes indican la relación del campo eléctrico producido en una cerámica de 1m de longitud, aplicando un esfuerzo mecánico. Los valores típicos de las constantes de tensión están entre  $-1$  y  $60 V/N$ .

$$g = \frac{\text{campo desarrollado}}{\text{esfuerzo mecánico}}$$

Al disminuir las dimensiones de la cerámica, o, al aumentar el esfuerzo, el módulo de la tensión generada también aumenta. Valores altos de  $g$  son deseados en materiales destinados a generar corriente en respuesta a una tensión mecánica.

### Constante de Acoplamiento $k_{ij}$

Estas constantes indican la eficiencia del material piezoeléctrico en la conversión de energía eléctrica en mecánica, o, viceversa. Son adimensionales. Los valores típicos se encuentran entre 0.02 y 0.75.

$$k = \sqrt{\frac{\text{energía mecánica almacenada}}{\text{energía eléctrica aplicada}}}$$
$$k = \sqrt{\frac{\text{energía eléctrica almacenada}}{\text{energía mecánica aplicada}}}$$

### Constante de Conformidad o Compliancia Elástica $s_{ij}$

Las constantes elásticas  $s$  se definen como la tensión producida por unidad de esfuerzo. Estas constantes aparecen como recíproco del módulo de Young  $Y$ . El primer subíndice de las constantes se refiere a la dirección de la tensión, y, el segundo se refiere a la dirección del estrés.  $s_{33}^D$  es la compliancia de un esfuerzo acompañado de una tensión en la dirección 3 en un circuito eléctrico abierto.  $s_{33}^E$  es la compliancia de un esfuerzo acompañado de una tensión en la dirección 3 en un circuito eléctrico cerrado.

$$s = \frac{\textit{tensión}}{\textit{esfuerzo}}$$

$$Y = \frac{\textit{esfuerzo}}{\textit{tensión}}$$

### **Constantes Dieléctricas $K_{ij}$**

Estas constantes se definen como la relación entre la permitividad del material con la permitividad del espacio libre. Para las constantes  $K_{ij}^T$ , el superíndice T indica que las condiciones de la permitividad se encuentran bajo condiciones de tensión constante. En las constantes  $K_{ij}^S$ , el superíndice S indica que las condiciones de la permitividad se encuentran bajo condiciones de deformación constante.

### **2.2.3 Clasificación de los Materiales Piezoeléctrico**

Los materiales piezoeléctricos se clasifican en dos grupos: hard y soft. Esta clasificación se basa en la curva de la histéresis dieléctrica. Los materiales de alta potencia (hard) presentan una curva de histéresis cerrada de área pequeña. Los materiales de alta sensibilidad (soft), presentan una curva de histéresis abierta con área mayor.

La clasificación es adoptada por los principales fabricantes de cerámicas piezoeléctricas, pero existen otros nombres en la industria. ATPC Brasil, denomina a sus cerámicas piezoeléctricas con las siglas SP-N, en donde N representa la clase de cerámica. FERROPERM, denomina a sus cerámicas con las siglas PZ, seguidas por distintos números en función de la clase. EDO, denomina a sus cerámicas con las siglas EC-6n, en donde n es un número que representa a una clase dada de piezoeléctrico. MORGAN, designa a sus cerámicas con las siglas PZT-n, en donde n es un número que representa a cada clase de piezoeléctrico.

#### **2.2.3.1 Materiales Tipo Hard**

Estos materiales operan a altas tensiones eléctricas y mecánicas, sin que sus condiciones piezoeléctricas cambien sustancialmente, por lo cual resultan idóneos para aplicaciones de alta potencia.

Poseen una moderada permitividad, un gran factor de acoplamiento piezoeléctrico, una buena estabilidad bajo altas tensiones mecánicas y campos de operación, y, bajas pérdidas dieléctricas. Estos materiales se utilizan en la limpieza por ultrasonidos, en el campo médico (instrumentos quirúrgicos), y, en la tecnología del sonar.

- **Navy Type I**

Estos materiales, denominados por MORGAN como PZT-4, son capaces de producir grandes vibraciones, manteniendo bajas las pérdidas mecánicas y las dieléctricas. Son utilizados en aplicaciones acústicas de media y alta potencia, y, en sistemas de limpieza por ultrasonido y sonares.

- **Navy Type III**

Estos materiales, denominados por MORGAN como PZT-8, son utilizados para aplicaciones de alta potencia, su nivel de actividad piezoeléctrico es ligeramente inferior al tipo PZT-4. Poseen un factor de calidad mecánica Q muy alto, y, pérdidas reducidas.

### **2.2.3.2 Materiales Tipo Soft**

Estos materiales poseen un alto valor para la constante de carga piezoeléctrica, permitividad moderada, y, altos valores de acoplamiento. Bajo condiciones de alta transmisión, estos materiales son susceptibles al calentamiento espontáneo más allá de su rango de temperatura de funcionamiento.

Entre las aplicaciones de estos materiales, se destacan actuadores, microposicionadores, y, sensores de nanoposición.

- **Navy Type II**

Este material, conocido como PZT-5 según el estándar de MORGAN, se utiliza como elemento de transmisión o recepción en hidrófonos, acelerómetros, y, sensores de vibración. Presenta una alta permitividad, alta sensibilidad, y, alta estabilidad en el tiempo.

- **Navy Type IV**

Este material, modificación de la composición de titanato de bario, tienen una utilización moderada en aplicaciones de media potencia. Se caracteriza por una menor actividad piezoeléctrica, y, una menor temperatura de Curie que cualquiera de las composiciones de los PZT.

- **Navy Type V**

Este material, es una composición intermedia de los tipos II y VI. Conocido como PZT-5J en la nomenclatura de MORGAN, tiene una alta permitividad, y, un alta constante de tensión piezoeléctrica. Es utilizado para hidrófonos, y, aplicaciones que requieren altas energías y alto diferencial de potencial.

- **Navy Type VI**

Este material, denominado PZT-5H por MORGAN, presenta una alta permitividad, un alto acoplamiento, y, una alta constante piezoeléctrica. Es utilizado en aplicaciones que requieren grandes deformaciones mecánicas, como posicionadores y actuadores. Su temperatura de Curie es baja, lo que limita su funcionamiento, y, su estabilidad en el tiempo es menor.

#### **2.2.4 Aplicaciones de los Materiales Piezoeléctricos**

Pequeños cristales piezoeléctricos pueden producir suficiente tensión para generar una chispa suficientemente grande como para encender a un gas. Estos equipos de encendido se utilizan en aparatos de gas como hornos, parrillas, sala de calentadores, y calentadores de agua. Ellos son aún lo suficientemente pequeños como para caber dentro de los encendedores, aunque la mayoría de los encendedores todavía usa sílex, ya que cuestan menos. Si bien ha habido muchos intentos de generar electricidad a partir de estos efectos, ha resultado impráctico a gran escala.

Los cristales piezoeléctricos se utilizan en relojes electrónicos para mantener el momento y dar la alarma de ruido. Son también llamados relojes de cuarzo ya que el uso de cristal que se hace a menudo de cuarzo. Tiene una frecuencia natural que es ideal para la creación de las oscilaciones necesarias para mantener la hora exacta. Los relojes de cuarzo también se utilizan para organizar el flujo de datos en ordenadores.

Algunos discos de materiales piezoeléctricos también se usan para crear altavoces delgados que caben dentro de relojes de pulsera.

Se utilizan también en transductores, los cuales aplican un impulso eléctrico a un cristal piezoeléctrico para crear una onda de presión y, a continuación, producen una corriente cuando la onda reflejada deforma el cristal. El desfase temporal entre las dos corrientes se utiliza para rectificar la distancia de un objeto. Impresoras de inyección de tinta industrial utilizan el efecto piezoeléctrico para pasar la tinta a través de cientos de boquillas en sus cabezales de impresión.

### **2.3 Bases Legales**

#### **2.3.1 Normas COVENIN**

La investigación se realizó bajo la Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN), es el organismo encargado de programar y coordinar las actividades de Normalización y Calidad en el país. Para llevar a cabo el trabajo de elaboración de normas, la COVENIN constituye comités y comisiones técnicas de normalización, donde participan organizaciones gubernamentales y no gubernamentales relacionados con un área específica.

Algunas de las normas COVENIN relacionadas con la investigación son las siguientes:

- **COVENIN 3290:1997 Alumbrado Público. Diseño**

Esta norma establece los lineamientos necesarios para la elaboración de proyectos de alumbrados públicos. Para ello se dan recomendaciones generales con el fin de lograr los niveles de iluminación de acuerdo a la zona a iluminar y el tipo de vía, seleccionar la disposición de luminarias en la vía y determinar la calidad del proyecto.

- **COVENIN 3126-94 Alumbrado Público. Definiciones**

Esta norma establece las definiciones de los términos más utilizados en relación con alumbrado público.

- **COVENIN 200-90 Código Eléctrico Nacional**

Esta norma venezolana establece los requisitos que deben cumplir las instalaciones eléctricas para la salvaguarda, validez e intención de estas, a saber, son:

**a) Salvaguarda.** El propósito de este Código es la salvaguarda real de las personas y propiedades de los peligros que implica el uso de la electricidad.

**b) Validez.** Este Código contiene disposiciones que se consideran necesarias para la seguridad. El cumplimiento de tales disposiciones y un mantenimiento adecuado darán por resultado una instalación esencialmente libre de peligros, aunque no necesariamente eficiente, conveniente o adecuada para un buen servicio o para una ampliación futura en el uso de la electricidad.

Con frecuencia se presentan situaciones de peligro por la sobrecarga de los sistemas de alambrado con usos y métodos que no están permitidos por este Código. Lo anterior ocurre porque el alambrado inicial no fue previsto para aumentos en el uso de la electricidad. Una previsión razonable de cambios en el sistema y la instalación inicial adecuada permitirán los incrementos futuros en el uso de la electricidad.

**c) Intención.** Este código no está destinado a servir como especificación de diseño ni como manual de instrucciones para personal no calificado.

## **2.4 Definición de Términos Básicos**

**Campo Eléctrico:** El campo eléctrico es un campo físico que se representa por medio de un modelo que describe la interacción entre cuerpos y sistemas con propiedades de naturaleza eléctrica.

**Densidad de Carga:** La densidad de carga es la cantidad de carga eléctrica por unidad de longitud, área de superficie o volumen.

**Deformación:** La deformación es el cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a tensiones internas producidos por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo, la ocurrencia de dilataciones térmicas o la aparición de efectos viscoelásticos. Las deformaciones pueden ser termodinámicamente reversibles o irreversibles.

**Dieléctrico:** Un material dieléctrico se define como el material no metálico con alta resistividad, coeficiente de temperatura de resistencia negativa y con gran resistencia de aislamiento.

**Energía:** Energía es la capacidad para realizar un trabajo. Se mide en julios (N·m).

**Potencia:** Es la cantidad de energía transferida o convertida por unidad de tiempo. En el Sistema Internacional de Unidades, la unidad de potencia es el vatio, equivalente a un julio por segundo  $\left(\frac{J}{s}\right)$ .

**Polarización:** Es el proceso por el cual en un conjunto se establecen características que determinan la aparición en él de dos o más zonas, los polos, que se consideran opuestos respecto a una cierta propiedad, quedando el conjunto en un estado llamado estado polarizado.

**Permitividad:** La permitividad eléctrica es un parámetro físico de los materiales que describe cuánto son afectados por un campo eléctrico.

**Tensión Mecánica:** Se denomina tensión mecánica a la magnitud física que representa la fuerza por unidad de área  $\left(\frac{N}{m^2}\right)$  en el entorno de un punto material sobre una superficie real o imaginaria de un medio continuo. Es decir, posee unidades físicas de presión.

**Tensión Eléctrica:** Tensión o diferencia de potencial es una magnitud física que cuantifica la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos.

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

Toda investigación debe de estar fundamentada por un marco metodológico, puesto que este es el conjunto de técnicas y procedimientos que se emplean para formular las hipótesis, resolver problemas y llevar a cabo la investigación. Es decir que en él se expone la metodología con la que se llevó a cabo el proyecto de investigación. Según autores como Franco (2011 p.118) el marco metodológico es el conjunto de acciones destinadas a describir y analizar el fondo del problema planteado, a través de procedimientos específicos que incluye las técnicas de observación y recolección de datos, determinando el “cómo” se realizará el estudio, esta tarea consiste en hacer operativa los conceptos y elementos del problema que estudiamos, del mismo modo, Arias F. (2012) establece que “ la metodología del proyecto incluye el tipo de investigación, las técnicas y los procedimientos que serán utilizados para llevar a cabo la indagación ”(p.45).

#### **3.1 Enfoque de la Investigación**

Un enfoque de investigación se refiere al conjunto de métodos y técnicas que se utilizan para llevar a cabo un estudio. Sampieri, Collado y Baptista (2010), sostienen que: “Todo trabajo de investigación se sustenta en dos enfoques principales: el enfoque cuantitativo y el enfoque cualitativo, los cuales de manera conjunta forman un tercer enfoque, el enfoque mixto” (p. 4). El enfoque mixto de la investigación se caracteriza por la combinación de métodos cuantitativos y cualitativos en una misma investigación, con el objetivo de obtener una comprensión más completa del fenómeno estudiado. Basándose en estos términos los autores concluyen que la presente investigación tendrá un enfoque mixto de tipo tecnológico

Según Creswell y Plano Clark (2018), el enfoque mixto "combina aspectos cuantitativos y cualitativos en una sola investigación" (p. 5), y se utiliza para "complementar y enriquecer" los hallazgos obtenidos a través de los métodos cuantitativos y cualitativos por separado (p. 6). Por su parte, Johnson y Onwuegbuzie (2004) definen el enfoque mixto como "un tipo de investigación en el que se utilizan tanto métodos cuantitativos como cualitativos en una misma investigación" (p. 17), y destacan que este enfoque permite "superar las limitaciones de los métodos cuantitativos y cualitativos por separado" (p. 17).

El enfoque tecnológico de la investigación se refiere a la utilización de tecnologías avanzadas y herramientas digitales en la recopilación, análisis y presentación de datos. Este enfoque busca aprovechar las ventajas que ofrecen las tecnologías para mejorar la calidad y la

eficacia de la investigación. Kozak y Gürel (2018) destacan que el enfoque tecnológico de la investigación se enfoca en "la aplicación de tecnologías de la información y la comunicación en la investigación para mejorar la eficacia y la eficiencia de la recopilación, el análisis y la presentación de datos" (p. 150). Este enfoque permite "acelerar el proceso de investigación, reducir los errores y mejorar la calidad de los resultados" (p. 150).

Basándose en estas definiciones se ha confirmado que la investigación utilizará un enfoque mixto, ya que se recolectarán datos cualitativos sobre la condición actual del alumbrado público en la autopista regional del centro en el tramo del peaje de Guacara hasta el sector san Joaquín, así como datos cuantitativos específicos sobre la energía generada por los generadores piezoeléctricos. Para abordar la problemática, se está planteando un diseño completo con todas sus características, lo que refuerza el carácter tecnológico de la investigación.

### **3.2 Tipo de Investigación**

Se realizó el proyecto de investigación, de acuerdo a los objetivos que se plantearon y el método para alcanzar a los mismos, se define la investigación de tipo proyectiva. El Manual de la UPEL (2016), define al proyecto factible como un estudio "que consiste en la investigación, elaboración y desarrollo de una propuesta de un modelo operativo viable para solucionar problemas, requerimientos o necesidades de organizaciones o grupos sociales"; la Universidad José Antonio Páez, en las Normas para elaboración y presentación de los Anteproyectos, Proyectos y Trabajos de Grado (2020), señala que:

Los proyectos factibles son trabajos que conllevan a las propuestas viables para atender necesidades demostradas a través de una investigación de campo o documental ya sea de una organización, grupo social o institución, a ser usados como solución al problema delimitado. (P. 13).

Tomando en cuenta estas definiciones, el presente trabajo se desarrolló en la modalidad de proyecto factible, debido a que es un modelo viable para solventar la problemática presentada en el alumbrado público de la autopista Regional del Centro del Tramo peaje Guacara-San Joaquín., para ayudar a solventar dicha problemática los investigadores realizaron el diseño de un acumulador de energía vibracional piezoeléctrico para aplicaciones viales para abastecer de energía eléctrica el alumbrado público de la autopista antes mencionada.

### **3.3 Diseño de la Investigación**

Arias (2017) lo define como: “la estrategia general que adopta el investigador para responder al problema planteado”; Palella y Martins (2012) indican que el diseño de la investigación se refiere a: “la estrategia que adopta el investigador para responder al problema, dificultad o inconveniente planteado en el estudio. Para fines didácticos, se clasifican en diseño de campo, diseño experimental, diseño no experimental, diseño bibliográfico y documental”

El trabajo de campo es una etapa a la que se le debe de prestar bastante atención cuando se realiza una investigación, debido a que es en ella cuando los investigadores se enfrentan a la realidad que enmarca su problema de estudio. La investigación de campo permite mantener bajas estrategias claras una relación directa con la unidad en estudio. El estudio está basado en una investigación de campo, ya que permite a través de la observación directa, obtener datos directamente de la zona de estudios y describirlo detalladamente para facilitar a los investigadores una absoluta claridad de los inconvenientes que enfrenta la misma, Arias (2012) menciona que la investigación de campo es aquella que: “consiste en la recolección de datos directamente de los sujetos investigados, o de la realidad donde ocurren los hechos, sin manipular o controlar variable alguna, es decir, el investigador obtiene la información, pero no altera las condiciones existentes” Cabe destacar, que los datos se recolectaron en el sitio donde ocurra la problemática en estudio y a su vez se ejecuta un proceso de análisis de los datos obtenidos. Es por eso, que esta investigación se dedicó a la búsqueda de una solución efectiva que pueda ser aplicado a la Autopista Regional del Centro tramo peaje de Guacara-San Joaquín, a través del diseño de un acumulador de energía vibracional piezoeléctrico.

En una investigación de campo también se emplean datos secundarios, sobre todo los provenientes de fuentes bibliográficas, a partir de los cuales se elabora el marco teórico. En concordancia con los objetivos propuestos, los datos recolectados para esta evaluación se obtuvieron de forma directa en base a las impresiones tanto de los directivos y fundadores como por los diseñadores, lo que enmarca como un diseño de campo.

### **3.4 Nivel de la Investigación**

En relación con el Nivel de la investigación, Arias (2012) Señala que: “el grado de profundidad con que se aborda un fenómeno u objeto de estudio (p.23)”. La investigación de campo comprende ciertos niveles entre los cuales, y para efectos del presente estudio, se debe destacar el nivel descriptivo, Arias (2012) define que el nivel descriptivo: “como la caracterización

de un hecho, fenómeno o grupo con el fin de establecer su estructura o comportamiento” (p.46). De acuerdo a lo expresado anteriormente, la presente investigación es de tipo descriptiva

Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente, la investigación se basó en describir la situación y las variables que afectan o que deben estudiarse en la Autopista Regional del Centro Tramo peaje Guacara-sector San Joaquín, y de esta manera se fijaron los parámetros por los cuales se rigió la investigación.

### **3.5 Población y Muestra**

Arias (2012), argumenta que la población, o en términos más precisos población objetivo, es un conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para los cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación. Así mismo se seleccionará una población de tipo finita ya que Arias lo denomina como aquella cuyo elemento en su totalidad son identificables por el investigador, que realmente se tiene acceso y de la cual se extrae una muestra representativa. El tamaño de la población accesible depende del tiempo y de los recursos del investigador. La población de la presente investigación son las distintas fuentes de energía alterna que se pueden implementar para suministrar de energía el alumbrado público desde el peaje de Guacara hasta el sector San Joaquín.

Arias (2012), señala que la muestra es un subconjunto representativo y finito que se extrae de la población, cuando en diversas razones se hace imposible abarcar la totalidad de los elementos que conforman la población, se recurre a la selección de una muestra, el cual permite hacer inferencia o generalizar los resultados con un margen de error conocido. Tomando en consideración estas definiciones, la investigación toma como muestra el acumulador de energía vibracional piezoeléctrico.

### **3.6 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos**

Para recolectar los datos en un trabajo de investigación, existe una gran diversidad de técnicas e instrumentos que pueden ser utilizadas para conocer en detalle la información que se desea obtener de acuerdo a la temática en estudio. En relación a las técnicas Palella y Martins (2012), señalan que “Son las distintas formas o maneras de obtener la información” (p. 115). Con respecto a los instrumentos de recolección de datos, los definen como “Cualquier recurso del cual pueda valerse el investigador para acercarse a los fenómenos y extraer de ellos información” (p. 125). Arias (2006) destaca que “un instrumento de recolección de datos es cualquier recurso, dispositivo o formato, que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información” (p.68).

Los autores citados anteriormente manifiestan que las técnicas pueden ser: la observación, la entrevista, la encuesta, el fichaje y la prueba de evaluación; y entre los instrumentos se encuentran: el cuestionario, la guía de entrevista, el test, la guía de observación, la escala de valoración, las pruebas objetivas y tipo ensayo, entre otros.

### **3.6.1 Técnicas de Recolección de Datos**

- **Observación Directa**

Según Ruiz (2016) “la observación directa, se entiende como un proceso deliberado, sistemático, dirigido a obtener información de forma directa del contexto donde tienen lugar las acciones” (S/N). Los investigadores haciendo acto de presencia en el campo de estudio fueron testigos del estado del área investigada realizando una inspección y conteo de los diferentes tipos de vehículos que transitan por el peaje de Guacara, obteniendo y registrando información que fue utilizada para el análisis de los resultados obtenidos.

- **Entrevista Estructurada**

La entrevista estructurada se prepara con preguntas cerradas las cuales se centran en que el entrevistado conteste de forma precisa a la pregunta, sin divagar o ampliar sus respuestas. Esto con la finalidad de obtener información por medio del dialogo entre dos personas.

En esta técnica, el investigador prepara con anticipación la ficha, estructurándola él mismo por medio de preguntas fijas y ordenadas que permiten que se dé la unificación de criterios. La información se obtuvo de las personas vinculadas con el área de estudio para la recolección de datos importantes para la realización del diseño y simulación del acumulador de energía. Según Arias (2016), la entrevista estructurada “Es lo que se realiza a partir de una guía prediseñada que contiene las preguntas que serán formuladas al entrevistado” (p. 73).

- **Revisión Documental**

Esta técnica tiene la finalidad de profundizar la información recopilada sobre un tema específico. Se fundamenta en la utilización de documentos, revistas, artículos, libros, etc. Que ofrezcan datos procesados anteriormente por organismos oficiales, instituciones públicas o privadas, entre otras.

Con la aplicación de esta técnica los investigadores recolectaron información sobre las propiedades de los materiales piezoeléctrico, el funcionamiento de sistemas de cosechamiento de energía y las ecuaciones necesarias para realizar los cálculos de diseño del acumulador de energía.

### **3.6.2 Instrumentos de Recolección de Datos**

- **Diario de campo**

El diario de campo o también conocido como cuaderno de campo, es un instrumento de vital importancia para la investigación en él se pueden escribir todos los acontecimientos suscitados durante el estudio, además puede marcar rutas, horarios, tiempos, etc. En la investigación se utilizó para la constancia de los datos y observaciones obtenidos en el campo. Es decir, información sobre el entorno, mediciones y sucesos relevantes para la investigación.

- **Guía de Preguntas**

Para la realización de una entrevista estructurada es necesario un instrumento como la guía de preguntas, la cual definen Palella y Martins (2006) cómo "Un listado fijo de preguntas, cuyo orden y redacción permanece invariable". Con este instrumento los investigadores podrán recolectar información de las personas relacionadas al entorno para la realización del diseño del acumulador de energía (Ver apéndice A).

- **Grabador**

Relacionado de igual manera con la entrevista estructurada se tiene como instrumento el grabador el cual les permite a los investigadores capturar la información de la entrevista. La cuál es almacenada en un determinado medio o soporte, así se tiene a disposición de los investigadores los datos obtenidos del diálogo en cualquier momento que se requieran.

- **Ficheros**

Este instrumento permitió a los investigadores ordenar y clasificar la información obtenida de páginas web, bibliografías, los temas a utilizar, autores, etc. Para Palella y Martíns (2006) "Las bibliotecas e internet son las mejores opciones que se le presentan al investigador, en especial en cuanto se refiere a obtener información sobre libros, revistas científicas y boletines informativos".

- **Computadora**

Este instrumento es indispensable para la realización de la investigación debido a que se lleva a cabo el diseño y simulación del acumulador de energía mediante el mismo, además de ser muy útil para almacenar la información obtenida en formato digital.

- **Validación del Instrumento**

Según Palella y Martíns (2006), "La validez se define como la ausencia de sesgos. Representa la relación entre lo que se mide y aquello que realmente se quiere medir" (p. 172). Existen varios métodos para garantizar su evidencia:

- **Validez de Contenido:** Este método trata de determinar hasta dónde los ítems de un instrumento son representativos (grado de representatividad) del dominio o universo de contenido de las propiedades que se desea medir.
- **Validez de Criterio:** La validación a través de criterios se centra en las relaciones estadísticas existentes entre las mediciones, lo que permite saber si los instrumentos pronostican lo que deben pronosticar.
- **Validez de Constructo:** También conocida como validez estructural, implica que los distintos indicadores para elaborar un instrumento son el producto de una buena operacionalización, es decir, cuando reflejan la definición teórica de la variable que se pretende medir.
- **Validez Externa:** proviene de los resultados obtenidos de un estudio que pueden ser generalizados, aplicándolos a un grupo más amplio que el de la muestra usada
- **Validez Interna:** es la medida en que el diseño de un estudio proporciona control y, por lo tanto, confianza en la interpretación de los resultados.

La validación de los instrumentos, es importante para conocer realmente si los instrumentos utilizados en la investigación son efectivos y adecuados para el desarrollo de la misma (Ver Anexo C).

### **3.7 Técnicas de Análisis de Resultados**

Una vez se obtienen los datos por medio de las distintas técnicas de recolección, se debe proceder con el análisis de los resultados, Hurtado (2000) sobre el análisis de resultados, “constituye un proceso que involucra la clasificación, la codificación, el procesamiento y la interpretación de la información obtenida durante la recolección de datos, con el fin de llegar a conclusiones específicas y dar respuesta a la pregunta de investigación”. En la presente investigación se utilizaron las siguientes técnicas para el análisis de los datos obtenidos:

- **Matriz FODA**

El análisis FODA consiste en realizar una evaluación de los factores fuertes y débiles que, en su conjunto, diagnostican la situación interna de una organización, así como su evaluación externa, es decir, las oportunidades y amenazas. También es una herramienta que puede considerarse sencilla y que permite obtener una perspectiva general de la situación estratégica de una organización determinada. Thompson y Strikland (1998) establecen que el análisis FODA estima el efecto que una estrategia tiene para lograr un equilibrio o ajuste entre la capacidad interna de la

organización y su situación externa, esto es, las oportunidades y amenazas. Se utiliza esta técnica para profundizar en el estudio de la situación en la cual se encuentra la investigación analizando sus características internas y su situación externa.

- **Diagrama de Pareto**

El Diagrama de Pareto es una gráfica en donde se organizan diversas clasificaciones de datos por orden descendente, de izquierda a derecha por medio de barras sencillas después de haber reunido los datos para calificar las causas. De modo que se pueda asignar un orden de prioridades (Sales, 2013, p.1).

Mediante el Diagrama de Pareto se pueden detectar los problemas que tienen más relevancia mediante la aplicación del principio de Pareto (pocos vitales, muchos triviales) que dice que hay muchos problemas sin importancia frente a solo unos graves. Ya que, por lo general, el 80% de los resultados totales se originan en el 20% de los elementos. Se utiliza esta técnica de análisis para identificar el problema más significativo y para la medición de avance.

- **Diagrama de Ishikawa**

El Diagrama de Ishikawa es también conocido con el nombre de espina de pescado (por su forma), o también llamado diagrama causa-efecto (CE). Es una herramienta que ayuda a estructurar la información ayudando a dar claridad, mediante un esquema gráfico, de las causas que producen un problema, pero en si no identifica la causa raíz.

Para la elaboración del diagrama es posible proceder de dos formas: con la primera se trata de enlistar todos los problemas identificados, tipo “lluvia de ideas”, y de esta manera intentar jerarquizar cuáles son principales y cuáles son sus causas; la otra forma consiste en identificar las ideas principales y ubicarlas directamente en los “huesos primarios” y después comenzar a identificar causas secundarias, que se ubicaran en los “huesos pequeños”, que se desprenderán todos de las ramas principales.

### **3.8 Fases Metodológicas**

#### **Fase I: Diagnóstico del estado del alumbrado de la vía de la Autopista Regional del Centro desde el peaje de Guacara hasta San Joaquín.**

En la fase inicial de la investigación, se procede a observar el estado de las luminarias en la autopista regional del centro, y comprobar si se cuenta con las dimensiones necesarias para la realización del proyecto. Ya con las primeras impresiones del entorno se puede proceder con la descripción del proyecto para solventar la problemática

## **Fase II: Análisis y cálculos fundamentales del diseño del acumulador.**

Posteriormente, se recolectan los datos necesarios para la realización del diseño, y que el mismo cumpla con todos los requerimientos necesarios para su correcto funcionamiento, dichos datos son respecto al consumo de energía de las luminarias, la circulación de los vehículos por hora y el peso de los mismo, para luego realizar los cálculos pertinentes en el diseño del acumulador de energía vibracional piezoeléctrico.

## **Fase III: Selección de materiales adecuados en el diseño del acumulador de energía.**

Conociendo las condiciones del entorno y los cálculos necesarios para el diseño del acumulador, es fundamental escoger los materiales más calificados para el diseño, ya que los materiales piezoeléctricos tienen propiedades que pueden variar según las condiciones del entorno, tiene que ser seleccionado de acuerdo a la aplicabilidad.

## **Fase IV: Diseño y Simulación del acumulador de energía por medio del software Solidworks**

Ya una vez conocido los cálculos y el material con el que se realizará el proyecto, se procede con el diseño y simulación del acumulador de energía, el cual se realiza mediante el software Solidworks en el cuál se puede realizar el modelado de piezas en 3D, planos y herramientas para la simulación del acumulador de energía.

## **Fase V: Evaluar la viabilidad ambiental y económica del proyecto**

En la última fase de la investigación, se presenta el presupuesto necesario para la realización del proyecto, y si el mismo es bueno para el entorno y no tiene ningún efecto negativo para el medio ambiente.

### **3.9 Cuadro de Operacionalización de Variables**

La operacionalización de variables es un proceso válido para la construcción de instrumentos estructurados, o más explícitamente, aquellos instrumentos que permiten y faciliten el análisis cuantitativo de los datos. Esto permite presentar de forma organizada y sucinta el procedimiento instrumental que concluyó con una definición de un evento a partir de información emergente de información cualitativa. Para Corbetta (2003) “la operacionalización de variables es la “traducción empírica” de la teoría que es el fin último de método hipotético-deductivo”.

La operacionalización se realiza cuando el investigador desea realizar un abordaje focalizado de la investigación, cuando ya tiene un concepto específico del evento y su intención es construir un instrumento estructurado. En este caso, el instrumento permitirá captar solo

aquellos aspectos del evento que estén previamente definidos y contemplados en los indicios (Hurtado, 2012, p. 139). En la presente investigación, se muestra la operacionalización de variables en el cuadro técnico metodológico (Ver apéndice B).

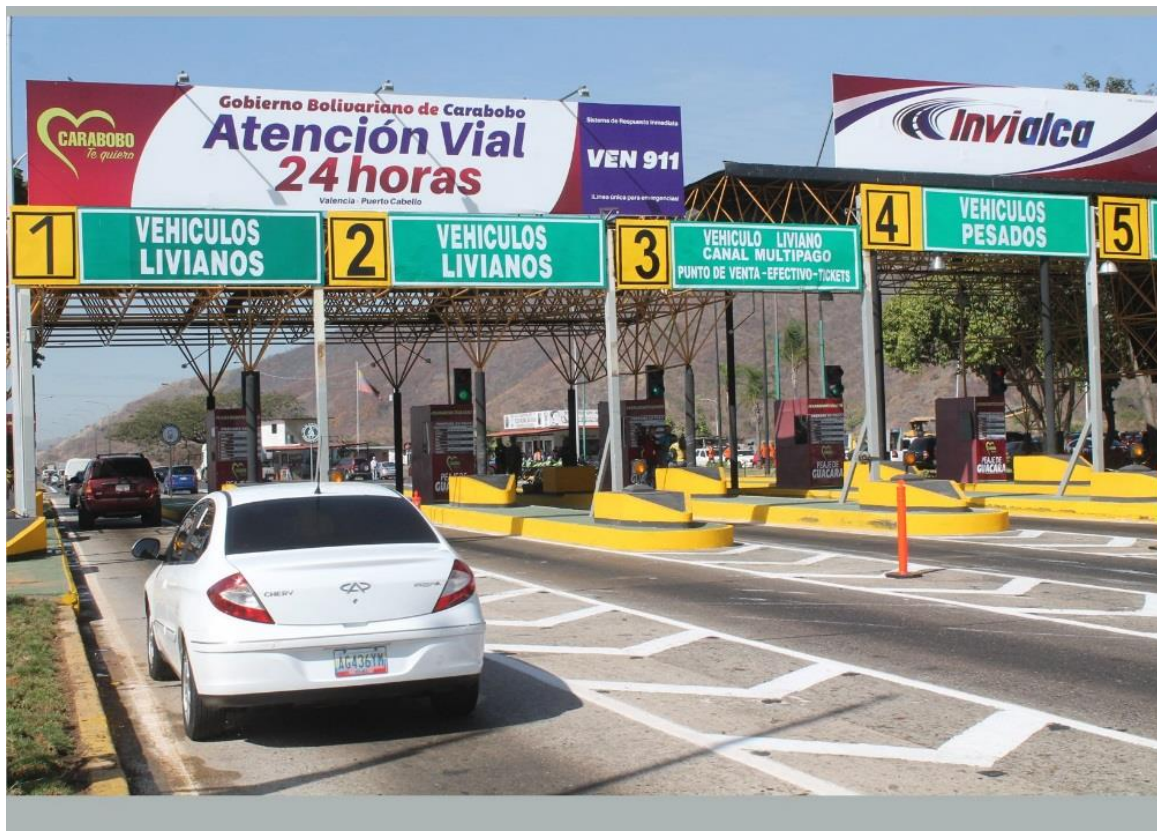
## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS**

En el presente capítulo, se exponen los resultados que se obtuvieron en la aplicación de cada una de las fases metodológicas. Con el fin de cumplir con los objetivos que se plantearon en la investigación para la realización del diseño y simulación del acumulador de energía vibracional piezoeléctrico.

#### **4.1 Diagnosticar el estado del alumbrado de la vía de la Autopista Regional del Centro desde el peaje de Guacara hasta San Joaquín.**

Como parte importante para la realización del proyecto se inició con el diagnóstico de la zona de estudio y la recolección de datos por medio de los distintos instrumentos que fueron tomados en cuenta por los investigadores, se inició tomando anotaciones de la circulación de los vehículos en los días que se consideran más transcurridos por los ciudadanos, se tomaron los días lunes y miércoles para llevar a cabo las anotaciones correspondientes. Dichas anotaciones se realizaron en la tarde de los días ya mencionados por una hora es decir de 4:30 PM hasta las 5:30 PM siendo considerada esta hora como la más transcurrida según los investigadores. En los apuntes redactados por los investigadores se registró una circulación de aproximadamente entre 300-400 vehículos por hora y como observaciones que la mayor circulación es por parte de vehículos ligeros. Consecuentemente se llevó a cabo una inspección al tramo de 3,7 km que corresponde a la autopista regional del centro entre el peaje de Guaca y el sector de san Joaquín, donde se observó el estado de las luminarias y se comprobó que en este tramo no se cuenta con un sistema de alumbrado lo que dificultó el avance del proyecto ya que al no contar con las luminarias no hay un registro de un consumo eléctrico de las mismas, lo que conllevó a un posterior cálculo del consumo eléctrico necesario para proceder con la descripción del proyecto para solventar la problemática.



**Figura 3:** Peaje de Guacara

**Fuente:** InviaIca (2023)

Con el fin de obtener más datos, se aplicó de igual manera el guion de preguntas a distintos especialistas en el área con el fin de obtener datos más precisos y acercarse a la conclusión de la viabilidad del proyecto en la zona. (Ver cuadro 1)

**Cuadro 1:** Guión de Preguntas

N°	GUIÓN DE PREGUNTAS
1	¿En qué condiciones considera usted que se encuentra el alumbrado público de la Autopista Regional del Centro en el tramo del peaje de Guacara-San Joaquín?
Respuesta	Actualmente el alumbrado de la autopista regional del centro, en este tramo del peaje a San Joaquín es inexistente y la vía es muy propensa a accidentes debido al mal estado de la misma. <b>- María Sánchez, Trabajadora de Inviaalca</b>
2	¿Cómo considera usted que puede mejorar el alumbrado público de la Autopista Regional del Centro?
Respuesta	Con la instalación de lámparas LED y el respectivo mantenimiento de las mismas para que la vía siempre esté iluminada. <b>- David García, Ingeniero Eléctrico</b>
3	¿Cuál es el consumo eléctrico de los faros del alumbrado público de la autopista regional del centro en el tramo del peaje de Guacara-san Joaquín?
Respuesta	Actualmente, en ese tramo de la autopista no hay luminarias, pero en el resto de la autopista las luminarias tienen un consumo de entre 40 y 100 W. <b>- David García, Ingeniero Eléctrico</b>
4	¿En qué hora del día se registran más circulación de vehículos a través del peaje de Guacara?
Respuesta	Por lo general, la hora en la que transitan más vehículos es de 4:00 PM a 6:00 PM dependiendo del día. <b>- María Sánchez, Trabajadora de Inviaalca</b>
5	Aproximadamente ¿cuál sería el promedio de vehículos que transitan diariamente por el peaje de Guacara.
Respuesta	Hay un promedio de circulación de aproximadamente 700-800 vehículos esto puede variar de acuerdo a la situación del combustible. <b>- María Sánchez, Trabajadora de Inviaalca</b>

**Fuente:** Flores Darwin, López Victor (2023)

Con los datos que se obtuvieron por medio de los instrumentos de recolección de datos, se procedió a aplicar las distintas técnicas de análisis de resultados para comprender el problema con el alumbrado público en la autopista regional del centro en el tramo del peaje de Guacara hasta San Joaquín.

#### 4.1.1 Matriz FODA

Con esta técnica se evaluó las distintas variables relacionadas con la zona de estudio. Variables tanto internas como externas, así mismo se plantearon las distintas estrategias aplicadas según las variables expuestas. (Ver cuadro 2)

**Cuadro 2:** Matriz FODA

	<b>FORTALEZAS</b>	<b>DEBILIDADES</b>
<b>Matriz FODA</b>	La seguridad que brinda el proyecto a los usuarios de la vía	El alto costo inicial que puede tener el proyecto
	Reducir el uso de combustibles fósiles	La baja circulación actual de vehículos en el país
	Alternativa al servicio eléctrico convencional	
<b>OPORTUNIDADES</b>	<b>ESTRATEGIAS FO</b>	<b>ESTRATEGIAS DO</b>
Innovar en el uso de energías renovables en Venezuela.	Incentivar a los usuarios de la vía a velar por su seguridad y apoyar el uso de energías renovables en el país	Contar con el apoyo de la comunidad para la elaboración del proyecto
Reconocimiento por parte de la comunidad.		Seleccionar los mejores criterios para generar la energía necesaria con una baja circulación de vehículos
Iniciar un proyecto desde cero acorde a las necesidades del proyecto	Sugerir el diseño de la instalación del alumbrado público para que beneficie al acumulador de energía	
<b>AMENAZAS</b>	<b>ESTRATEGIAS FA</b>	<b>ESTRATEGIAS DA</b>
La falta de mantenimiento por parte de las autoridades competentes	Solicitar a las autoridades competentes el respectivo mantenimiento de las luminarias cada cierto tiempo.	Sugerir en la instalación del alumbrado público las luminarias de menor consumo eléctrico para mayor eficiencia y duración de las mismas
La escasez del combustible en el país		

**Fuente:** Flores Darwin, López Victor (2023)

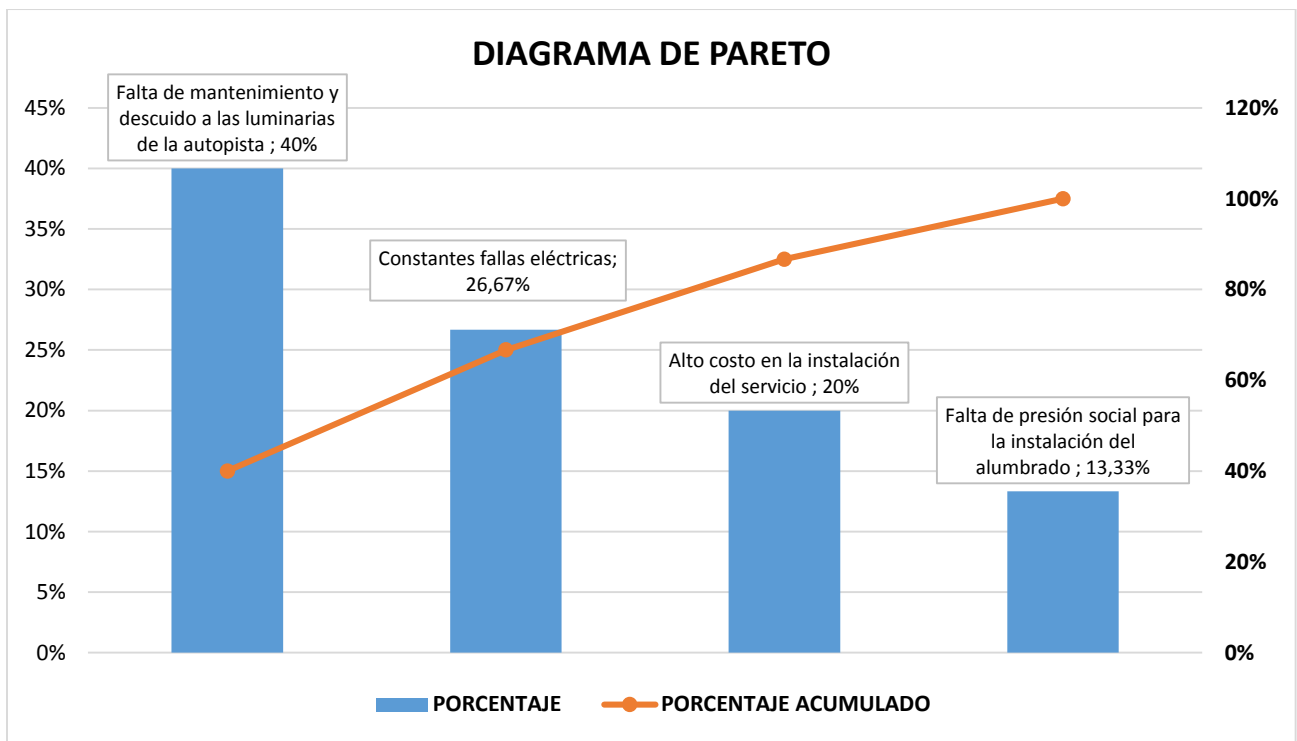
#### 4.1.2 Diagrama de Pareto

Con el diagrama de Pareto se evaluaron las distintas causas que generan el problema de un alumbrado público ineficiente en la autopista regional del centro del tramo Peaje-San Joaquín. Mediante datos recolectados en la zona de estudio. (ver tabla 1)

**Tabla 1:** Datos del diagrama de Pareto.

CAUSAS	DATOS	PORCENTAJE	PORCENTAJE ACUMULADO
Falta de mantenimiento y descuido a las luminarias de la autopista	6	40%	40%
Constantes fallas eléctricas	4	26,67%	66,67%
Alto costo en la instalación del servicio	3	20%	86,67%
Falta de presión social para la instalación del alumbrado	2	13,33%	100%

Fuente: Flores Darwin, López Víctor (2023)

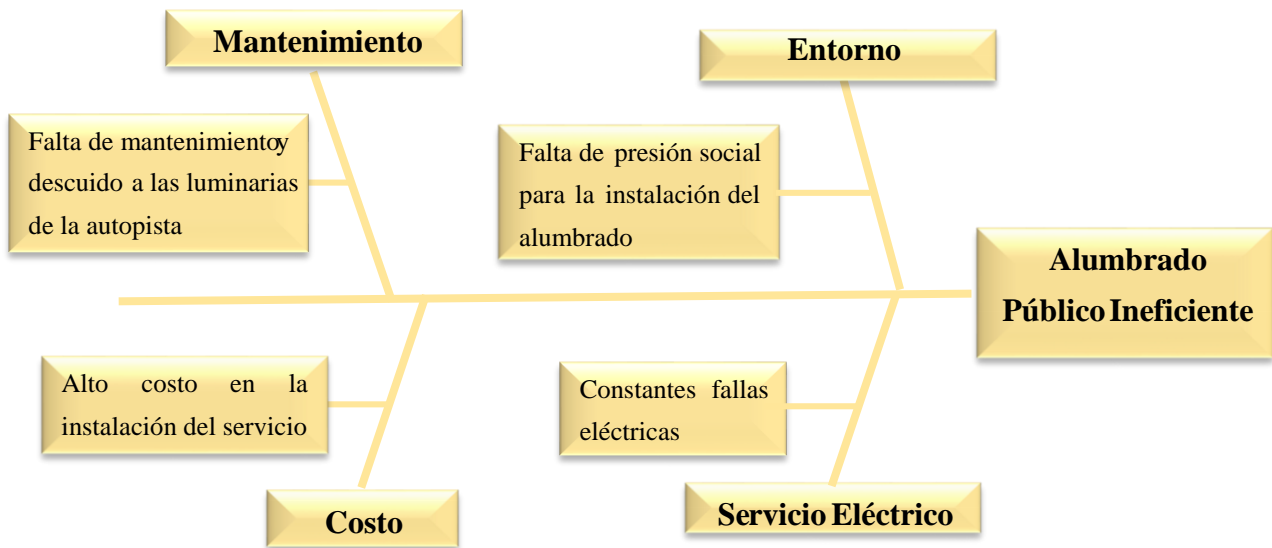


**Grafico 1:** Diagrama de Pareto

Fuente: Flores Darwin, López Víctor (2023)

#### 4.1.3 Diagrama de Ishikawa

Con esta técnica se identificó las posibles causas raíz del problema en cuestión. De una manera esquemática similar a la de una espina de pescado (Ver figura 4).



**Figura 4:** Diagrama de Ishikawa

**Fuente:** Flores Darwin, López Víctor (2023)

## 4.2 Analizar y Calcular los Parámetros Fundamentales del Diseño del Acumulador

Se recolectaron los datos necesarios para la realización del diseño, y que el mismo cumpla con todos los requerimientos necesarios para su correcto funcionamiento, dichos datos son respecto al consumo de energía de las luminarias, la circulación de los vehículos por hora y el peso de los mismo, para luego realizar los cálculos pertinentes en el diseño del acumulador de energía vibracional piezoeléctrico.

### 4.2.1 Consumo Energético de Luminarias

El consumo eléctrico fue determinado en el tramo del peaje de Guácara hasta San Joaquín, se realizó un estudio de distintos tipos de consumos eléctricos y estandarizaciones bajo las normas de CORPOELEC y COVENIN acerca del alumbrado público. Con los resultados de esta investigación se obtuvo que para un poste de alumbrado público de vías principales tales como autopistas de canales altamente transitados se utilizan bombillos para la iluminaria tales como, sodio 250 con un consumo de arranque de 250 watts, metal halide con un consumo de arranque de 150 watts y luminarias LED con consumo de 60 watts de arranque, a raíz de esto se tomó la decisión de seleccionar el bombillo LED con un consumo de 60watts debido que posee un menor consumo eléctrico y un menor impacto ambiental. Tomando como dato inicial que las luminarias trabajaran 12 horas continuas durante la noche de 6:30 p.m. hasta las 6:30 a.m. nos da como resultado que el consumo de una luminaria por día da un total de 720watts.

$$\text{Watts Requeridos Diarios} = W_{rd}$$

$$\text{Watts Requeridos Anuales} = W_{ra}$$

$$W_r = 12 \cdot 60W = 720 W$$

$$W_r = 365 \cdot 720W = 263,8 KW$$

Lo que se traduce a 263,8 KW en un año por cada luminaria. Tomando en cuenta los 3,7 Km que hay en cada sentido del tramo de la autopista regional del centro entre el Peaje de Guacara de San Joaquín nos da un total de 7,4 km. (Ver figura 5) Rigiéndose bajo la normalización y estandarización COVENIN 3290:1997 (Alumbrado Público Diseño) la cual establece que las iluminarias en catenarias consisten en la fijación de la iluminaria a lo largo de un cable suspendido a su vez de otro, soportados desde postes o torres separadas de 60 o 90 metros entre si y la altura de las luminarias con relación a la vía normalmente está entre 10 metros y 15 metros, y la interdistancia varia de dos a cuatro veces la altura del montaje. Tomando en cuenta estas especificaciones se estableció que la altura de cada poste será de 15 metros y su interdistancia será de 70 metros. Por consecuente al tener una distancia de 7,4km lo que equivale a una distancia en metros de 7.400m el cual se tendrá que iluminar y que cada poste está ubicado a 70m equivale a un total de 106 postes de alumbrado público cada uno con su bombillo LED correspondiente para así tener un consumo total de energía de 27.856,8KWatts. Anuales y 76,32KWatts diarios de consumo eléctrico.

$$\text{Consumo Total Diario} = W_{Td}$$

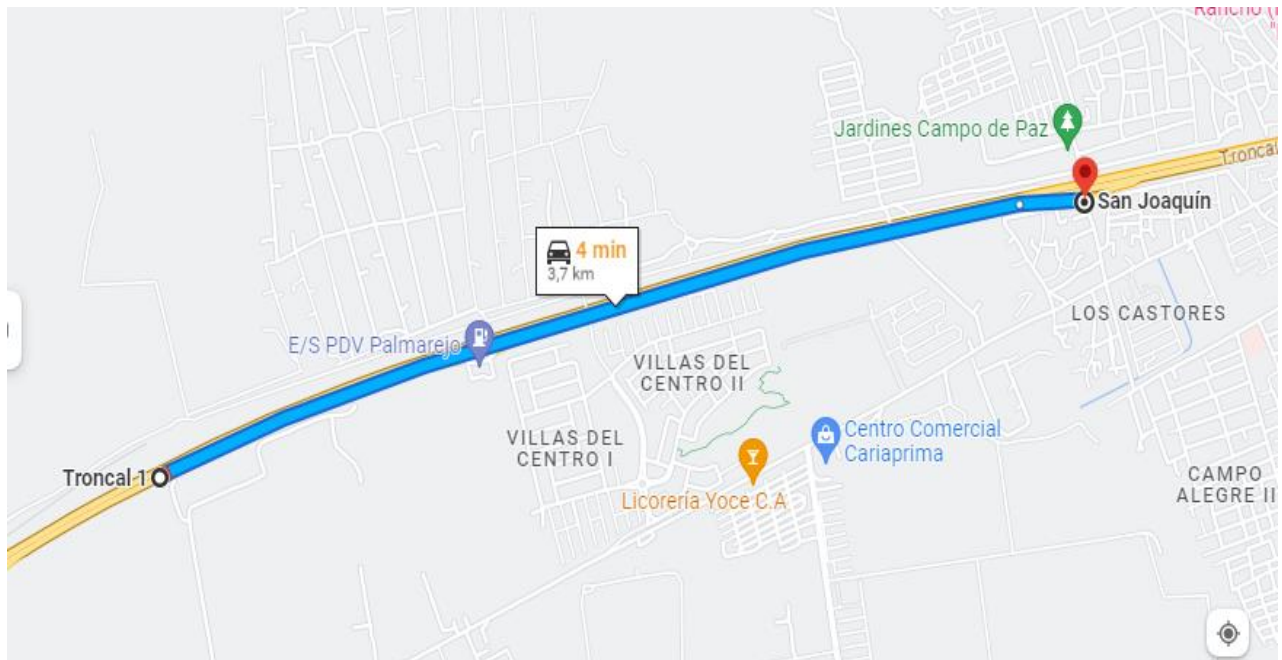
$$\text{Consumo Total Anual} = W_{Ta}$$

$$W_{Td} = N^{\circ} \text{Luminarias LED} \cdot W_{rd}$$

$$W_{Td} = (106)(720W) = 76,32kW$$

$$W_{Ta} = 365 \cdot W_{Td}$$

$$W_{Ta} = (365)(76,32kW) = 27,86MW$$



**Figura 5:** Distancia entre el Peaje de Guacara y San Joaquín

**Fuente:** Google Maps (2023)

#### 4.2.2 Flujo Vehicular y Peso de los Vehículos

Para el posterior estudio de cada uno de los casos escenarios planteados, será necesario exponer algunas características básicas antes de poder modelar correctamente. Para ello se calculan las características estructurales medias de los vehículos, como peso y velocidades medias.

##### 4.2.2.1 Estudio del Tráfico

Para definir el sistema es necesario conocer los datos del tráfico, que a su vez afectarán a los trenes de pulso generados por los vehículos que se estudian en los puntos 4.2.2.1 y 4.2.2.2 en función tanto de la velocidad como del número de impulsos por unidad de tiempo. Para este análisis se realizó una observación directa en el peaje de Guacara para tomar el número de vehículos que lo transitan diario y con apoyo del diario de campo se recolectaron los datos iniciales de la cantidad de vehículos que transitaron por el peaje de Guacara entre las horas pico de 6:00 a.m. a 7:00 a.m. y de 4:30p.m. a 5:30 p.m. los días lunes y miércoles para así realizar un promedio de vehículos/hora. Teniendo como conclusión que en los días de semana en promedio transitan entre 300 y 400 vehículos por hora en ambos sentidos de la autopista. Teniendo aproximadamente que el 25% de estos vehículos perteneces a vehículos clasificados como carga pesada (Ver tabla 2).

**Tabla 2:** Tipos de vehículos y sus respectivas tarifas

<b>TIPO DE VEHÍCULO</b>	<b>TARIFA [Bs.]</b>
VEHICULOS LIVIANOS (Automóviles, camionetas, pick up y rústicos).	1,00
MICROBUSES (de 16 a 32 pasajeros)	5,00
AUTOBUSES (más de 16 a 32 pasajeros)	10,00
VEHÍCULOS DE CARGA LIVIANA (350 o similar, vehículos livianos con remolques, grúas livianas y grúas de plataforma).	18,00
<b>VEHÍCULOS DE CARGA PESADA</b>	
2 EJES (750 o similar, grúas pesadas, máximo 19 toneladas)	20,00
3 EJES	23,00
4 EJES	28,00
5 EJES	33,00
6 EJES o MAS	38,00

**Fuente:** InviaLca (2023)

El peaje de Guacara cuenta con 14 canales, distribuidos siete en cada sentido de la autopista, a su vez los mismos cuentan con una distribución establecidas en las gacetas de cobros las cuales van desde vehículos livianos hasta camiones de carga pesada (ver figura 6). Los cuales están distribuidos de la siguiente manera. Los vehículos livianos cuentan con tres casillas de cobro y los vehículos pesados cuentan con tres de igual forma en el mismo sentido de la autopista. Es importante conocer esto para tener referencia del tipo de vehículos que van a accionar el generador piezoeléctrico.



**Figura 6:** Canales del Peaje de Guacará

**Fuente:** Google Maps, vista satelital (2023)

Como se puede observar en la figura 6, se trata de una vía iluminada de seis carriles en cada sentido como se mencionó anteriormente tres de estos son de uso de vehículos livianos y tres de vehículos de carga pesada. Conocidas estas características, se calcula el número de vehículos que circulan diariamente por cada carril.

$$Circulación\ de\ veh\acute{u}culos = 3360 \frac{Veh\acute{u}culos}{d\acute{a}a}$$

$$Circulación\ de\ cada\ carril = \frac{3360}{6} = 560 \frac{veh\acute{u}culos}{carril}$$

Además, los datos del índice medio diario de los que se parte, incluyen en sus medias tanto las noches como los fines de semana o días festivos. Debido a esto el periodo no será constante en la realidad, si no que dependerá del día y la hora. No obstante, debido a que lo que se pretende es calcular la energía total obtenida, se partirá de la base de que el trafico fluctúa de forma constante sin tener en cuenta diferencias de densidad.

#### 4.2.2.2 Cálculo de los Vehículos Livianos

El primer modelo realizado es el de los vehículos livianos El Decreto N° 211 aludido que establece las Normas sobre Emisiones de vehículos Motorizados Livianos, define a los vehículos motorizados livianos, como todos aquellos vehículos con un peso bruto de menos de 2.700 kg, excluidos los de tres o menos ruedas. Los vehículos livianos, se clasifican en vehículos de pasajeros y comerciales. Para la realización de los cálculos tomaremos en cuenta también los vehículos clasificados como (350 o similar, livianos con remolques, grúas livianas y grúas de plataforma) no tomaremos en cuenta la carga que estos puedan tener. Se tomará su peso sin carga como dato inicial siendo un aproximado entre 2.722 kg y 3.000 kg tomando el vehículo liviano más ligero pesa 800kg, promediamos y nos da un total de 1.400 kg en carga.

Se Procede a obtener la fuerza que ejercerá el vehículo sobre el material piezoeléctrico, para ello es necesario calcular cual es la presión que produce cada una de las ruedas sobre el firme. Calculando la fuerza total ejercida teniendo en cuenta que esta fuerza se reparte entre las cuatro ruedas, cada una de ellas ejercerá una fuerza proporcional.

$$F_{total} = ma$$

$$F_{total} = (1400kg)(9.81m/s^2) = 13,734 kN$$

$$F_{rueda} = 13,734 kN / 4 ruedas = 3,43kN$$

Otro de los aspectos a considerar es la distancia que hay ente los ejes, debido a que sabiendo la velocidad a la que circulan los vehículos podemos estimar el tiempo entre los dos pulsos que genera el vehículo al paso por un piezoeléctrico. Teniendo en consideración que no todos los vehículos comparten las mismas características se tomara una longitud estimada de 2,5m. En el peaje de Guacara la velocidad de los vehículos se ve reducida entre los 10 y 20 km/h. Con la distancia entre ejes se podrá por tanto calcular el tiempo entre los pulsos:

$$v_{med.} = 15km/h = 4,17m/s$$

$$t_1 = 2,5m / 4,17m/s = 0,6seg.$$

Se estima que un neumático tiene una superficie de contacto de 20cm × 10cm, lo que equivale a 200cm<sup>2</sup> que serían 0,02m<sup>2</sup>. Teniendo en cuenta entonces la superficie total de contacto que se repartirá la fuerza, ver figura 7



**Figura 7:** Representación de la superficie de contacto entre el neumático y la carretera

**Fuente:** Flores Darwin, López Víctor (2023)

$$Presion = 3,43kN/0,02m^2 = 0,17MPa$$

#### 4.2.2.3 Cálculo de los Vehículos Pesados

La primera complicación que surge al hacer los de este tipo de vehículos es que estos tienen dimensiones y pesos muy variados, en el caso de los ligeros también ocurre en cierta medida, pero para los pesados el peso en vacío o cargado tiene un cambio muy considerable y el número de ejes no es siempre el mismo. Por lo mismo los datos tomados para los cálculos serán asumidos de acuerdo al conocimiento de las características de los vehículos de carga pesada más utilizados en el territorio venezolano. Partiendo de eso tomamos en consideración que el vehículo pesado promedio tiene 3 ejes, considerando que la distancia entre los mismos es 4m entre el primero y segundo y 1,4m entre el segundo y el tercero. Para calcular el tren de pulsos se hace lo mismo que en el caso de los vehículos ligeros, tomaremos un peso promedio de 7000kg despreciando el peso de la carga. Procedimos a calcular la  $F_{total}$  y  $F_{rueda}$ .

$$F_{total} = ma$$

$$F_{total} = (7000Kg)(9.81m/s^2) = 68,67kN$$

$$F_{rueda} = 68.67 \text{ kN}/6 \text{ ruedas} = 11,45 \text{ kN}$$

$$Presion = 11,45 \text{ kN}/0,02 \text{ m}^2 = 0,57 \text{ MPa}$$

Ahora se calcula  $t_1$  y  $t_2$ :

$$t_1 = 4 \text{ m}/4,17 \text{ m/s} = 0,96 \text{ seg.}$$

$$t_2 = 1,4 \text{ m}/4,17 \text{ m/s} = 0,34 \text{ seg.}$$

### **4.3 Selección del Materiales Adecuado en el Diseño Del Acumulador de Energía**

Se busca obtener varias alternativas de solución con la finalidad de alcanzar el objetivo deseado la conversión de energía mecánica a eléctrica de forma óptima. El propósito principal es dividir en secciones las diferentes funciones que debe cumplir el mecanismo con lo cual podemos examinar a detalle cada sección y determinar las soluciones adecuadas comenzando con la elección del material Piezoeléctrico:

Para la selección del material piezoeléctrico se realizó un estudio de las condiciones ambientales a las que estará expuesto el mismo. Las baldosas piezoeléctricas estarán en contacto directo con el asfalto de la carretera, y se tiene que el asfalto es un buen aislante eléctrico, ya que no puede pasar corriente eléctrica a través de él. Tiene una buena estructura cíclica con carbono de doble enlace y electrones pi que no contribuyen a la generación de electricidad. Esto es importante para que no se disipe la energía eléctrica generada con el entorno y las baldosas piezoeléctricas queden aisladas.

La temperatura del asfalto en la carretera puede variar significativamente dependiendo de una serie de factores, incluida la temperatura del aire, la cantidad de radiación solar, la velocidad del viento y el espesor de la capa de asfalto. Sin embargo, como regla general, el asfalto puede alcanzar temperaturas de hasta 50 °C en un día soleado con una temperatura del aire de 30 °C

**Tabla 3:** Temperatura Aproximada del Asfalto en la Carretera a

<b>TEMPERATURA DEL AIRE</b>	<b>TEMPERATURA DEL ASFALTO</b>
<b>20°</b>	<b>35°</b>
<b>30°</b>	<b>50°</b>
<b>40°</b>	<b>65°</b>
<b>50°</b>	<b>80°</b>

Diferentes Temperaturas del Aire

**Fuente:** forconstructionpros.com (2023)

Con respecto al grosor de la carretera, se estima entre 15-20 cm. El mismo varía según el tipo de carretera, la cantidad de tráfico y el clima. Sin embargo, como regla general, una carretera suele tener un grosor de 4 a 6 pulgadas.

**Tabla 4:** Espesor Aproximado del Asfalto Según el Tipo

<b>TIPO DE CARRETERA</b>	<b>ESPESOR DEL ASFALTO</b>
<b>Carreteras principales</b>	<b>4 a 6 pulgadas</b>
<b>Interestatales</b>	<b>5 a 7 pulgadas</b>
<b>Autopistas</b>	<b>6 a 8 pulgadas</b>

**Fuente:** safety.fhwa.dot.gov (2014)

Ya una vez consideradas, las condiciones de la carretera en la autopista regional del centro, se procedió a enlistar los diferentes tipos de materiales piezoeléctricos para ser utilizados en el diseño, debido a que el objetivo deseado en la presente investigación consiste en la conversión de energía en donde se tiene que garantizar una transmisión de tensión mecánica adecuada, es requerido un diseño adecuado del sistema de captación de energía debido a que se busca maximizar la conversión de energía mecánica por vibraciones a eléctrica lo que depende directamente de la deformación del material piezoeléctrico. Basándose en investigaciones anteriores acerca del funcionamiento de los materiales piezoeléctricos y la generación de energía de los mismos, para aumentar la potencia de salida al máximo se requiere que la frecuencia de los de resonancia del acumulador piezoeléctrico debe coincidir con la frecuencia de la señal de la

fuente de vibración aplicada. Antes de proceder con los parámetros a investigar para el diseño efectivo de conversión (función) incluye los siguientes elementos:

- Selección del material.
- Geometría y estructura.

Se tienen tres tipos de materiales piezoeléctricos principales en los cuales destacan:

- **Monocristales:** Estos materiales tienen una estructura atómica regular que les confiere sus propiedades piezoeléctricas. El material piezoeléctrico de monocristal más usado es cuarzo.
- **Polímeros:** Estos materiales están formados por largas cadenas de moléculas que están dispuestas de tal forma que les confieren propiedades piezoeléctricas. El polímero piezoeléctrico más común es el fluoruro de polivinilideno (PVDF).
- **Cerámica:** Estos materiales están formados por pequeños cristales que están dispuestos de forma que les confieren propiedades piezoeléctricas. El material cerámico piezoeléctrico más común es el titanato de circonato de plomo (PZT).

De estos principales materiales piezoeléctricos se investigó sobre cada uno de ellos para determinar los criterios para la selección, cada uno con sus propias propiedades únicas. Algunos factores que se consideraron al investigar fueron:

- **Coefficiente piezoeléctrico:** esta es una medida de cuánta carga eléctrica generará un material cuando se somete a un estrés mecánico.
- **Propiedades mecánicas:** El material piezoeléctrico debe ser lo suficientemente fuerte para soportar las cargas que se le aplicarán.
- **Estabilidad ambiental:** El material piezoeléctrico debe ser capaz de soportar las condiciones ambientales a las que estará expuesto.

#### 4.3.1 Monocristales

Son una buena opción para aplicaciones donde se requiere alta potencia y durabilidad.

En este caso tomamos el PZT como posible solución al diseño debido a que tienes las propiedades más ideales. Como se muestra en la tabla 5.

**Tabla 5:** Propiedades piezoeléctricas y mecánicas del titanato de circonato de plomo (PZT)

Propiedades piezoeléctricas	
Coefficiente piezoeléctrico	$d_{33} = 320-350 \text{ pC/N}$ (a temperatura ambiente)
Constante dieléctrica	$\epsilon_r = 1000-1500$ (a temperatura ambiente)
Temperatura de Curie	$T_c = 300-400 \text{ }^\circ\text{C}$
Propiedades mecánicas	
Módulo de Young	$E = 500-600 \text{ Gpa}$
Módulo de corte	$G = 150-200 \text{ Gpa}$
Relación de Poisson	$\nu = 0,3$
Dureza	$H = 7-8 \text{ Gpa}$

Fuente: support.piezo.com

#### 4.3.2 Polímeros

Entre las ventajas y desventajas de utilizar un material piezoeléctrico polimérico podemos encontrar:

##### Ventajas:

- **Bajo costo:** Son relativamente económicos.
- **Flexibilidad:** Se pueden moldear o moldear fácilmente.
- **Durabilidad:** Son relativamente duraderos y pueden soportar altas temperaturas.

##### Desventajas:

- **Coefficiente piezoeléctrico más bajo:** Esto significa que pueden generar menos carga eléctrica cuando están estresados.
- **Menor potencia de salida:** Esto significa que pueden almacenar menos energía.
- **Sensibilidad a la temperatura:** su rendimiento puede verse afectado por la temperatura.

Así mismo, para los polímeros como posible solución se tomó en cuenta el Fluoruro de polivinilideno (PVDF). Que cuenta con las siguientes propiedades (Ver tabla 6):

**Tabla 6:** Propiedades piezoeléctricas y mecánicas del Fluoruro de polivinilideno (PVDF)

Propiedades piezoeléctricas	
Coefficiente piezoeléctrico	$d_{33} = 20-30 \text{ pC/N}$ (a temperatura ambiente)
Constante dieléctrica	$\epsilon_r = 80-100$ (a temperatura ambiente)
Temperatura de Curie	$T_c = 175-225 \text{ }^\circ\text{C}$
Propiedades mecánicas	
Módulo de Young	$E = 2,7-4,2 \text{ Gpa}$
Módulo de corte	$G = 0,7-1,2 \text{ Gpa}$
Relación de Poisson	$\nu = 0,4$
Dureza	$H = 20-30 \text{ Mpa}$

**Fuente:** Perspectivas futuras y desarrollos recientes del polímero piezoeléctrico de fluoruro de polivinilideno (PVDF); métodos de fabricación, estructura y propiedades electromecánicas (Artículo Científico, 2023)

#### 4.3.3 Cerámica

Se consideró el titanato de estroncio ( $\text{SrTiO}_3$ ) como posible solución, ya que también cuenta con propiedades considerables como se muestra en la tabla 7

**Tabla 7:** Propiedades piezoeléctricas y mecánicas del titanato de estroncio ( $\text{SrTiO}_3$ )

Propiedades piezoeléctricas	
Coefficiente piezoeléctrico	$d_{33} = 0,25-0,30 \text{ C/m}^2$ (a temperatura ambiente)
Constante dieléctrica	$\epsilon_r = 300$ (a temperatura ambiente)
Temperatura de Curie	$T_c = 126 \text{ K}$
Propiedades mecánicas	
Módulo de Young	$E = 120 \text{ Gpa}$
Módulo de corte	$G = 57 \text{ Gpa}$
Relación de Poisson	$\nu = 0,3$
Dureza	$H = 10 \text{ Gpa}$

**Fuente:** Titanato de Estroncio ( $\text{SrTiO}_3$ ) - Propiedades y Aplicaciones (AZoM.com, 2004)

#### 4.3.4 Aplicación de las Restricciones a las Probables Soluciones

Ya una vez seleccionados los materiales como posibles soluciones al diseño, se procedió a comparar estas posibles soluciones en relación a las restricciones que tenga el proyecto, solo la solución que cumpla con todas las restricciones se pueden convertir en soluciones concretas al diseño.

Se utilizó la siguiente nomenclatura para las posibles soluciones al diseño  $(PS)_n$ :

- $(PS)_1$ : PZT
- $(PS)_2$ : Fluoruro de polivinilideno (PVDF)
- $(PS)_3$ : Titanato de estroncio (SrTiO<sub>3</sub>)

Las restricciones se identificaron como  $(R_n)$ :

- $R_1$ : Estabilidad ante las condiciones ambientales
- $R_2$ : Las propiedades mecánicas necesarias para soportar las cargas
- $R_3$ : La potencia de salida necesaria

**Cuadro 3:** Probables soluciones con respecto a las restricciones

		Posibles Soluciones		
		(PS)1	(PS)2	(PS)3
Restricciones	R1	SI	SI	SI
	R2	SI	SI	SI
	R3	SI	SI	SI

Fuente: Flores Darwin, López Víctor (2023)

### Ponderación de Criterios

Los criterios se utilizan para poder dar relevancia a los aspectos fundamentales en el diseño del acumulador de energía, estos criterios se toman en cuenta por medio de una escala numérica donde se le asigna un valor a cada criterio.

Para este caso, se ha utilizado una escala del uno al cinco siendo uno un criterio con poca importancia y cinco con mucha importancia. Los criterios escogidos se van a denotar como  $(C_n)$  y sus ponderaciones  $(PC)_n$ . Los criterios escogidos son los siguientes:

- $C_1$ : Menor costo del material  $\rightarrow (PC)_1 = 4$
- $C_2$ : Durabilidad del material  $\rightarrow (PC)_2 = 3$
- $C_3$ : Las dimensiones del material  $\rightarrow (PC)_3 = 3$
- $C_4$ : Estabilidad ambiental del material  $\rightarrow (PC)_4 = 4$
- $C_5$ : Eficiencia del material para producir la energía necesaria  $\rightarrow (PC)_5 = 5$

La comprobación lógica de estos resultados se observa en el siguiente cuadro: ver cuadro 4.

**Cuadro 4:** Comprobación lógica de los criterios

	C1	C2	C3	C4	C5	Nº de veces	(PC)x
C1						2	4
C2	C1					1	3
C3	C1	C2				0	3
C4	C4	C4	C4			3	4
C5	C5	C5	C5	C5		4	5
Orden de import.	5to.	3ro.	4to.	2do.	1ro.		

Fuente: Flores Darwin, Víctor López (2023)

### Ponderación de Soluciones Respecto a cada Criterio

Ya una vez establecidos los criterios y sus respectivas ponderaciones, se procede a relacionar dichos criterios con las soluciones candidatas al diseño. La nomenclatura que se utilizó para las soluciones es ( $S_n$ ):

- $S_1$ : Titanato de circonato de plomo (PZT)
- $S_2$ : Fluoruro de polivinilideno (PVDF)
- $S_3$ : Titanato de estroncio (SrTiO<sub>3</sub>)

La ponderación que tendrá cada solución respecto a cada criterio ( $P_{pk}$ ) será:

**Cuadro 5:** Soluciones con respecto al criterio 1

C1	S1	S2	S3	Nº de veces	$P_{xl} = N$
S1				0	$P_{11} = 1$
S2	S2			2	$P_{21} = 3$
S3	S3	S2		1	$P_{31} = 2$
Orden de aceptación	3ro.	1ro.	2do.		

Fuente: Flores Darwin, Víctor López (2023)

**Cuadro 6:** Soluciones con respecto al criterio 2

C2	S1	S2	S3	Nº de veces	$P_{xl} = N$
S1				2	$P_{12} = 3$
S2	S1			1	$P_{22} = 2$
S3	S1	S2		0	$P_{32} = 1$
<b>Orden de aceptación</b>	<b>1ro.</b>	<b>2do.</b>	<b>3ro.</b>		

Fuente: Flores Darwin, Víctor López (2023)

**Cuadro 7:** Soluciones con respecto al criterio 3

C3	S1	S2	S3	Nº de veces	$P_{xl} = N$
S1				2	$P_{13} = 3$
S2	S1			0	$P_{23} = 1$
S3	S1	S3		1	$P_{33} = 2$
<b>Orden de aceptación</b>	<b>1ro.</b>	<b>3ro.</b>	<b>2do.</b>		

Fuente: Flores Darwin, Víctor López (2023)

**Cuadro 8:** Soluciones con respecto al criterio 4

C4	S1	S2	S3	Nº de veces	$P_{xl} = N$
S1				2	$P_{14} = 3$
S2	S1			0	$P_{24} = 1$
S3	S1	S3		1	$P_{34} = 2$
<b>Orden de aceptación</b>	<b>1ro.</b>	<b>3ro.</b>	<b>2do.</b>		

Fuente: Flores Darwin, Víctor López (2023)

**Cuadro 9:** Soluciones con respecto al criterio 5

C5	S1	S2	S3	Nº de veces	$P_{xl} = N$
S1				2	$P_{15} = 3$
S2	S1			1	$P_{25} = 2$
S3	S1	S2		0	$P_{35} = 1$
Orden de aceptación	1ro.	2do.	3ro.		

Fuente: Flores Darwin, Víctor López (2023)

### Ponderación Final

Este es el último paso para obtener la solución ideal para el diseño del acumulador de energía, para hacer la ponderación final se utiliza una fórmula que relaciona la ponderación de cada criterio con cada solución dando al final un valor numérico, la solución que tenga el número mayor será la solución elegida. En la siguiente tabla se colocará el valor de cada solución respecto a la ponderación de los criterios:

**Cuadro 10:** Valor final de cada solución

$PC_X$	$P_{1X}$	$PC_X \cdot P_{1X}$	$P_{2X}$	$PC_X \cdot P_{2X}$	$P_{3X}$	$PC_X \cdot P_{3X}$
$PC_1$	$P_{11}$	$PC_1 \cdot P_{11} = 4$	$P_{21}$	$PC_1 \cdot P_{21} = 12$	$P_{31}$	$PC_1 \cdot P_{31} = 8$
$PC_2$	$P_{12}$	$PC_2 \cdot P_{12} = 9$	$P_{22}$	$PC_2 \cdot P_{22} = 6$	$P_{32}$	$PC_2 \cdot P_{32} = 3$
$PC_3$	$P_{13}$	$PC_3 \cdot P_{13} = 9$	$P_{23}$	$PC_3 \cdot P_{23} = 3$	$P_{33}$	$PC_3 \cdot P_{33} = 6$
$PC_4$	$P_{14}$	$PC_4 \cdot P_{14} = 12$	$P_{24}$	$PC_4 \cdot P_{24} = 4$	$P_{34}$	$PC_4 \cdot P_{34} = 8$
$PC_5$	$P_{15}$	$PC_5 \cdot P_{15} = 15$	$P_{25}$	$PC_5 \cdot P_{25} = 10$	$P_{35}$	$PC_5 \cdot P_{35} = 5$
		$\sum (PC_X \cdot P_{1X}) = 49$			$\sum (PC_X \cdot P_{2X}) = 35$	$\sum (PC_X \cdot P_{3X}) = 30$

Fuente: Flores Darwin, López Victor

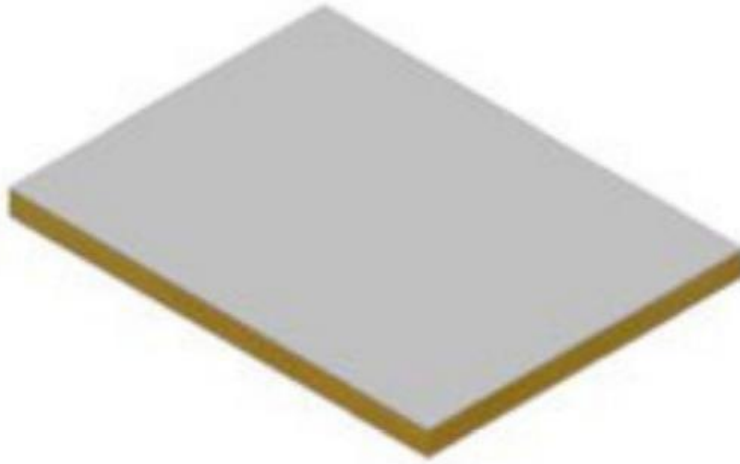
Observando los valores obtenidos en la tabla, se llega a la conclusión que la solución más óptima con respecto al material a utilizar en el diseño del acumulador es la solución uno la cual corresponde a titanato de circonato de plomo (PZT).

Procediendo con los pasos de elección ahora se realizará la elección del tipo de geometría y estructura que se ajuste a las necesidades del generador piezoeléctrico.

### 4.3.5 Soluciones para la Selección de la Geometría y Estructura del Piezoeléctrico.

Luego de seleccionar el material se procedió a escoger la geometría y estructura del mismo, con la misma metodología aplicada para seleccionar el material, con la finalidad de obtener el mejor rendimiento. Las soluciones que se tienen en cuenta son las siguientes:

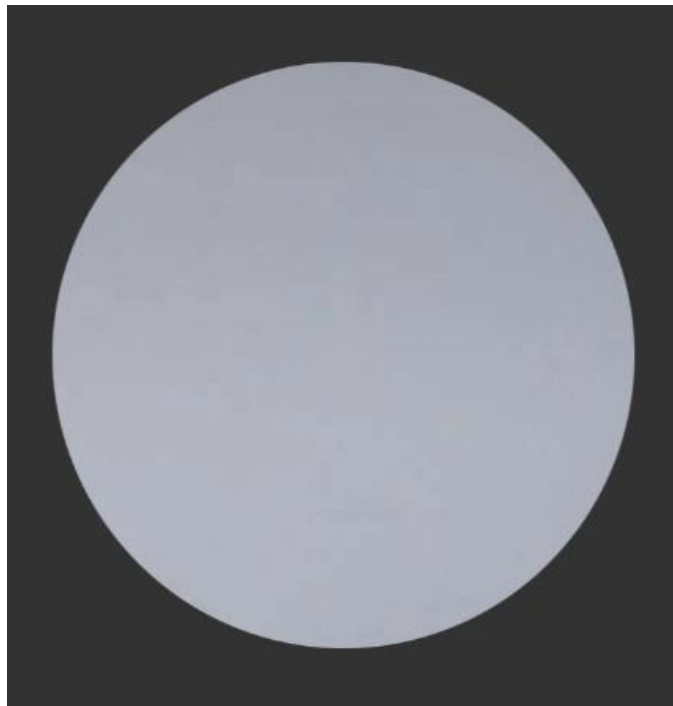
**Solución 1:** Piezoeléctrico unimorfo/bimorfo (viga en voladizo)



**Figura 8:** piezoeléctrica platina

Fuente: piezo.com

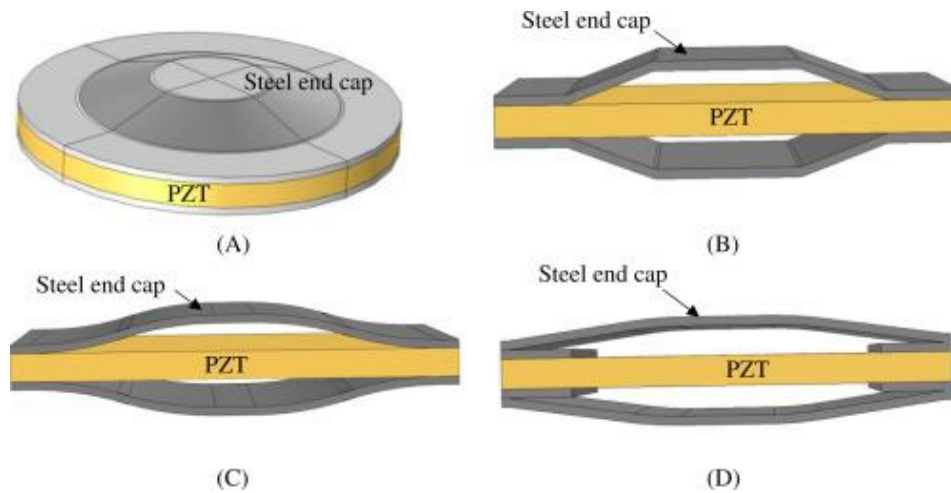
**Solución 2:** Circular



**Figura 9:** Piezoeléctrico Circular.

Fuente: piezo.com

**Solución 3:** Tipo pila/transductor de platillos



**Figura 10:** Ilustración de transductores PZT para (A) plato, (B) puente, (C) puente con tapa de arco y (D) puente con tapa de arco.

**Fuente:** Cymbal Transducer (Artículo científico, 2020)

**4.3.5.1 Ponderación de Criterios para Geometría y Estructura del Piezoeléctrico.**

Los criterios que se tomaron en cuenta para la selección de la geometría y estructura del material piezoeléctrico, fueron los siguientes:

$C_1$ : Costo  $\rightarrow (PC)_1 = 1,5$

$C_2$ : Resistencia  $\rightarrow (PC)_2 = 2$

$C_3$ : Generación de energía  $\rightarrow (PC)_3 = 3$

Comprobación lógica de criterios:

**Cuadro 11:** Comprobación lógica de los criterios de la geometría del material

	C1	C2	C3	Nº de veces	(PC)x
C1				0	1
C2	C2			1	1,5
C3	C3	C3		2	3
Orden de import.	3ro.	2do	1ro		

**Fuente:** Flores Darwin, Víctor López (2023)

**4.3.5.2 Ponderación de Soluciones Respecto a cada Criterio para la Geometría del Material**

Tal como se realizó con la selección del material, se pondera cada solución con cada uno de los criterios para la geometría y estructura del material.

- $S_1$ : Piezoeléctrico unimorfo/bimorfo (viga en voladizo)
- $S_2$ : Circular
- $S_3$ : Tipo pila/transductor de platillos

La ponderación para cada uno de los criterios será:

**Cuadro 12:** Soluciones con respecto al criterio 1

C1	S1	S2	S3	Nº de veces	$P_{xl} = N$
S1				1	$P_{11} = 2$
S2	S2			2	$P_{21} = 3$
S3	S1	S2		0	$P_{31} = 1$
<b>Orden de aceptación</b>	<b>3ro.</b>	<b>1ro.</b>	<b>2do.</b>		

Fuente: Flores Darwin, Víctor López (2023)

**Cuadro 13:** Soluciones con respecto al criterio 2

C2	S1	S2	S3	Nº de veces	$P_{xl} = N$
S1				1	$P_{12} = 1$
S2	S2			2	$P_{22} = 3$
S3	S3	S2		0	$P_{32} = 2$
<b>Orden de aceptación</b>	<b>3ro.</b>	<b>1ro.</b>	<b>2do.</b>		

Fuente: Flores Darwin, Víctor López (2023)

**Cuadro 14:** Soluciones con respecto al criterio 3

C3	S1	S2	S3	Nº de veces	$P_{xl} = N$
S1				0	$P_{13} = 1$
S2	S2			1	$P_{23} = 2$
S3	S3	S3		2	$P_{33} = 3$
<b>Orden de aceptación</b>	<b>3ro.</b>	<b>1ro.</b>	<b>2do.</b>		

Fuente: Flores Darwin, Víctor López (2023)

#### 4.3.5.3 Ponderación Final

Ya con todas las ponderaciones podemos hacer la sumatoria y llegar a la conclusión de la geometría y estructura del material. Como se muestra en el cuadro 16

**Cuadro 16:** Valor final de cada solución

$PC_X$	$P_{1X}$	$PC_X \cdot P_{1X}$	$P_{2X}$	$PC_X \cdot P_{2X}$	$P_{3X}$	$PC_X \cdot P_{3X}$
$PC_1$	$P_{11}$	$PC_1 \cdot P_{11} = 2$	$P_{21}$	$PC_1 \cdot P_{21} = 3$	$P_{31}$	$PC_1 \cdot P_{31} = 1$
$PC_2$	$P_{12}$	$PC_2 \cdot P_{12} = 1,5$	$P_{22}$	$PC_2 \cdot P_{22} = 4,5$	$P_{32}$	$PC_2 \cdot P_{32} = 3$
$PC_3$	$P_{13}$	$PC_3 \cdot P_{13} = 3$	$P_{23}$	$PC_3 \cdot P_{23} = 6$	$P_{33}$	$PC_3 \cdot P_{33} = 9$
		$\sum (PC_X \cdot P_{1X}) = 6,5$	$\sum (PC_X \cdot P_{2X}) = 13,5$		$\sum (PC_X \cdot P_{3X}) = 13$	

Fuente: Flores Darwin, López Víctor (2023)

Con el resultado obtenido, se llega a la conclusión de que la mejor solución para la geometría y estructura del material es circular.

#### 4.3.6 Modelo PZT

Luego de haber realizado el estudio para la selección del material y su geometría, se escogió el modelo PZT que se utilizará en el diseño del acumulador. Concretamente se decidió utilizar un piezoeléctrico del fabricante Noliac, concretamente el NCE51. (Ver propiedades en la tabla 8).

**Tabla 8:** Propiedades de PZT NCE51:

NCE51		
<b>Dieléctricas</b>		
<b>Constante de dieléctricidad</b>	$\epsilon^t_{33}/\epsilon_0$	<b>1850</b>
<b>Electromecánicas</b>		
<b>Constante de carga piezoeléctrica</b>	$d_{33}$	$460 \cdot 10^{-12} m^2/N$
<b>Constante de tensión piezoeléctrica</b>	$g_{33}$	$27 \cdot 10^{-3} Vm/N$
<b>Físicas</b>		
<b>Densidad</b>	$\rho$	$7,8 \cdot 10^{-3} kg/N$
<b>Conformidad elástica</b>	$S^T_{33}$	$19 \cdot 10^{12} m^2/N$
<b>Diámetro</b>	$d$	<b>0,03m</b>
<b>Espesor</b>	$t$	<b>0,001m</b>
<b>Temperatura de Curie</b>	$T_c$	<b>340°</b>

Fuente: Noliac\_ceramic materials (2022)

Con el piezoeléctrico PZT ya seleccionado y sus prioridades conocidas, procediendo a los cálculos teóricos basados en el marco teórico para poder caracterizar el comportamiento del

transductor y crear un modelo viable y que se pueda utilizar en el sistema propuesto. El voltaje pico, o la amplitud de la señal generada por el piezoeléctrico viene determinada por la ecuación:

$$V = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{t}{d^2} \cdot g_{33} \cdot F$$

Donde:

**t**: es el espesor del PZT.

**d**: su diámetro.

**g<sub>33</sub>**: La constante de voltaje piezoeléctrica.

**F**: la fuerza aplicada.

Sustituyendo los valores por las características del PZT NCE51 y dejando el voltaje en función de la fuerza, Donde V<sub>PZT</sub> es la tensión entregada por un piezoeléctrico y se expresa en voltios y F en Newton.

$$V_{PZT} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,001}{0,03^2} \cdot 27 \cdot 10^{-3} \cdot F$$

$$V_{PZT} = 0,038 \cdot F$$

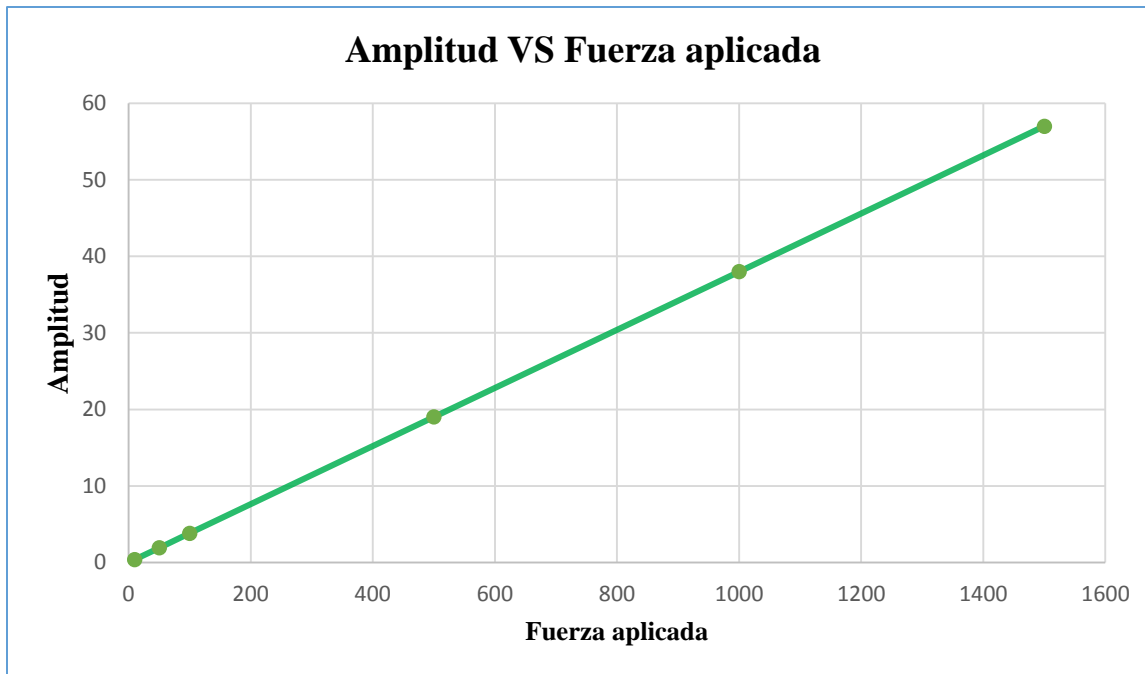
Como es posible observar, la amplitud de la señal tiene una relación lineal con la fuerza aplicada sobre el PZT, tal y como se muestra en la tabla 9:

**Tabla 9:** Voltaje pico frente según la fuerza aplicada para piezoeléctrico NCE51 (datos teóricos)

Fuerza aplicada (N)	Amplitud (V)
10	0,38
50	1,9
100	3,8
500	57
1000	38
1500	57

**Fuente:** Flores Darwin, López Víctor (2023)

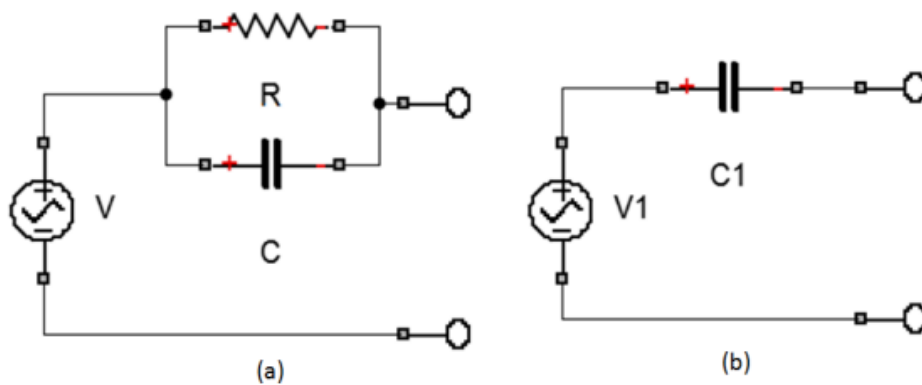
De la cual se obtiene el siguiente gráfico, ver gráfico 2:



**Gráfico 2:** Voltaje pico frente a la tensión aplicada para un PZT NCE51

**Fuente:** Flores Darwin, López Víctor (2023)

El voltaje máximo que entregado por el PTZ en un circuito abierto no depende de la frecuencia a la que se trabaje, y el voltaje pico no es suficiente para definir cómo será la señal, para eso es necesario modelar un circuito equivalente y asumiendo que todos los casos estudios los trabajaremos con frecuencias bajas, el circuito equivalente utilizado será el siguiente (Ver figura 11):



**Figura 11:** Circuito equivalente simplificado

**Fuente:** Flores Darwin, López Víctor (2023)

Como se puede apreciar en la figura 11 el circuito equivalente queda muy simplificado para bajas frecuencias. En el caso de (a) se muestra el circuito con una resistencia acompañada de un

condensador en paralelo entre sí, pero debido al escaso valor de R, se puede simplificar todavía más como se muestra en la parte (b). Dada la naturaleza a estudiar, y teniendo en cuenta que las frecuencias en las que se trabajara serán por lo general bajas, (en ningún caso superior a los 20Hz) el circuito equivalente utilizado en las simulaciones será el más recudido (figura b).

Es necesario por su parte calcular el valor del condensador equivalente, que también dependerá de la frecuencia, nuevamente para frecuencias bajas tendrá un valor según la siguiente ecuación. sustituyendo los valores se obtiene:

$$C_{PZT} = \frac{4}{\pi} \cdot K_3^T \cdot \frac{d^2}{t}$$

$$C_{PZT} = \frac{4}{\pi} \cdot 1850 \cdot \frac{0.03^2}{0.001} = 18.8nf$$

#### **4.4 Diseño y Simulación del Acumulador Vibracional Piezoeléctrico.**

Ya con todos los datos obtenidos de la zona de estudio se procedió a realizar el diseño y simulación del acumulador de energía vibracional piezoeléctrico.

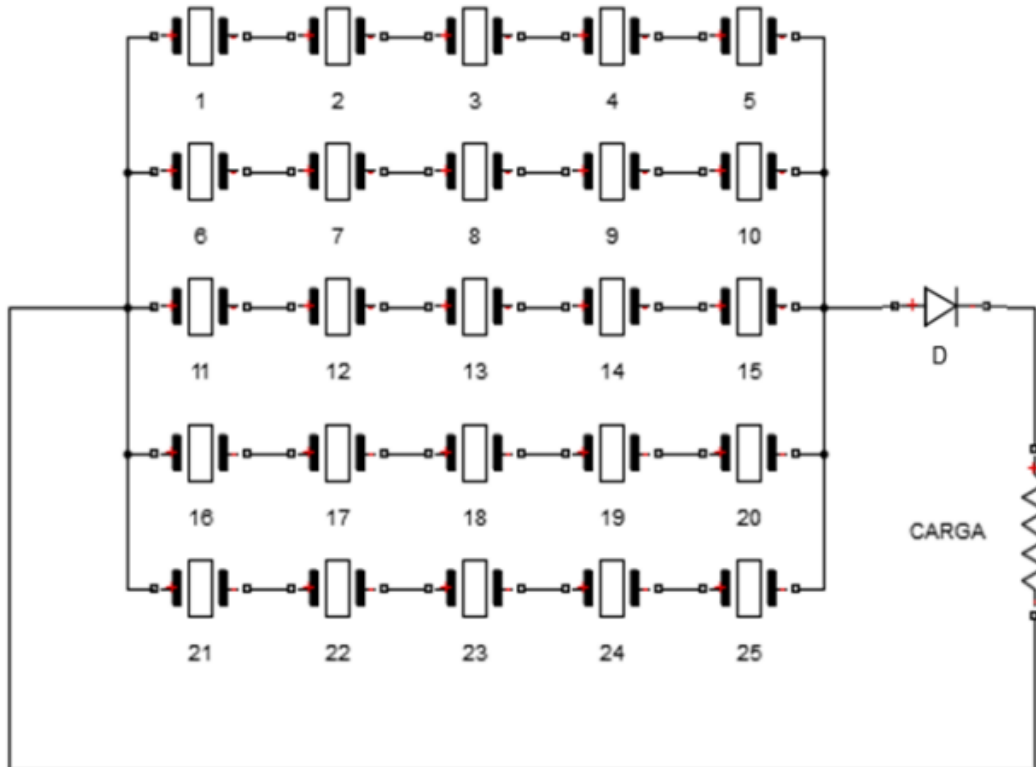
##### **4.4.1 Configuración de Conexiones del Piezoeléctrico PTZ**

Debido a la naturaleza de los sistemas de “Energy Harvesting”, aparece la necesidad de poder modelar la onda obtenida por el PZT para poder utilizar la energía de la forma deseada. Dado que no es posible cambiar la amplitud y frecuencia entregadas por el piezoeléctrico, ya sea utilizando otro modelo de piezoeléctrico, o cambiando dos parámetros, fuerza y frecuencia, será necesario crear los mecanismos pertinentes para reutilizar esta energía La potencia generada por los PZTs generalmente es del orden  $\mu W$ , y por lo tanto se utilizara para alimentar pequeñas cargas, para poder alimentar estas cargas se debe adecuar la energía obtenida por el transductor a la forma más conveniente para ser utilizada la cual es una corriente continua que se pueda tanto almacenar como utilizar en las cargas que se conecten a los generadores.

Para adecuar el voltaje al requerido se tomarán en cuenta dos factores fundamentales los cuales son: la presión que será ejercida sobre el material piezoeléctrico que está determinada por el sistema externo. La cual determinara la tensión unitaria de cada transductor en cada uno de sus pulsos si esta tensión es menor a la que se requiere para poder alimentar una carga a la salida, para adecuar la señal será necesario conectar varios de ellos en serie. Para seguir con el estudio utilizaremos dos casos en los que con los mismos transductores y en función de las condiciones

del sistema se conectan de en serie o en paralelo para poder cumplir con los requerimientos del sistema.

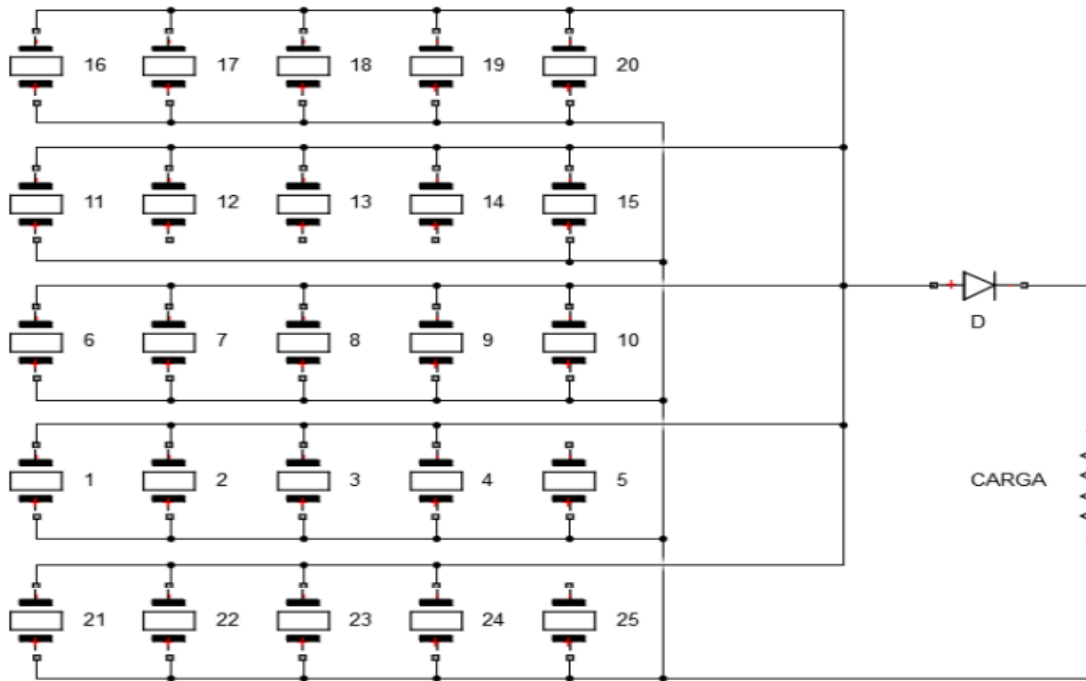
En el primer caso tendremos una Alimentación de una carga cuyo voltaje deba ser mayor al generado unitariamente por el piezoeléctrico en las condiciones del sistema. Un ejemplo podría ser una batería de 12V a alimentar por la malla piezoeléctrica, que debido a la presión aplicada genera de 3V en cada uno de los transductores



**Figura 12:** 25 Piezoeléctricos colocados en 5 series de 5

**Fuente:** Flores Darwin, López Víctor (2023)

Partiendo de la misma batería que en el caso uno, de 12V a ser cargada por el mismo número de piezoeléctricos, pero con una mayor excitación del exterior, (como ejemplo una tensión aplicada 5 veces mayor que en el caso 1). De esa manera no sería necesario subir la tensión entregada por los mismos, ya que en este caso cada piezoeléctrico estaría entregando una tensión de 15V. Por ello estos se podrían conectar en paralelo y obtener la suficiente tensión como para poder alimentar la batería.



**Figura 13:** 25 Piezoeléctricos conectados en 5 series de 5

**Fuente:** Flores Darwin, López Víctor (2023)

Es importante aclarar que estos dos casos son tomados como ejemplos para ser utilizados como referencia a la hora de seleccionar el tipo de circuito necesario para el óptimo funcionamiento del proyecto. Para la generación del modelo equivalente no se utilizará este elemento si no el circuito, equivalente mostrado en la sección anterior.

De los casos observados se pueden obtener las siguientes observaciones, si partimos de la base de que todos los PZT vayan a trabajar al mismo tiempo al tener únicamente un diodo, se estaría utilizando solamente la mitad de la potencia eléctrica generada, desaprovechando la parte negativa de la onda. Para lograr utilizar el impulso completo es necesario colocar un puente rectificador y así lograr aprovechar no solo la parte en la que el material se comprime y genera una diferencia de potencial en una dirección si no también cuando vuelva a su forma original se invierte esa diferencia. Logrando aprovechar al máximo las capacidades de los PZT y obtener el mayor rendimiento posible en el proyecto.

Como se mencionó anteriormente, se parte de la base de que todos los piezoeléctricos trabajan al mismo tiempo, el criterio de esa hipótesis vendrá determinada por condiciones externas al circuito. Por lo tanto, se debe tener en cuenta que, si solo están trabajando algunos de los

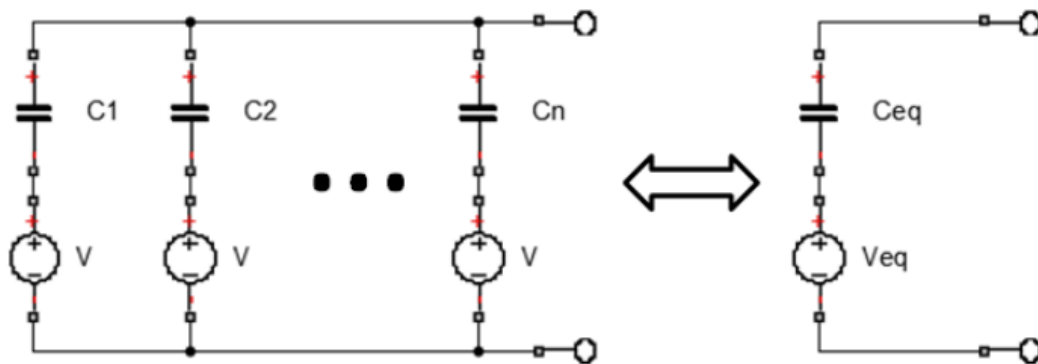
piezoeléctricos, los que no lo estén haciendo pueden ser que inviertan la energía producida por los demás en forma de vibraciones o deformaciones mecánicas. Los casos estudiados en el presente proyecto se consideraron que siempre la carga a alimentar será de baja potencia. Por lo que normalmente se conectarán los piezoeléctricos en paralelo teniendo en cuenta que en la aplicación vial a la cual es dirigida la investigación la fuerza aplicada sobre el piezoeléctrico será lo suficientemente elevada como para no tener que conectar los PZTs en serie y así aumentar la tensión.

Debido al gran número de piezoeléctricos con los que se tendrá que trabajar para obtener las potencias razonables necesarias para su uso energético, se simplificara el modelo de los circuitos con sus equivalentes según el tipo de conexión:

- **Conexión en paralelo:** en caso de que se conecten dos o más transductores en paralelo y considerando la misma fuerza aplicada en todos, la tensión generada será la misma en cada uno de ellos. Para ello tendremos el circuito equivalente para 2 o más condensadores en paralelo será el siguiente:

$$C_{eqp} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

Y el circuito quedara representado de la siguiente forma:



**Figura 14:** Circuito equivalente de n PZTs conectados en paralelo

**Fuente:** Flores Darwin, López Víctor (2023)

Donde:

$V_{eqp} = V$ , y está determinada por la presión aplicada sobre los transductores.

$C_{eqp}$  = El valor viene dado por la expresión  $C_{PZT} = \frac{4}{\pi} \cdot K_3^T \cdot \frac{d^2}{t}$

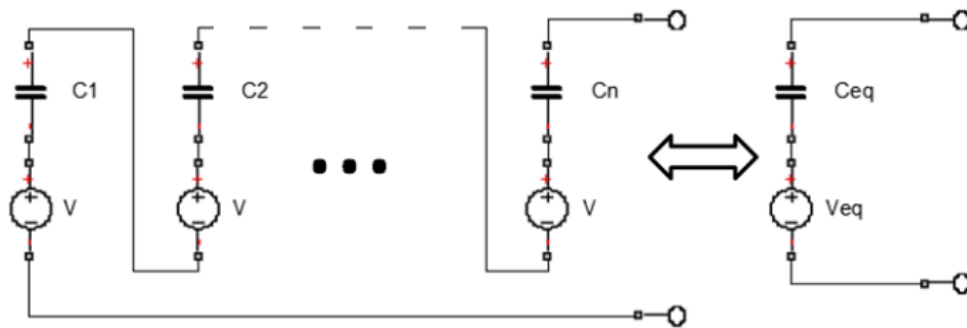
Que para el caso específico del transductor seleccionado NCE51:

$$V = 0,038 \cdot F \text{ y } C_{eqp} = n \cdot CPZT = n \cdot 18,8 \text{ nF}$$

- **Conexión en serie:** en caso de conectar dos o más piezoeléctricos en serie, y nuevamente considerando que la presión aplicada sobre ellos sea la misma, la tensión de salida de cada uno de ellos será igual. Teniendo como resultado que el circuito equivalente en serie para dos o más condensadores queda de la siguiente forma:

$$\frac{1}{C_{eqs}} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Y su circuito equivalente:



**Figura 15:** Circuito equivalente de n PZT conectados en serie

**Fuente:** Flores Darwin, López Víctor (2023)

Dónde:

$$V_{eqs} = V1 + V2 + \dots + Vn$$

$$C_{eqs} = \text{Su valor será determinado por la expresión } C_{PZT} = \frac{4}{\pi} \cdot K_3^T \cdot \frac{d^2}{t}$$

Que en el caso del PZT del estudio también se puede sustituir por:

$$V_{eqs} = 0,038 \cdot n \cdot F$$

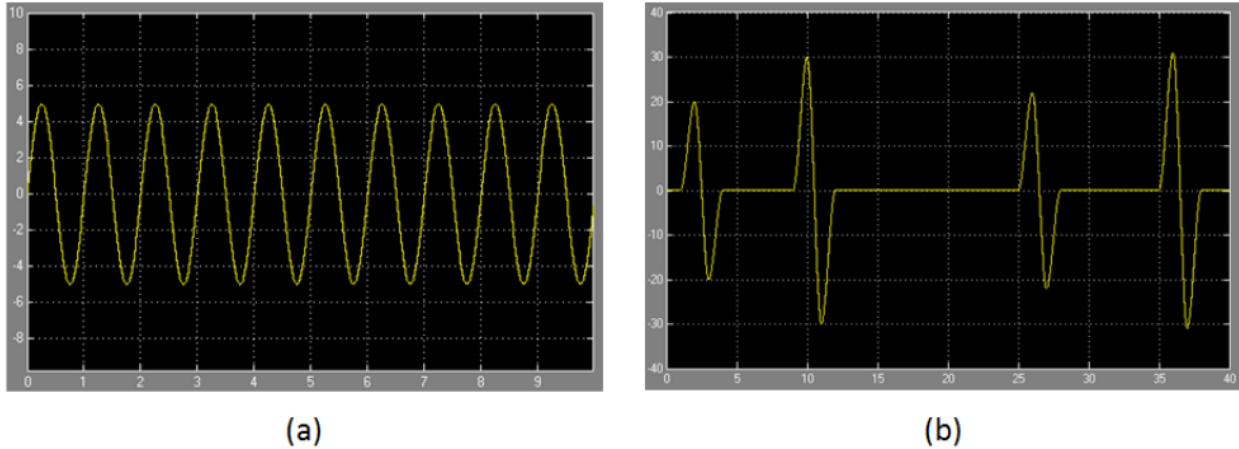
Y dado que el valor de  $C_{PZT}$  es el mismo para todos los transductores.

$$C_{eqs} = C_{ptz}/n = 18,8/n \text{ nf, siendo n el número de transductores.}$$

#### 4.4.2 Modelado del Circuito de Carga

Para finalizar el último paso es adecuar la energía que se obtiene a través de los materiales piezoeléctricos en forma de pulsos o corriente alterna muy variable, con cambios en la amplitud e incluso en la frecuencia, es transformarla en una corriente continua apta para su uso, comenzamos con la señal del piezoeléctrico independientemente que este sea uno solo o varios conectados según

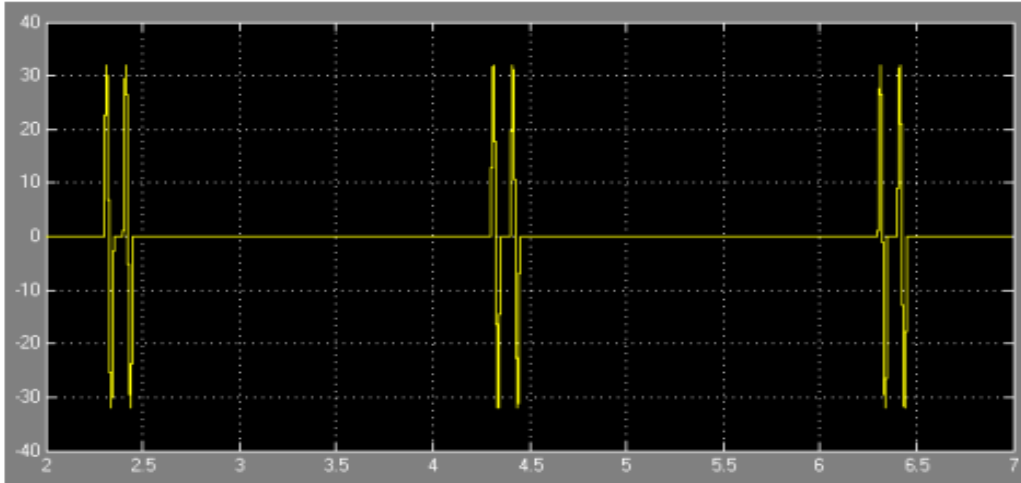
lo expuesto anteriormente, y cuyo circuito equivalente concuerda con el explicado en el apartado anterior. Las formas de las ondas dependerán de las propiedades del sistema externo, tanto de la fuerza de aplicación, como de la frecuencia. Otro aspecto que va a influir son las propiedades del piezoeléctrico PZT. Como podemos observar en la figura 16 tenemos dos ejemplos de ondas diferentes, ambas en un mismo piezoeléctrico aplicando diferentes sistemas de excitación.



**Figura 16:** Señales producidas por los PZTs, (a) Señal continua, (b) Señal de pulsos

**Fuente:** Flores Darwin, López Víctor (2023)

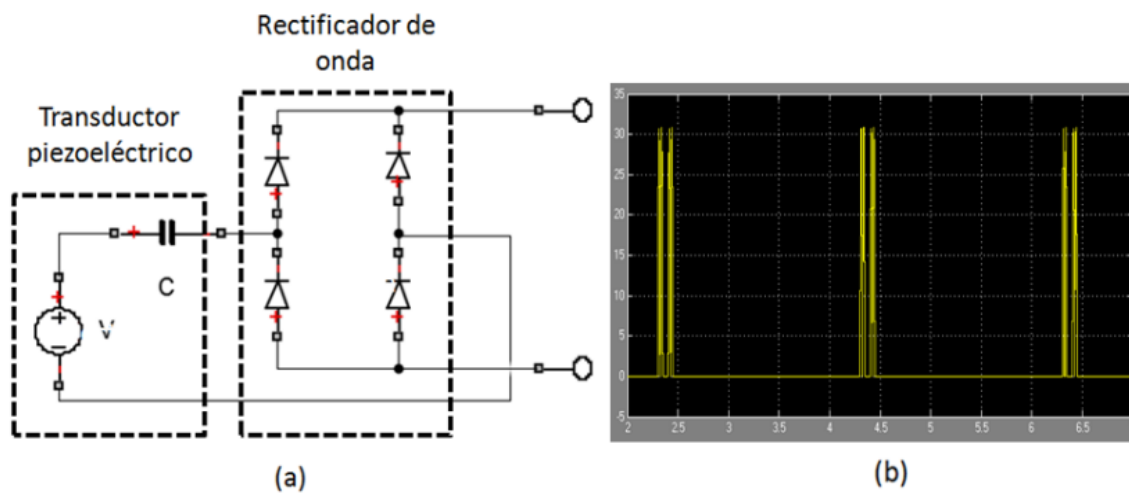
En la figura (a) podemos observar una señal contante, que puede ser generada por vibraciones o bien un efecto producido por una persona al caminar a ritmo constante, lo indiscutible es que, aunque en la figura no se estimen grandes diferencias la amplitud de la señal no será siempre completamente constante. Por otro lado, en la figura (b) tenemos un sistema discreto, en donde la señal está determinada por impulsos, cambiando tanto de amplitud como de frecuencia. Esta segunda será parecida a la que se deberá obtener a la hora de colocar los piezoeléctricos en la carretera y pasen los distintos vehículos sobre el mismo. Para estudiar los componentes eléctricos que completarán al circuito eléctrico, se partirá de una onda equivalente a vehículos circulando cada cuatro segundos sobre el mismo piezoeléctrico.



**Figura 17:** Onda generada por un piezoeléctrico al paso de vehículos a 20 km/h cada 4 segundos.

**Fuente:** Flores Darwin, López Víctor (2023)

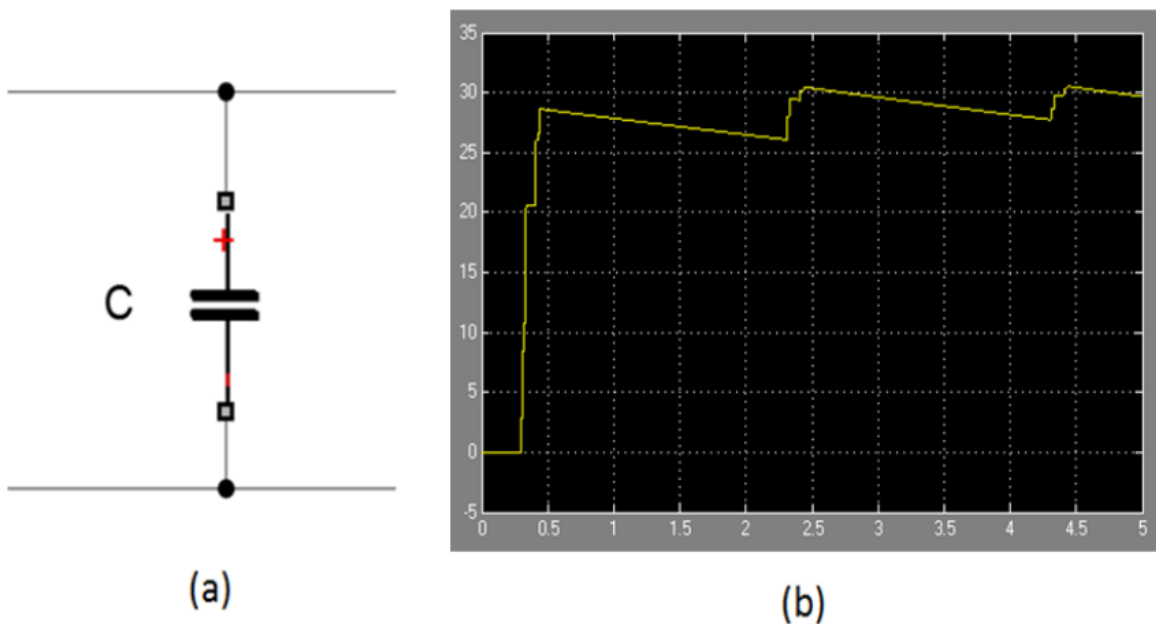
Más adelante a la hora de aplicarlo directamente a las aplicaciones viales se detallarán las propiedades del sistema a medir, de momento se utilizará este modelo como base para el diseño del circuito eléctrico de “energy harvesting” propuesto. Como se puede observar en la figura 17 la corriente que sale de piezoeléctrico es de onda compleja. Para poder reutilizar la energía el primer paso una vez se haya reducido el efecto piezoeléctrico, será rectificar dicha onda con un puente rectificador de diodos.



**Figura 18:** Modelo con onda rectificada

**Fuente:** Flores Darwin, López Víctor (2023)

Como podemos observar en la figura 18 (a) el circuito equivalente con el piezoeléctrico y el rectificador de onda. En (b) aparece la onda rectificada, Se puede apreciar que se produce una ligera caída de potencial en los diodos del puente rectificador. De igual forma es importante mencionar que la fuente de alimentación podría ser tanto un único transductor, como varios colocados ya sea en serie o en paralelo. Aunque los PZTs estén conectados en series de 5, cada serie llevara un puente rectificador de esta manera evitando que se puedan generar pérdidas debido a que algunos de los piezoeléctricos estén trabajando como sensores y otros actuadores al mismo tiempo. Teniendo la onda rectificada se procede a conectar un condensador para el filtrado como se muestra en la figura 19



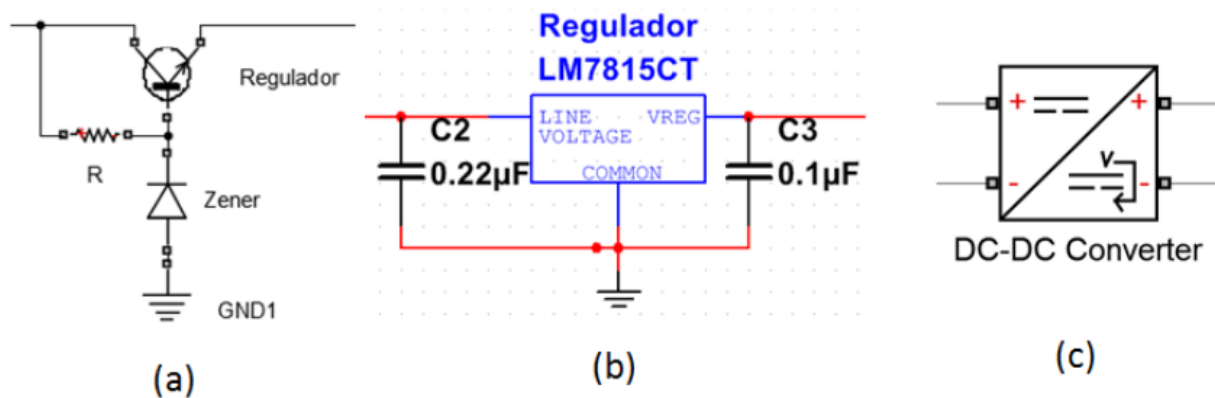
**Figura 19:** Condensador de filtrado Condensador (a), Señal filtrada (b)

**Fuente:** Flores Darwin, López Víctor (2023)

Como se puede apreciar en la figura 19 (B), tenemos la señal filtrada que es la resultante de cuando se carga el condensador conectado en paralelo con los impulsos generados en el piezoeléctrico. En caso de colocar un condensador de mayor capacidad, este tardará más impulsos en cargar, pero tendrá menor rizado. Por el contrario, si la capacidad es menor, este cargará más rápido, pero tendrá también un mayor rizado.

Debido a que la señal generada por los piezoeléctricos es directamente proporcional a la fuerza aplicada, es muy probable que haya una gran variabilidad en la tensión, por ende nuestro

último paso antes de tener la corriente constante que se pretende conseguir con este circuito de carga, es añadir un circuito limitador de tensión que asegure que el sistema no se sobrecargue, debido a la naturaleza de los sistemas de “Energy Harvesting” colocados en las carreteras se pueden dar casos muy variables. Por la misma carretera circulan desde motocicletas o coches ligeros, hasta vehículos pesados como autobuses o camiones. Requiriendo de esta forma del circuito limitador de tensión ya que puede tanto mejorar la calidad de la señal como evitar posibles sobretensiones en la carga. Aunque este paso en algunas ocasiones no es necesario, si se considera de importancia en este trabajo.

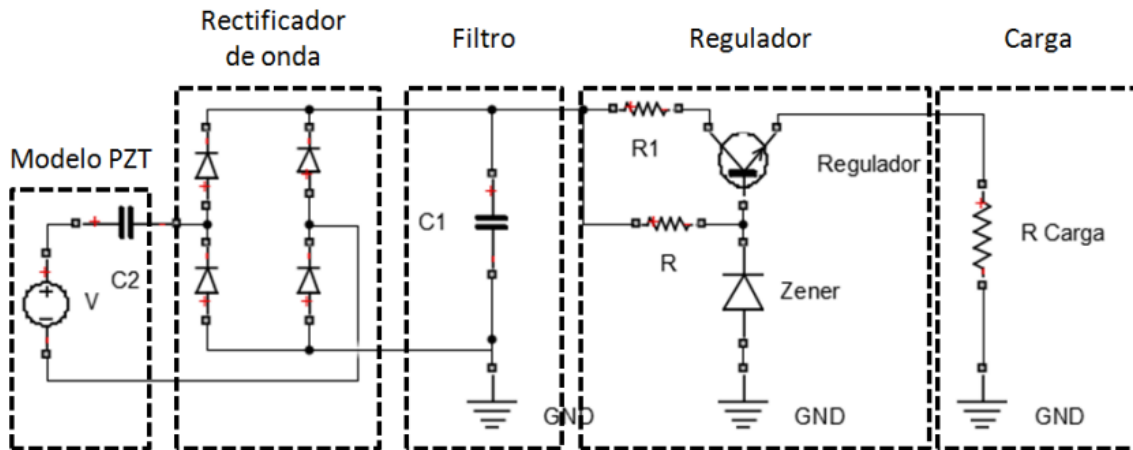


**Figura 20:** Modelos de regulador de tensión.

**Fuente:** Flores Darwin, López Víctor (2023)

En la figura 20 se logra apreciar tres ejemplos de regulador de tensión; (a) es un regulador simple con diodo Zener, modelado en Simulink, (b) Modelo del regulador LMT7815CT y (c) Modelo genérico de regulador de Simulink.

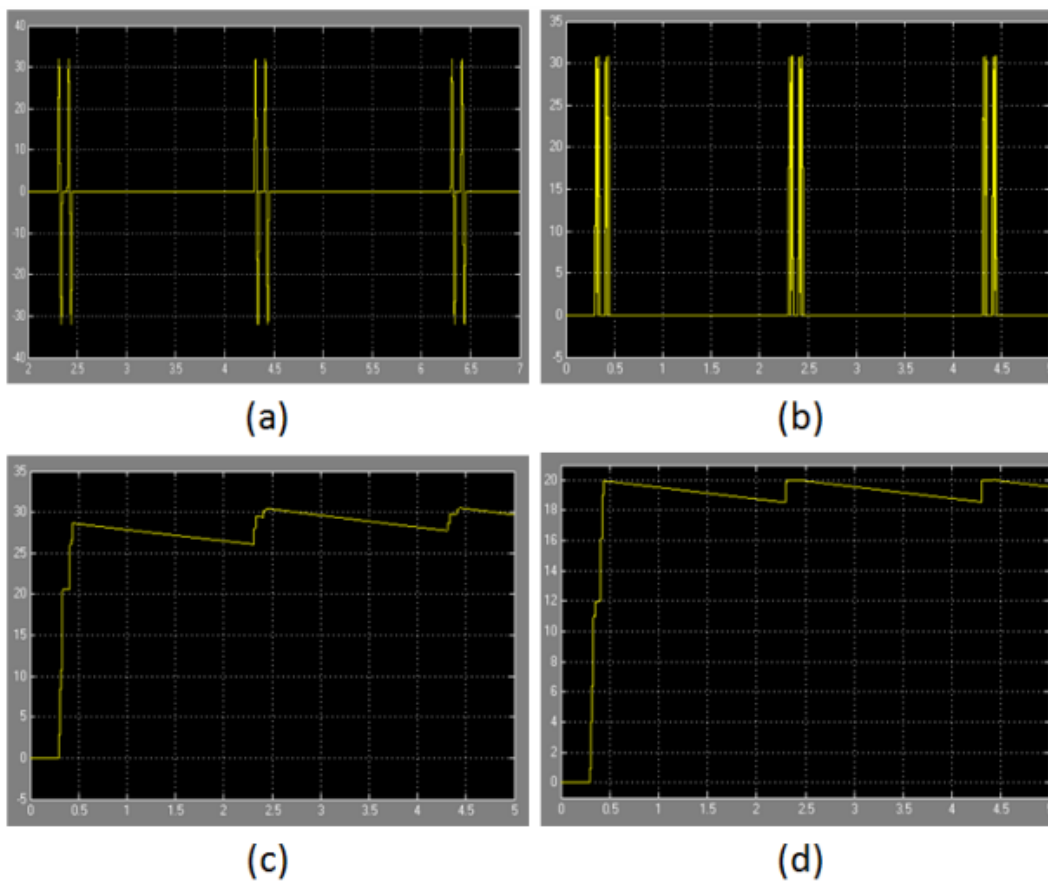
Finalmente, luego de completar todos los pasos pertinentes el modelo del circuito completo quedaría así, ver figura 21:



**Figura 21:** Circuito de carga simple completo

**Fuente:** Flores Darwin, López Víctor (2023)

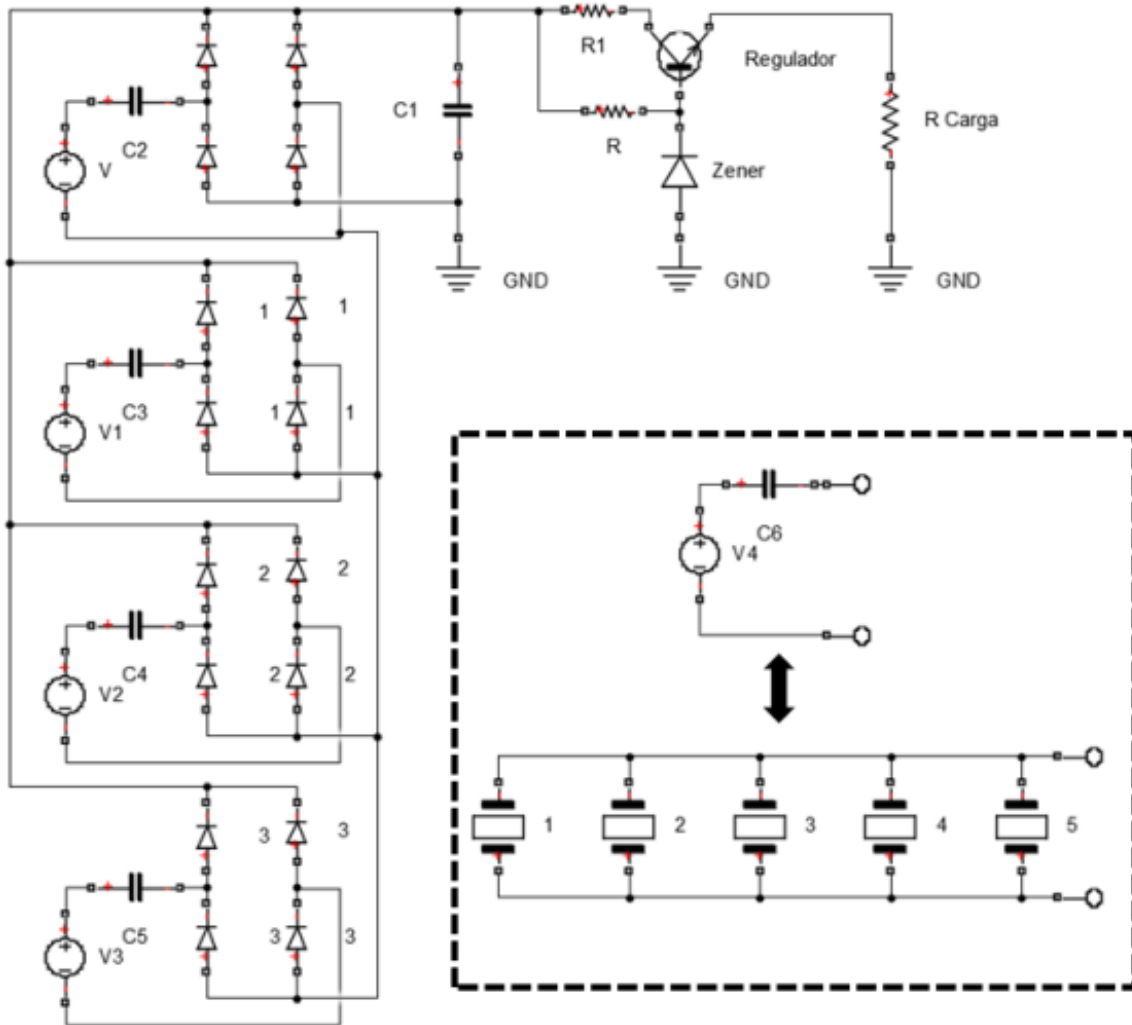
En la figura 22 se observar la evolución de la onda según el bloque:



**Figura 22:** Evolución de la forma de onda de impulsos según bloques del circuito

**Fuente:** Flores Darwin, López Víctor (2023)

Cabe mencionar que, en el circuito equivalente simple, se ha colocado un único piezoeléctrico, esto es debido a que, aunque se cambie esa fuente, el resto de elementos quedarán constantes. Al colocar varios piezoeléctricos en serie, o incluso en varias series, el circuito sería más parecido al que se presenta en la siguiente figura 23.



**Figura 23:** Circuito con 4 PZTs conectados en paralelo

Fuente: Flores Darwin, López Víctor (2023)

Cada fuente puede representar una conexión de PZTs en paralelo como se muestra en la figura. Ya se conoce como es el modelo genérico que describe el circuito de carga que se plantea en el proyecto. La cantidad de Piezoeléctricos a utilizar para generar la energía eléctrica necesaria, su disposición final y la potencia que estos entreguen será determinada por la naturaleza de caso

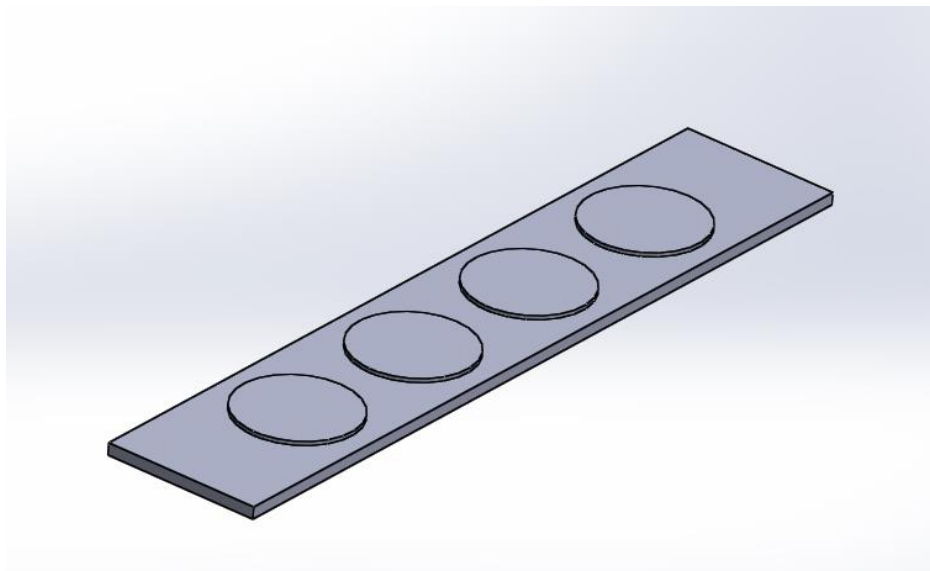
estudio referente a la aplicación vial que se le dará a este proyecto el cual es abastecer de energía eléctrica la autopista regional del centro desde el peaje de Guacara hasta el sector de San Joaquín.

#### 4.4.3 Colocación de los Piezoeléctricos PZTs

Debido a la naturaleza del estudio, será necesario hacer algunas suposiciones del soporte en el que se encontrarán montados los PZTs. Para ello se hace un breve diseño de unos paneles tipo “sándwich”, que se puedan montar fácilmente y que lleven los transductores en su interior. Con las dimensiones del piezoeléctrico a estudio, que tiene un diámetro de 3cm, se proponen distintas opciones para optimizar el rendimiento de los transductores.

##### 4.4.3.1 Conexión en paralelo de 4 PZTs:

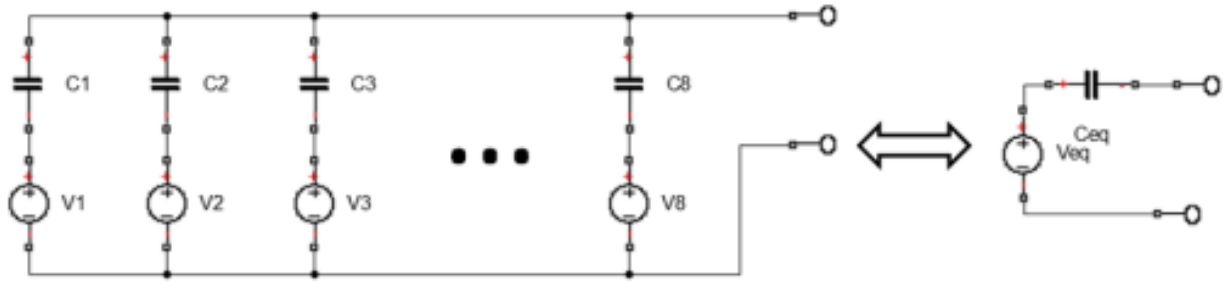
En la presente propuesta, se pretende concentrar la energía producida, para ello se proponen paneles de menor tamaño que solo contengan cuatro piezoeléctricos por cada “Sándwich”. Además, se optimiza el diseño para poder colocar mayor densidad de piezoeléctricos lineales en la carretera. El diseño de este caso es como se muestra a continuación:



**Figura 24:** Panel tipo "Sándwich" para montaje de 4 PZTs

**Fuente:** Flores Darwin, López Víctor (2023)

Se diseñó lo suficientemente ancho como para poder albergar el ancho de una rueda, teniendo en cuenta que habrá que colocar más número de paneles, El circuito eléctrico equivalente en este caso será como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 25:** Circuito equivalente baldosa de 4 PZTs en paralelo.

**Fuente:** Flores Darwin, López Víctor (2023)

Donde los valores de  $V_{eq2}$  y  $C_{eq2}$  son según sus equivalentes:

$$V_{eq2} = V_1 = V_2 = V_3 = \dots$$

$$C_{eq} = 4C_{PTZ} = 75.2nF$$

Al pasar el vehículo sobre las placas, cada neumático genera una tensión equivalente a la cuarta parte del peso del vehículo sobre cada placa, luego los 3,43 kN calculados en la fórmula mostrada a continuación, se aplican sobre 4 transductores quedando resultante la siguiente fuerza por cada uno de ellos:

$$F_{PZT} = \frac{3,43KN}{4} = 858N$$

$$V_{PTZ} = V_{eq3} = 0,038 * F = 32.58v$$

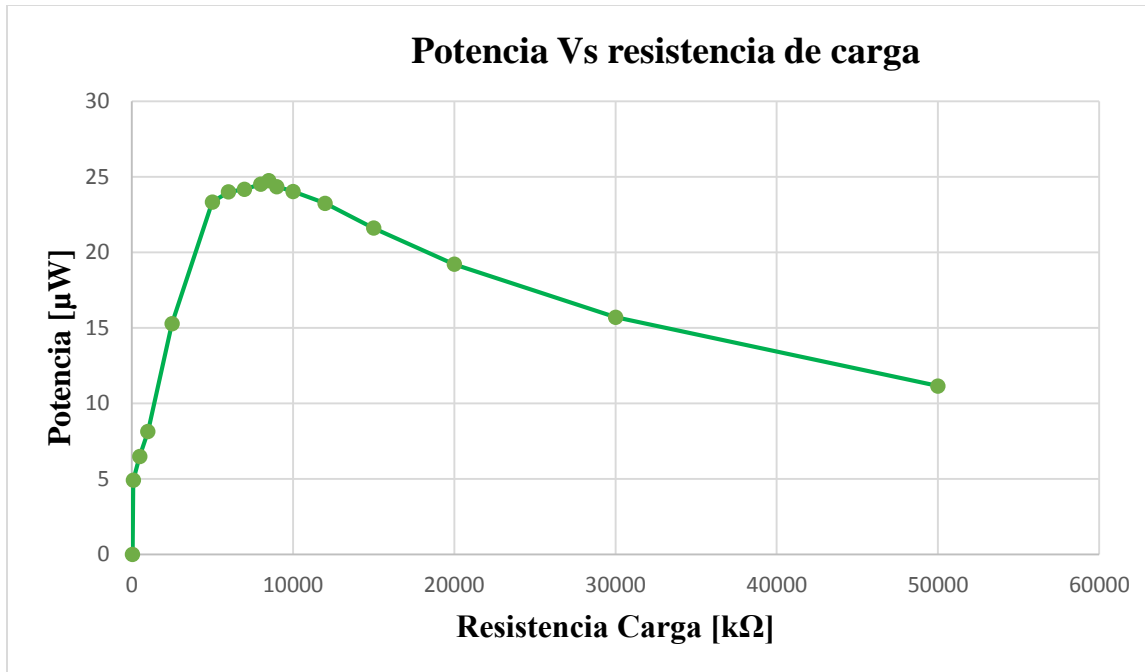
Se simula para obtener los valores de la potencia frente a la resistencia de carga:

**Tabla 10:** Valores obtenidos en modelo de 4 PZTs en paralelo con distintas cargas, (condiciones exteriores de un vehículo ligero cada 5 segundos)

<b>Resistencia Carga</b> [kΩ]	<b>Corriente</b> [μA]	<b>Tensión</b> [V]	<b>Potencia</b> [μW]
50	0,20	0,01	0,00
100	7,00	0,70	4,90
500	3,60	1,80	6,48
1000	2,85	2,85	8,12
2500	2,47	6,18	15,28
5000	2,16	10,80	23,33
6000	2,00	12,00	24,00
7000	1,86	13,01	24,18
8000	1,75	14,00	24,50
8500	1,71	14,50	24,74
9000	1,64	14,80	24,34
10000	1,55	15,50	24,03
12000	1,39	16,70	23,24
15000	1,20	18,00	21,60
20000	0,98	19,60	19,21
30000	0,72	21,70	15,70
50000	0,47	23,60	11,14

**Fuente:** Flores Darwin, López Víctor (2023)

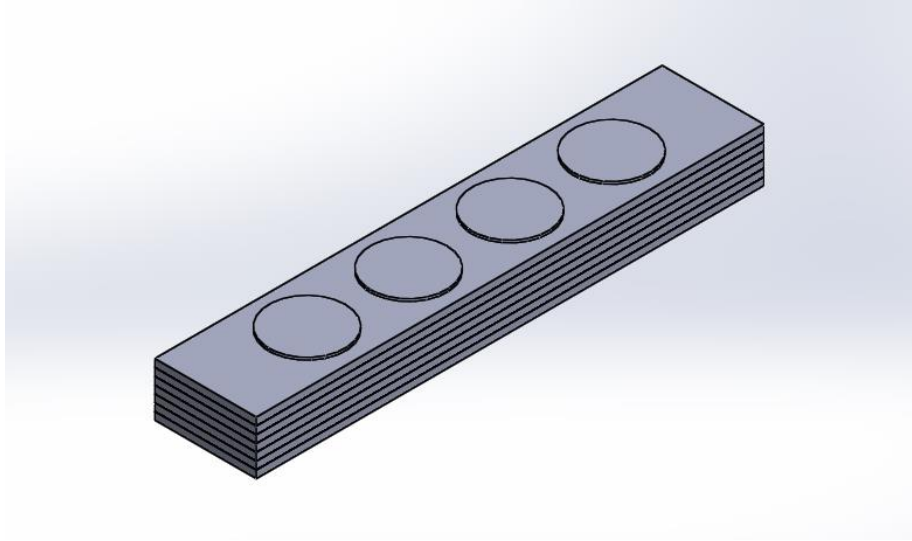
La curva de potencia se muestra en el gráfico 3:



**Gráfico 3:** Gráfica de potencia entregada para modelo de 4 PZTs en paralelo

**Fuente:** Flores Darwin, López Víctor (2023)

Como se pudo apreciar en este caso entrega una potencia máxima de  $24,74 \mu\text{W}$  maximizando la potencia, no obstante, con los niveles de potencia que entrega cada una de las baldosas, las longitudes que se deberían cubrir en la carretera serán extremadamente elevadas, teniendo que para obtener un solo vatio de potencia sería necesario usar 800 metros de carril. Haciendo la solución inviable. Debido a esto se plantea aumentar de forma considerable la densidad del piezoeléctrico bajo las bandas de rodadura. Colocando más capas de piezoeléctricos bajo las bandas de rodadura, para poder de esta forma reducir de forma considerable la longitud mínima para aumentar una carga, y poder de esta forma diseñar un modelo viable. Es por ello que se propone generar 30 capas sobre la estructura de igual planta que el caso expuesto, en el que todos los piezoeléctricos estén conectados en paralelo, siendo la resultante el modelo de la figura 26:



**Figura 26:** Modelo de 30 capas propuesto para reducir de forma considerable la longitud mínima para aumentar una carga.

**Fuente:** Flores Darwin, López Víctor (2023)

Las 30 capas son capaces de albergar 120 PZTs, se calcula el circuito equivalente de la placa:

$$C_{eq4} = 120C_{pzt} = 2,256\mu F$$

Dado que la superficie de contacto, sigue siendo la misma que en el caso anterior, se mantiene el dato ya calculado:

$$V_{PTZ} = V_{eq3} = 0,038 \cdot F = 32.58v$$

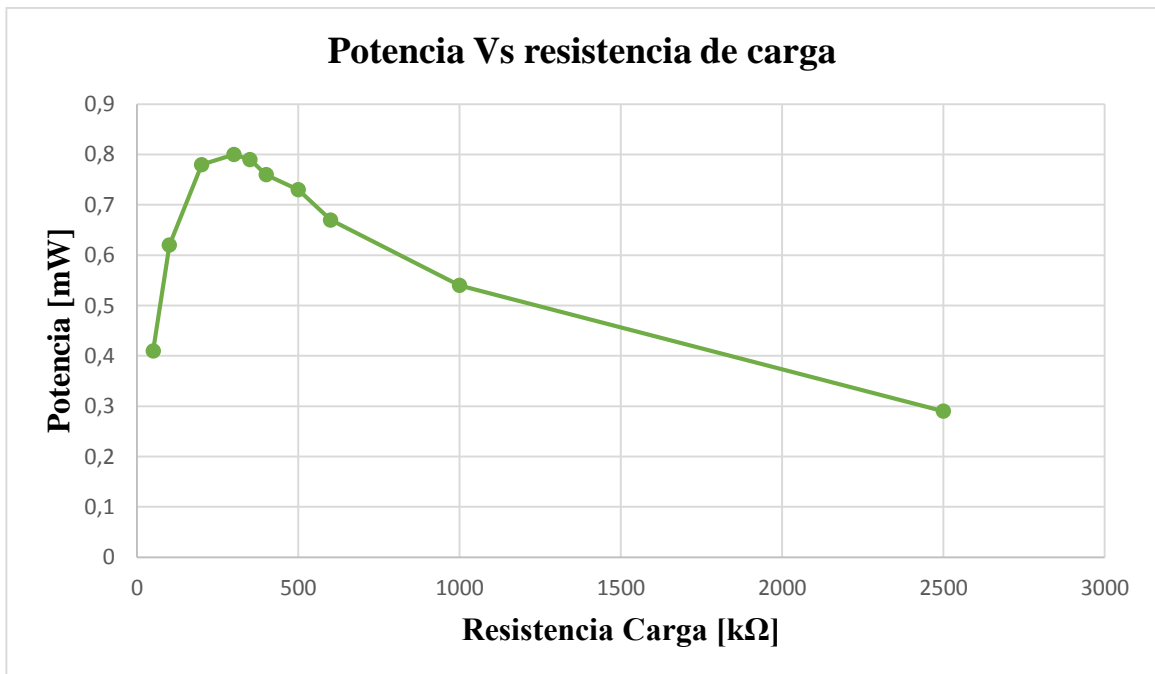
Con estos datos se construye el circuito equivalente de la baldosa en Simulink y se realizan las simulaciones para obtener la máxima potencia entregada por la baldosa, teniendo en cuenta las mismas condiciones del caso anterior.

**Tabla 11:** Valores obtenidos en modelo de 120 PZTs en paralelo con distintas cargas, (condiciones exteriores de un vehículo ligero cada 5 segundos)

Resistencia Carga [kΩ]	Corriente [μA]	Tensión [V]	Potencia [mW]
50	91	4,55	0,41
100	79,00	7,90	0,62
200	62,25	12,45	0,78
300	51,50	15,45	0,80
350	47,43	16,50	0,79
400	43,74	17,50	0,76
500	38,20	19,10	0,73
600	33,33	20,00	0,67
1000	23,24	23,24	0,54
2500	10,68	26,70	0,29

Fuente: Flores Darwin, López Víctor (2023)

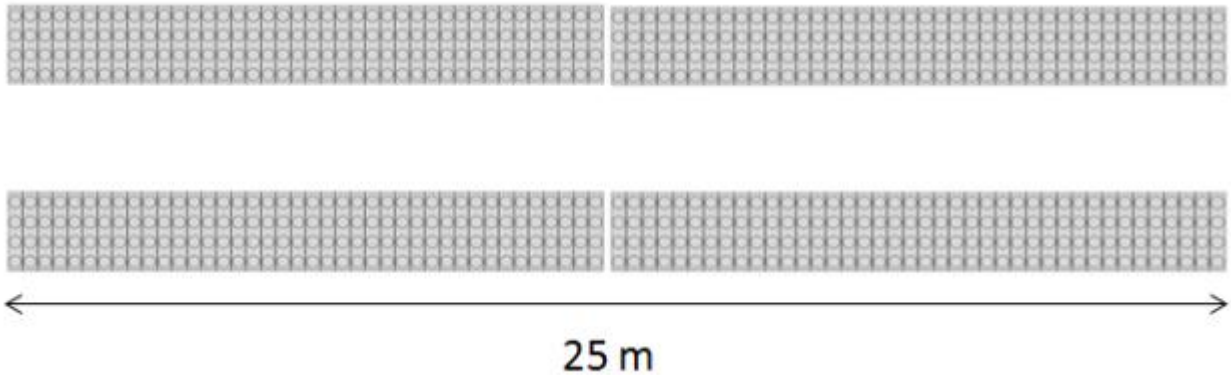
Cuya gráfica de potencia resultante queda de la siguiente forma:



**Gráfico 4:** Potencia vs Resistencia de Carga

Fuente: Flores Darwin, López Víctor (2023)

Se puede apreciar en este caso que cada baldosa podría llegar a generar una potencia máxima de  $0,8 \text{ mW}$ . Tomando en cuenta su reducido tamaño y la baja potencia que entrega una sola baldosa, es poco productivo que estas se monten por separado, por ello se plantea formar un módulo de 25 m, constituida por dos railes de 625 baldosas en cada uno de los módulos. Colocándolos uno seguido del otro como se muestra a continuación:



**Figura 27:** Colocación de módulos formados por piezoeléctricos en filas de 625 baldosas bajo las bandas de rodadura.

**Fuente:** Flores Darwin, López Víctor (2023)

Para el cálculo del circuito equivalente, se tiene que tener en consideración que no todos los PZTs trabajan al mismo tiempo, pero trabajan consecutivamente hasta que el vehículo abandona la fila generadora. El valor de  $C_{eq}$ , (a la que se llamará  $C_{mod}$ ), será por tanto el que viene dado por las cuatro baldosas que trabajarán al mismo tiempo cada una de ellas con su respectiva rueda. Por ello corresponde al paralelo de cuatro baldosas:

$$C_{mod} = 4C_{eq4} = 9,924\mu F$$

Por otro lado, el valor de la amplitud de la señal será determinada por el peso del vehículo que presione sobre las baldosas, este valor se calculará para cada caso. Finalmente, el circuito se modelará con el equivalente de la baldosa, y alargando el tiempo de generación de pulsos tanto como dure la carga sobre el módulo. Es decir, el tiempo que pase sobre la fila de transductores, considerando que solamente cuatro baldosas trabajaran al tiempo, una por cada rueda.

#### 4.4.3.2 Modelado de Circuito Equivalente

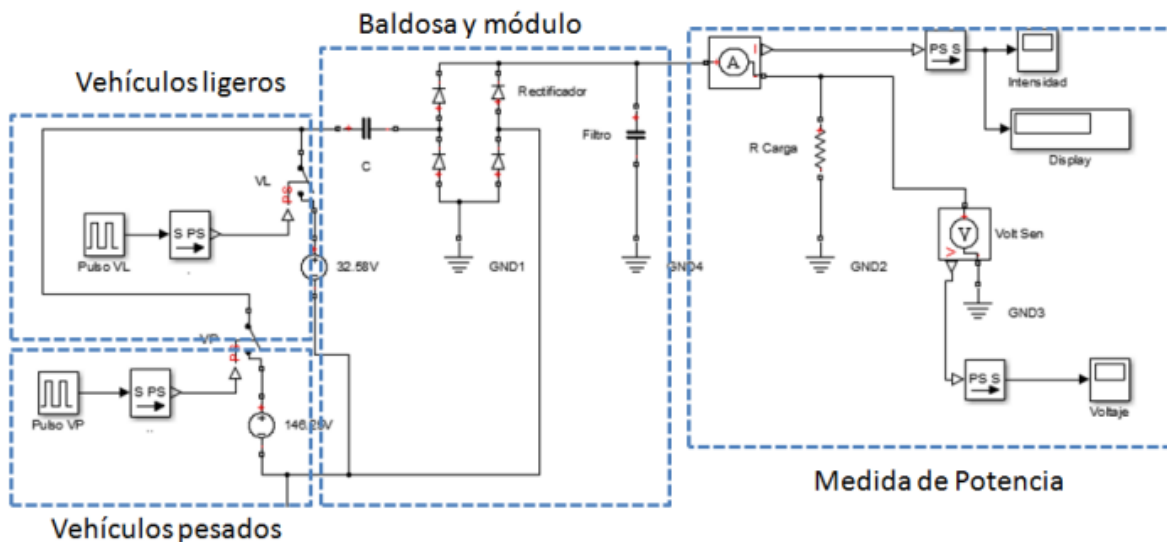
Ya con los datos que se obtuvieron se procedió con la creación del sistema equivalente del entorno, teniendo en cuenta el tránsito de los vehículos ligeros y pesados, se calculan las condiciones del entorno. Con los datos que se obtuvieron en la primera fase de la investigación se

tiene que, la media de vehículos ligeros es de 3360 vehículos. Esto quiere decir que circulan 2,3 vehículo cada minuto que se traduce a un vehículo cada 30 segundos aproximadamente. Dada la velocidad media de los vehículos ligeros en ese tramo del peaje es de 26m/s, tardará 1 segundo en pasar un módulo de 25 m, luego el pulso generado por la rueda durará ese tiempo.

Para el caso de los vehículos pesados que circulan por la vía se tiene que una cantidad del 25% de los vehículos que circulan son de carga pesada estos circulan con menor frecuencia de igual manera a una velocidad de 25m/s, será el tiempo que cada rueda estará generando. La tensión que genera un vehículo ligero al pasar sobre la placa es de 32,58, dada la linealidad se puede calcular que la tensión generada por un vehículo pesado a partir de la presión ejercida, por tanto:

$$V_{VP} = V_{VL} \cdot \frac{P_{VP}}{P_{VL}} = 32,58V \cdot \frac{0,9}{0,2} = 146,25 V$$

Combinando el paso de los vehículos ligeros y pesados de forma combinada se diseñó el siguiente modelo:

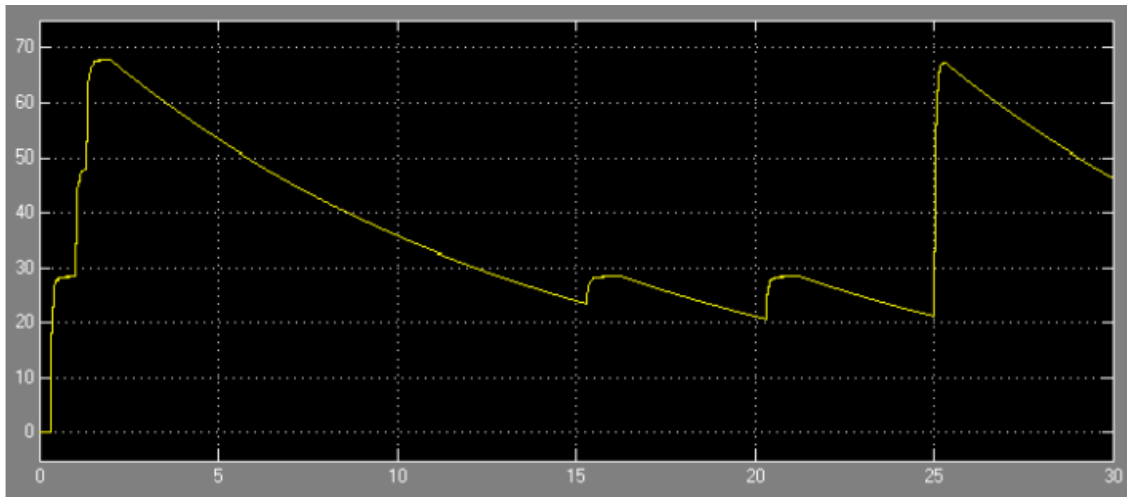


**Figura 28:** Circuito equivalente en condiciones de tráfico normales

**Fuente:** Flores Darwin, López Víctor (2023)

Dónde C tiene el valor calculador para cuatro baldosas trabajando al tiempo. El pulso VL viene determinado por el tiempo de paso de los vehículos pesados, y el valor de V depende del tipo de vehículo que pase por los PZTs.

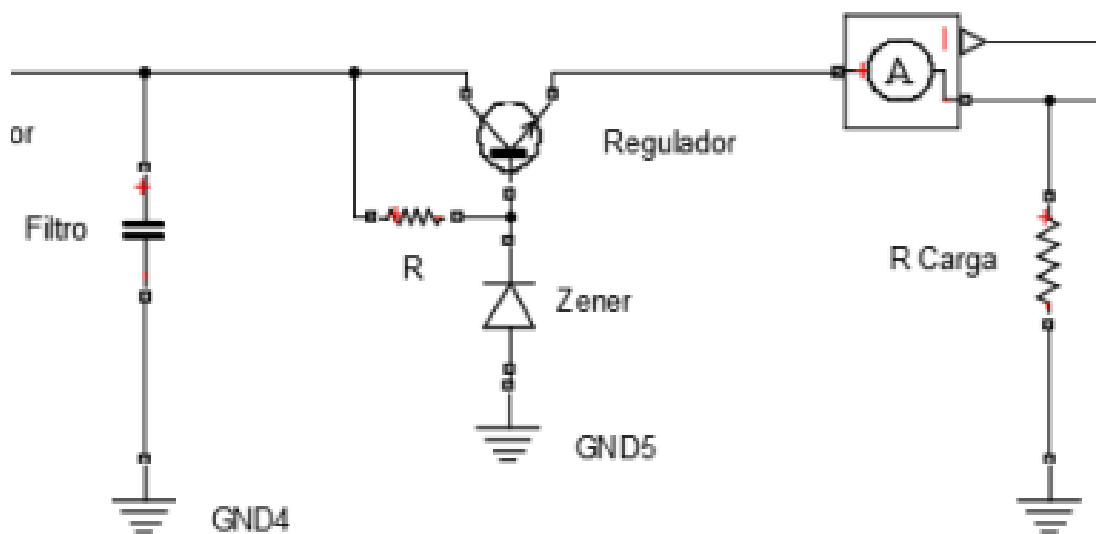
Simulando con los parámetros seleccionados y una resistencia de carga muy grande, se puede ver como al paso de los vehículos pesados, se tiene un gran pico de tensión, lo que puede resultar un riesgo para alguna de las cargas.



**Figura 29:** Tensión en la carga para un módulo en condiciones normales para  $1M\Omega$

**Fuente:** Flores Darwin, López Víctor (2023)

Para evitar este riesgo, se puede colocar un regulador de tensión como el que se muestra en la siguiente figura:



**Figura 30:** Regulador de corriente colocado como protección entre el módulo y la carga.

**Fuente:** Flores Darwin, López Víctor (2023)

Además del regulador de tensión, se cambia el filtro por un condensador de mayor capacidad para conseguir un menor rizado de la señal.

#### 4.4.3.3 Cálculo de potencia por módulo de PZTs

Diseñado el circuito equivalente, ya es posible calcular la potencia. Esta dependerá siempre del número de vehículos que circulen por la vía, así como las características de los mismos, en este

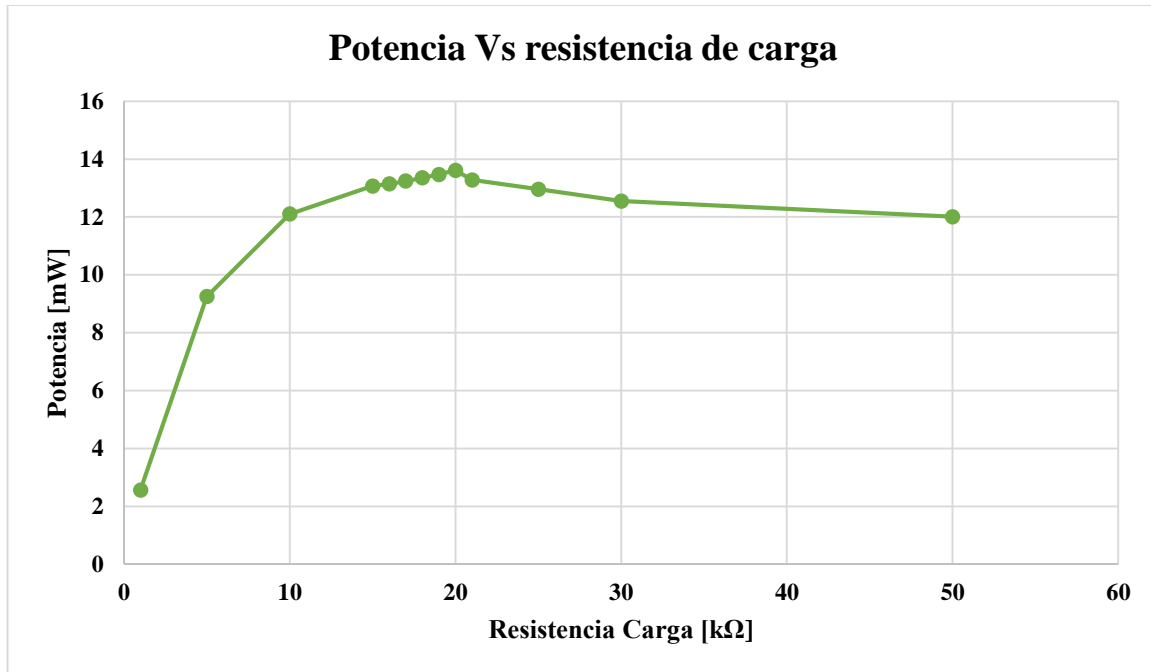
apartado se calculará la potencia obtenida en las condiciones de tráfico medias del sistema a estudio. De igual manera que para los modelos de las baldosas, utilizando la herramienta Matlab-Simulink con el modelo del circuito equivalente Diseñado se procedió a la simulación del paso vehicular suponiendo el paso de los vehículos cada cinco segundos, genera la tabla de potencias entregadas frente a la resistencia de carga:

**Tabla 12:** Valores obtenidos en módulo de 25 metros y un carril de 4 PZTs en paralelo con distintas cargas, (condiciones exteriores de un vehículo ligero cada 5 segundos)

<b>Resistencia Carga</b> <b>[kΩ]</b>	<b>Corriente</b> <b>[μA]</b>	<b>Tensión</b> <b>[V]</b>	<b>Potencia</b> <b>[W]</b>
<b>1</b>	<b>1,60</b>	<b>1,6</b>	<b>2,56</b>
<b>5</b>	<b>1,36</b>	<b>6,8</b>	<b>9,25</b>
<b>10</b>	<b>1,10</b>	<b>11</b>	<b>12,10</b>
<b>15</b>	<b>0,93</b>	<b>14</b>	<b>13,07</b>
<b>16</b>	<b>0,91</b>	<b>14,5</b>	<b>13,14</b>
<b>17</b>	<b>0,88</b>	<b>15</b>	<b>13,24</b>
<b>18</b>	<b>0,86</b>	<b>15,5</b>	<b>13,35</b>
<b>19</b>	<b>0,84</b>	<b>16</b>	<b>13,47</b>
<b>20</b>	<b>0,83</b>	<b>16,5</b>	<b>13,61</b>
<b>21</b>	<b>0,80</b>	<b>16,7</b>	<b>13,28</b>
<b>25</b>	<b>0,72</b>	<b>18</b>	<b>12,96</b>
<b>30</b>	<b>0,65</b>	<b>19,4</b>	<b>12,55</b>
<b>50</b>	<b>0,49</b>	<b>24,50</b>	<b>12,01</b>

Fuente: Flores Darwin, López Víctor (2023)

Cuya curva se muestra a continuación:



**Grafico 5:** Curva de potencia para un módulo de PZTs en condiciones de tráfico normales.

**Fuente:** Flores Darwin, López Víctor (2023)

De la siguiente curva, se puede apreciar en condiciones de tráfico normales y en una carretera altamente transitada, como el diseño propuesto se podría llegar a generar hasta 14 Watts por modulo. Es importante tener en cuenta que esta potencia instantánea está calculada a partir de la media, es decir, que no tienen en cuenta el efecto estacional, los días festivos ni la hora. Por ello se supone que la generación de energía diaria por módulo asciende a los 336Wh independientemente del momento en que se genere.

#### 4.4.5 Aplicación del Generador de Energía Vibracional Piezoeléctrico en el Sistema de Alumbrado

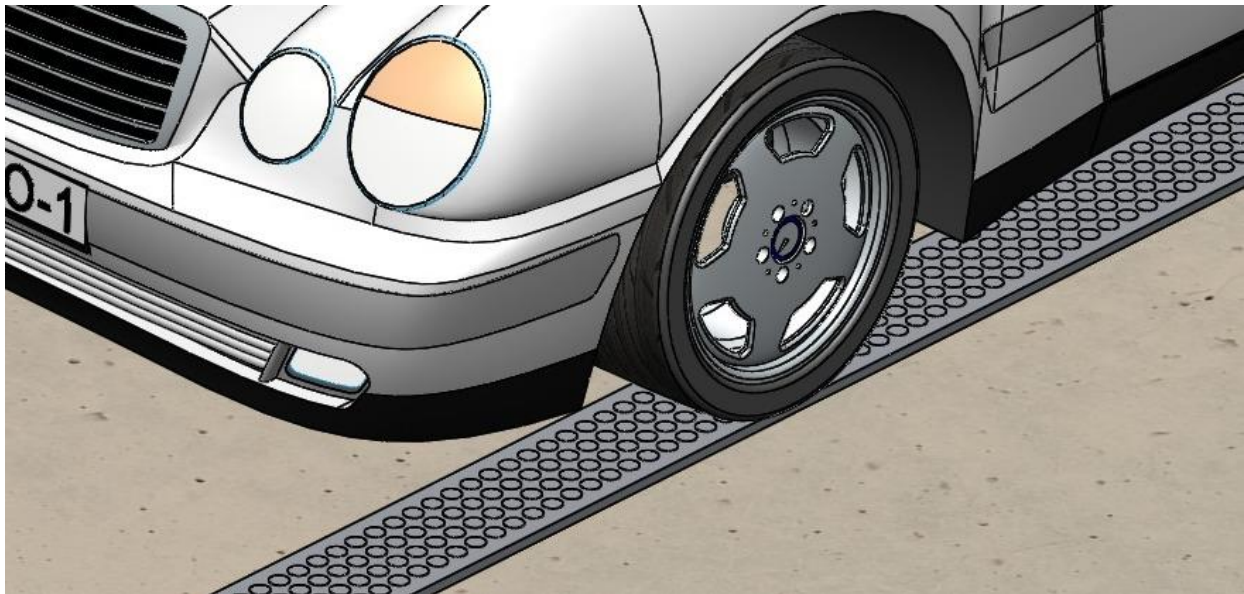
Con los datos obtenidos en el apartado 4.2.2 referente al consumo de energía del sistema de alumbrado se tiene que cada luminaria LED tiene un consumo de 60Watts lo que equivale a 720Watts por día, teniendo en cuenta que cada módulo diseñado genera 14 Watts lo que supone al día 336 Watts dando como resultado que se necesitarían más de 2 módulos para poder abastecer de energía cada luminaria. Considerando que la cantidad de bombillas LED que se necesitan alimentar para iluminar la vía son un total de 106 luminarias LED, para así tener un consumo total de energía de 27.856,8KWatts. Anuales y 76,32KWatts diarios de consumo eléctrico.

$$Mn = \text{Número de módulos a implementar.}$$

$$Mn = \frac{\text{consumo diario de las lumunarias}}{\text{watts generado por modulo}}$$

$$Mn = \frac{76320\text{Watts/diarios}}{336\text{watts/diaros}} = 227.143 \approx 228$$

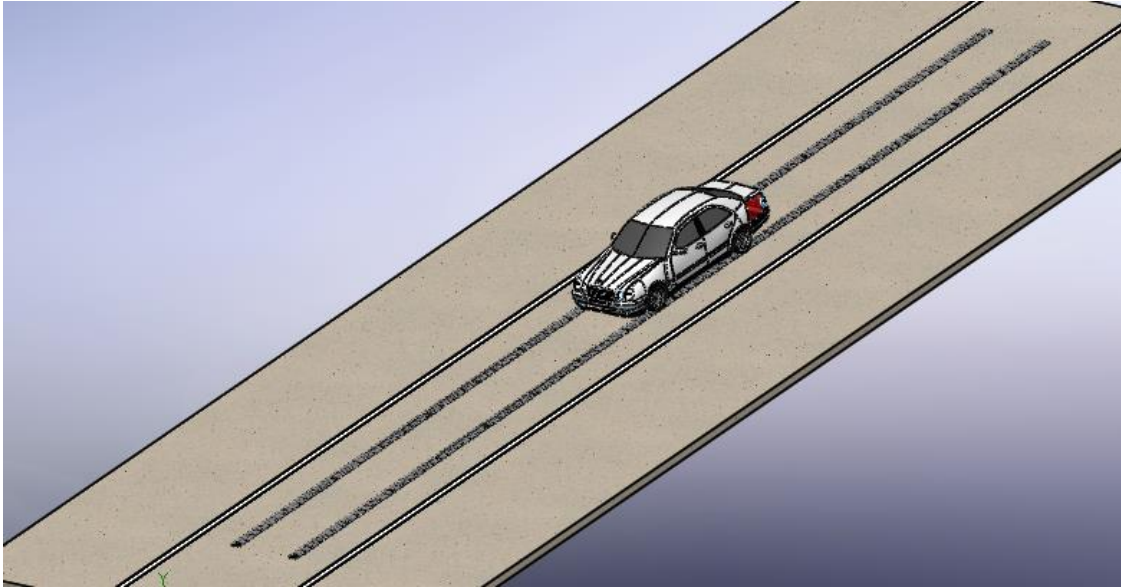
Teniendo como conclusión que para generar la energía necesaria al día es necesario instalar 228 generadores piezoeléctricos entre los diferentes canales del peaje de Guacara dando un total de 19 módulos esparcidos entre cada uno de los canales.



**Figura 31:** Montaje del Modulo PZT en l carreta.

**Fuente:** Flores Darwin, Lopez Victor

Visto desde otro ángulo se puede apreciar una vista completa, ver Figura 32



**Figura 32:** Montaje del Modulo PZT en l carreta.

**Fuente:** Flores Darwin, Lopez Victor

Cabe aclarar que para que el sistema sea eficiente y no presente irregularidades con respecto a la cantidad de energía producida al día y que reperca en un fallo en el alumbrado se deberá generar mayor cantidad de energía que la requerida evitando así pérdidas de voltaje, caídas de tensión o fallos en el alumbrado los días que se presenten menor circulación de vehículos.

Se propone expandir el número de los Módulos de 228 a 250 con el fin de generar una mayor cantidad de energía eléctrica y satisfacer la demanda requerida, aumentando el número a 250 módulos y generando aproximadamente 84 KWatts/día. Satisfaciendo de esta manera la demanda de energía de las luminarias.

#### **4.4.6 Cálculo del Banco de Baterías.**

Para acumular la energía generada por el módulo seleccionado se requiere de un banco de baterías el cual está constituido por una de las mejores alternativas de batería a considerar podría ser la batería 12v 200ah agm gel ciclo profundo wireplus. Las baterías de ciclo profundo wireplus son un tipo de batería ampliamente disponible y económica en Venezuela. Tienen una larga vida útil y son adecuadas para aplicaciones de alta capacidad de carga y descarga, como las aplicaciones viales. Además, son robustas y tolerantes a condiciones ambientales adversas, como altas temperaturas y humedad, lo cual es importante considerar en el contexto en el que se encuentra el acumulador.

Se procedió a calcular la cantidad de baterías que constituirán el banco, para ello se requirieron de los siguientes valores:

**Tabla 13: Valores requeridos para el cálculo del banco de baterías**

DISPOSITIVO	CANTIDAD	POTENCIA	TIEMPO DE USO (HORAS AL DÍA)	Wh/día
LUMINARIAS	106	60 W	12 h	76,32 KW

Fuente: Darwin Flores, Víctor López (2023)

El siguiente paso será identificar los días de autonomía, este se refiere a los días que el sistema deberá funcionar sin carga (esto es un caso muy extremo considerando que el menor día de circulación es el día domingo y aun así existe circulación de vehículos) Se tomara como días de autonomía un valor de una unidad debido a que es poco probable que el sistema trabaje sin carga. Luego se establece el voltaje de salida nominal del banco a 12 voltios (es decir una conexión en serie) con la finalidad de evitar desigualdades de carga que existen en conexiones en paralelo, por otro lado, teniendo en cuenta que el sistema entrega entre 12.5 a 16 voltios encaja perfecto con las necesidades del sistema de carga.

Por otro lado, se debe revisar en las especificaciones de la batería los valores de; Voltaje, carga nominal, eficiencia de descarga y eficiencia de conversión. las cuales se pueden apreciar en la siguiente tabla.

**Tabla 14: Propiedades de la batería de ciclo profundo wireplus**

Propiedades	Valores
Voltaje	12 voltios
Carga nominal	200 Amp/h
Eficiencia de descarga	85%
Eficiencia de conversión	99%

Fuente: todosai.com

Tomando la eficiencia del inversor a utilizar el cual será Fronius - Primo 10.0-1 Full que cuenta con una eficiencia del 98%. Para calcular el número de baterías que debe tener el banco se calcula la capacidad nominal que debe tener el sistema. El cual viene dado por la siguiente formula:

$$C_{nom} = \frac{E_g (D_{AUTO.} + 1)}{V_{nom} \cdot P_{Dmax} \cdot \eta_{BD} \cdot \eta_{inv}}$$

Donde:

***C<sub>nom\_banco</sub>*** = capacidad del banco de pruebas.

$E_G$  = energía total a generar.

$D_{auto}$  = días de autonomía.

$\eta_{BD}$  = Eficiencia de convertir energía

$\eta_{inv}$  = Eficiencia del inversor

$P_{Dm\acute{a}x}$  = Eficiencia de profundidad de descarga

$V_{nom}$  = Voltaje nominal preestablecido

$$C_{nom} = \frac{76320W}{(12)(0,85)(0,99)(0,98)} = 7712,18 A/h$$

Una vez obtenida la capacidad del banco de pruebas, se procede a calcular el número de baterías:

$$NBT = \frac{V_{nom}C_{nom}}{V_{nom\_bat}C_{nom\_batería}}$$
$$NBT = \frac{(12)(7712,18)}{(12)(200)} = 38,56 \text{ Baterías}$$

Obteniendo un total de 39 baterías a utilizar. El último paso será calcular el tiempo de carga de las mismas la cual se puede expresar en vatios hora (Wh) o amperios-hora (Ah), que viene dado por la siguiente formula:

$$T_c = \frac{Ct_{BD}}{C_c}$$

Donde:

$T_c$  = Tiempo de carga

$Ct_{BD}$  = capacidad total del banco de baterías =  $V_{nom} \cdot C_{nom}$

$$Ct_{BD} = 12v \cdot 7712,18 = 92546,16 \text{ Wattsh}$$

$C_c$  = corriente de carga = 3500watts

$$T_c = \frac{92546,16Wh}{84000w} = 26,44h$$

Teniendo como resultado que la batería tendrá un tiempo de carga aproximado de 26 horas.

#### 4.5 Evaluar la Viabilidad Ambiental y Económica del Proyecto

La viabilidad se refiere a verificar si un proyecto es factible y viable para ser desarrollado en términos técnicos, económicos, sociales, ambientales y legales. Es decir, se evalúa si el proyecto puede ser realizado con los recursos y conocimientos disponibles, si puede generar beneficios económicos y sociales, si es compatible con el medio ambiente y las normativas legales, y si

cumple con los objetivos y metas propuestas. La viabilidad es un factor clave en la toma de decisiones para abordar o continuar con un proyecto de ingeniería. De este modo esta sección representa un grado de importancia ya que nos indica si el presente proyecto será factible para ser realizado. Por consecuente se procederá a determinar la viabilidad económica y ambiental del proyecto propuesto.

#### **4.5.1 Viabilidad ambiental**

La viabilidad se refiere a la evaluación de los impactos ambientales que dicha actividad puede generar y la implementación de estrategias para minimizar o mitigar estos impactos. Esto implica tomar medidas preventivas en el diseño, construcción, operación y mantenimiento de la maquinaria involucrada en el proyecto para reducir al máximo posibles daños al ambiente, ya sea a nivel local o global. La evaluación de la viabilidad ambiental debe tener en cuenta factores como la emisión de gases contaminantes, el uso de recursos naturales como el agua, los efectos en la biodiversidad local, la gestión de residuos y la energía utilizada. Todo lo anterior, con el fin de garantizar que el proyecto sea sostenible y respete el entorno natural en el que se desarrolla.

Este proyecto cumple con las pautas sobre disminuir los impactos ambientales de las energías no renovables, ya que se trata de un proyecto el cual se pretende generar un ahorro de energía por medio de una fuente de energía alterna renovable y autosustentable, que logre por consecuente reducir el consumo de energía al Guri y ayudar a los problemas de energía eléctrica que actualmente azotan al País. Como se muestra cuadro 16, se puede apreciar los beneficios ambientales que otorga el generador de energía vibracional piezoeléctrico.

**Cuadro 16:** Indicadores de viabilidad ambiental

<b>Indicador</b>	<b>Aporte del proyecto:</b>
<b>Huella de carbono</b>	La energía generada por los generadores piezoeléctricos es limpia y renovable, lo que significa que no emite gases de efecto invernadero ni otros contaminantes que dañen el medio ambiente. Utilizar esta energía para alimentar las luminarias de la carretera en lugar de utilizar la energía de la red eléctrica, puede reducir la huella de carbono de la carretera y ser más ecológico.
<b>Consumo de energía</b>	La utilización de los generadores piezoeléctricos reducirá la necesidad de energía del Gurí para alimentar las luminarias de la carretera, disminuyendo así el consumo de energía que se requiere.
<b>Reducción de costos de energía</b>	Implementando un sistema de generación de energía sostenible, la carretera podría obtener una fuente considerable de energía gratuita a través de los generadores piezoeléctricos, y esto puede ayudar a reducir los costos de energía.
<b>Reducción de la dependencia de los combustibles fósiles:</b>	La utilización de los generadores piezoeléctricos también puede ayudar a reducir la dependencia de los combustibles fósiles, ya que la carretera puede generar energía limpia y renovable por sí misma.

Fuente: Darwin Flores, Víctor López (2023)

En resumen, la propuesta de utilizar los generadores piezoeléctricos para alimentar las luminarias de la autopista regional del centro en el tramo del peaje de Guacara hasta el sector de san Joaquín resulta viable y beneficioso para el medio ambiente en términos de reducción de la huella de carbono, reducción del consumo de energía, reducción de los costos de energía y la disminución de la dependencia de los combustibles fósiles.

#### **4.5.2 Viabilidad Económica**

Es importante mencionar que la viabilidad económica es una herramienta esencial para la realización del proyecto, ya que determinara si se puede seguir adelante con el proyecto en cuestión. Para ello se determinarán los costos de producción necesarios para llevar a cabo la

producción de los generadores de energía, los cuales estarán divididos en los distintos materiales necesarios para la fabricación de estos mismos los cuales son

- **Cristales piezoeléctricos:** Estos cristales tienen la capacidad de generar una corriente eléctrica cuando se someten a vibraciones mecánicas. Los materiales más comunes utilizados son el cuarzo, la cerámica y el titanato de bario.
- **Cables eléctricos:** Estos se utilizan para conectar el cristal piezoeléctrico y el circuito eléctrico del generador de energía.
- **Dispositivos electrónicos:** Incluyen diodos, resistencias, capacitores, reguladores de voltaje, entre otros componentes necesarios para construir el circuito eléctrico del generador de energía.
- **Carcasa:** Es un componente opcional, pero recomendado, que protege los componentes electrónicos y mecánicos del generador de energía vibracional piezoeléctrico. La carcasa también puede incluir elementos como conectores y cables de entrada y salida.

En el cuadro 17 se podrá observar los distintos precios de los materiales necesarios para la fabricación del proyecto:

**Cuadro 17: Precios de los materiales**

<b>Categoría</b>	<b>Modelo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Precio unitario (\$)</b>
<b>Cristal piezoeléctricos</b>	Noliac NCE51	El material piezocerámico Noliac NCE51 es un material blando estándar, especialmente adecuado para actuadores y aplicaciones no resonantes de baja potencia en las que se requiere un alto factor de acoplamiento y/o una alta sensibilidad de carga.	10 \$
<b>Cables eléctricos:</b>	Alambre de cobre estañado	El alambre estañado azul calibre 24 AWG es un tipo de cable hecho de cobre estañado y recubierto con una capa de aislamiento de color azul. El calibre 24 AWG se refiere al diámetro del cable, siendo un diámetro de 0.511mm. Este tipo de cable se utiliza comúnmente en proyectos de electrónica y otros proyectos que requieren una conexión de bajo voltaje.	5\$/metro
<b>Materiales Eléctricos:</b>	Rectificador Puente Diodos Kbp5010 1000v/50a	El puente rectificador de onda completa es un circuito electrónico utilizado en la conversión de una corriente alterna en continua. Este puente rectificador está formado por 4 diodos.	5\$
	Condensador	Capacitor 22 Uf 450v Filtro Condensador	5\$ 10 piezas
	Regulador de voltaje	L7805 Regulador De Voltaje Lm7805 5v 1,5a Pack De 8 Unidades	5 \$ 5 piezas
	Inversor Fronius - Primo 10.0-1 Completo	Puede operar eficientemente a un voltaje de entrada máximo de 600 V. Y para una mayor eficiencia y ahorro de costes para aplicaciones comerciales, el Fronius Primo puede funcionar con la tensión de entrada máxima de 1000 V.	4073.23\$
	Bateria 12v 200ah Agm Gel Ciclo Profundo Wireplus	Tiene un tiempo de descarga mucho más largo en comparación con otras baterías debido principalmente a su aleación y su separador de alta calidad AGM (Malla de Fibra de Vidrio Absorbente) que amplía el ciclo de vida de las baterías y previene cortocircuitos.	532\$
<b>Carcasa:</b>	Acero inoxidable 316L.	Es resistente a la corrosión, incluso en ambientes marinos y altamente ácidos, lo que lo hace adecuado para aplicaciones al aire libre. También tiene una buena resistencia a la fatiga y una alta durabilidad.	100\$ Lamina

**Fuente:** Darwin Flores, Víctor López (2023)

Partiendo del cuadro 17 se puede calcular el precio estimado para la realización del proyecto, Es importante tener en cuenta que los precios pueden variar dependiendo del proveedor, la ubicación geográfica y otros factores. Partiendo de eso en la tabla 13 se puede apreciar el costo total del proyecto:

**Tabla 13:** Costo total del proyecto

<b>cantidad</b>	<b>Tipo de medida</b>	<b>Descripción</b>	<b>Precio unidad</b>	<b>Precio total</b>
156.250	unidad	Noliac NCE51	10\$	1.562.500\$
6.250	metro	Alambre de cobre estañado	5\$	31.250\$
39.250	unidad	Diodo Rectificador Puente Kbps Fase Onda Completa 5	5\$	196.250\$
156.250	10 unidades	Condensador	5\$	78.125\$
39.250	5 unidades	Regulador de voltaje	5\$	39.250\$
1	1 unidad	Fronius - Primo 10.0-1 Completo	4073.23\$	4073.23\$
39	1 unidad	Bateria 12v 200ah Agm Gel Ciclo Profundo Wireplus	532\$	20.748\$
90	Lamina de 1.22 m por 2.44 m	Acero inoxidable 316L.	100\$	90.000\$
<b>Costo total de materiales</b>				<b>2.425.446\$</b>
<b>Mano de obra 25% del costo</b>				<b>606.361,5\$</b>
<b>Inversión total</b>				<b>3.031.807,5\$</b>

**Fuente:** Darwin Flores, Víctor López

Como se puede apreciar se necesita una inversión de 3.031.807,5\$ para la realización del proyecto que a la larga traerá grandes beneficios y un ahorro energético que proporcionará un ahorro económico considerable para el país.

## CONCLUSIONES

En resumen, luego de realizar el estudio para la realización del acumulador de energía vibracional piezoeléctrico en el peaje de Guacara, se destaca que el mismo beneficia en la reducción del consumo de energía en el sistema de carreteras, así mismo se ve reflejada una mayor seguridad vial manteniendo la autopista ilumina cuando el sistema de suministro de energía eléctrica convencional falle. En general, los acumuladores de energía vibracional piezoeléctricos ofrecen una serie de beneficios potenciales para las carreteras. Estos beneficios incluyen la reducción del consumo de energía, la mejora de la seguridad vial, la reducción de la contaminación acústica y el transporte sostenible.

Sin embargo, es importante señalar que los acumuladores piezoeléctricos de energía vibratoria aún se encuentran en las primeras etapas de desarrollo. Hay una serie de desafíos que deben abordarse antes de que puedan implementarse ampliamente en las carreteras. Estos desafíos incluyen el costo de la tecnología, la durabilidad de los dispositivos y la eficiencia del proceso de recolección de energía. A pesar de estos desafíos, los acumuladores de energía vibracional piezoeléctricos tienen el potencial de revolucionar la forma en que alimentamos nuestras carreteras. Con un mayor desarrollo, estos dispositivos podrían ayudar a que nuestras carreteras sean más sostenibles, seguras y eficientes.

Se llevaron a cabo las distintas fases metodológicas desde el diagnóstico del estado del alumbrado público en el tramo del peaje de Guacara hasta San Joaquín, hasta la viabilidad económica y ambiental del proyecto, abarcando puntos importantes como aplicación de las técnicas de recolección y análisis de datos, determinación de los parámetros fundamentales para el acumulador de energía, selección de los materiales, modelado de circuitos y simulación del funcionamiento de los mismos, y finalmente el montaje del piezoeléctrico en la carretera.

Llegando a la conclusión, de que, pese a ser un proyecto el cual hay que hacer una gran inversión el mismo puede brindar muchos beneficios a nivel social, tener el reconocimiento de toda la comunidad. También a nivel económico para evitar el consumo de combustibles fósiles en la generación de electricidad, siendo un proyecto que puede mejorar con el paso del tiempo con el desarrollo de nuevos materiales piezoeléctrico.

## RECOMENDACIONES

Debido a los resultados de este trabajo, se han podido identificar algunos campos de interés para futuros trabajos en los entornos del efecto piezoeléctrico como generador de energía. A continuación, se detallan algunos de ellos:

- Se recomienda en trabajos futuros realizar un estudio afondo acerca de la herramienta matlab-simulink ya que la misma presenta diversas herramientas que facilitan el trabajo de montaje y simulación de los generadores piezoeléctricos y sus diversas estructuras modeladas.
- Se propone la utilización del modelo desarrollado durante este trabajo para las primeras fases de estudio, cambiando los parámetros externos, así como las propiedades del piezoeléctrico seleccionado. Este paso previo al prototipo de nuevas aplicaciones sirve para tener las primeras estimaciones y guiar hacia las posibles soluciones.
- Ensayos en laboratorio para la evaluación eléctrica de posibles configuraciones de instalación de piezoeléctricos.
- Se recomienda por otro lado el desarrollo experimental de esta investigación con la finalidad de poder validar los resultados obtenidos de este trabajo de manera analítica.

## REFERENCIAS

- Alvarado, M. y Vicente, A. (2012). **Análisis de la operación y desempeño de un sistema de generación de energía con la utilización de baldosas piezoeléctricas.** [Trabajo de grado]. Universidad Técnica Particular de Loja.
- Arias, F. (2016). **El Proyecto de Investigación: Introducción a la metodología científica.** 6ta edición. Episteme. Caracas, Venezuela.
- Beeby, M. y White, N. (2006). **Energy harvesting vibration sources for microsystems applications.** [Artículo científico].
- Castellano, M. y Castellano M. (2017). **Diseño de un Prototipo Para un Sistema de Generación de Energía Eléctrica Basada en la Transformación de la Energía Magnética en Energía Mecánica.** [Tesis de pregrado inédita]. Universidad José Antonio Páez.
- Chang, K. Y Ramasamy, G. (2011). **A hybrid energy harvesting system for small battery powered applications.** [Artículo científico].
- Corbetta, P. (2003). **Metodología y técnicas de investigación social.** Madrid: Mc Graw Hill.
- Hurtado, J. (2000). **Metodología de la Investigación Holística.** 3era edición. Inversiones Cepal. Caracas, Venezuela.
- Hurtado, J. (2012). **El proyecto de investigación: Comprensión holística de la metodología y la Investigación.** 7ma edición. Ediciones Quirón. Caracas, Venezuela.
- Mohanty, Parida y Kumar. (2019). **Vibration energy harvesting: A review.** Revista de Ciencia y Tecnología.
- Normas **COVENIN.** (2022)
- Padilla, N. **Implementación de un Sistema de Energía Renovable Alternativo para la Electrificación del Comando de la Guardia nacional “Escuadrón Montado Guatopo”, Ubicado en el Parque Nacional Guatopo del Estado Miranda.** [Trabajo de grado]. Universidad de Carabobo.
- Parella y Martins, (2006). **Metodología de la investigación cuantitativa.** 2da edición. Editorial Fedupel. Caracas, Venezuela.
- Pullaguari, A. y Narváez, D. (2022). **Diseño y Simulación de un Acumulador de Energía Vibracional Piezoeléctrico para Aplicaciones Ferroviarias.** [Trabajo de titulación]. Escuela Politécnica Nacional.

- Vásquez, M. (2019). **Contribución al Estudio de la Generación de Energía Eléctrica a Partir de Materiales Piezoeléctricos**. [Tesis doctoral]. Universidad Politécnica de Madrid.
- Vitriago, A. (2017). **Propuesta de una Vivienda Unifamiliar de Desarrollo Progresivo: Empleando el Uso de Tecnología Eólica y Solar como Suministro de Energía Alternativa. Los Taques-Estado Falcón**. [Trabajo de grado]. Universidad Nueva Esparta.
- F. J. Jiménez Martínez, J. de Frutos, D. Alonso, y M. Vázquez 8(2015). **Optimización de piezoeléctricos comerciales para su uso en sistemas de Energy Harvesting**. [Artículo científico].
- S. R. P. S. R. Platt, S. F. S. Farritor, and H. H. H. Haider, **On low-frequency electric power generation with PZT ceramics**, IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 10, no. 2, (pp. 240–252, 2005).
- A. Ramos and C. Ferreira (2016). **System for micro generation and energy storage, state of the art – example of the piezoelectric effect**. [Artículo científico].
- E. L. Horsley, M. P. Foster, D. a Stone, and M. Street, (2007) **State-of-the-art Piezoelectric Transformer Technology Keywords Piezoelectric transformer designs**, (pp. 1–10)
- A. Khaligh, P. Zeng, and C. Zheng (2010), “**Kinetic Energy Harvesting Using Piezoelectric and Electromagnetic Technologies #x2014; State of the Art,**” (Ind. Electron. IEEE Trans., vol. 57, no. 3, pp. 850–860).
- J. Kim, B. L. Grisso, J. K. Kim, D. S. Ha, and D. J. Inman (2008), **Electrical modeling of Piezoelectric ceramics for analysis and evaluation of sensory systems**, (2008 IEEE Sensors Appl. Symp., pp. 122–127).
- E. Suaste Gomez (2010), Piezoelectric Ceramics. [Artículo científico].
- E. Pérez Pineda and S. Velázquez Alfaro (2016), **Diseño e implementación de un generador piezoeléctrico baldosa, para alimentar un sistema de iluminación de baja potencia**. [Trabajo de grado]. Instituto Politécnico Nacional

## **APÉNDICES**

**Apéndice A: Guion de Entrevista**

**GUIA DE PREGUNTAS**

N°	Guión de entrevista
1	¿En qué condiciones considera usted que se encuentra el alumbrado público de la Autopista Regional del Centro en el tramo del peaje de Guacara-San Joaquín?
2	¿Cómo considera usted que puede mejorar el alumbrado público de la Autopista Regional del Centro?
3	¿Cuál es el consumo eléctrico de los faros del alumbrado público de la autopista regional del centro en el tramo del peaje de Guacara-san Joaquín?
4	¿En qué hora del día se registran más circulación de vínculos a través del peaje de Guacara?
5	Aproximadamente ¿cuál sería el promedio de vehículos que transitan diariamente por el peaje de Guacara.

**Apéndice B: Hoja de Registro para la Validación del Instrumento**



ANEXO C  
 REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
 UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**HOJA DE REGISTRO PARA LA VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO**

**INSTRUCCIONES:** Marque con una X el recuadro que identifique su punto de vista respecto al ítem de acuerdo a las siguientes apreciaciones:

- **CLARO:** Recolección simple y eficiente que ayuda a las personas a entender con facilidad lo escrito.
- **CONFUSO:** Esta redactado de forma deficiente o resulta complicado entenderla idea de la pregunta.
- **INCOHERENTE:** Redacción con una falta total de coherencia entre varias ideas, que contradice y no guarda una relación lógica.

En la columna de observaciones puede complementar con su apreciación

Ítems	Redacción de Ítems			Pertinencia de los Objetivos		Observaciones
	Claro	Confuso	Incoherente	Pertinente	No Pertinente	
1	X			X		
2	X			X		
3	X			X		
4	X			X		
5	X			X		

Fecha: 6-2-23	Firma:
Especialista: <i>Juan Pizzello</i>	Descripción de perfil del especialista: <i>Juan Pizzello</i> <i>MSC IMAI</i>

## Apéndice C: Hoja de Registro para la Validación del Instrumento



### ANEXO C

REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

#### HOJA DE REGISTRO PARA LA VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO

**INSTRUCCIONES:** Marque con una X el recuadro que identifique su punto de vista respecto al ítem de acuerdo a las siguientes apreciaciones:

- **CLARO:** Recolección simple y eficiente que ayuda a las personas a entender con facilidad lo escrito.
- **CONFUSO:** Esta redactado de forma deficiente o resulta complicado entenderla idea de la pregunta.
- **INCOHERENTE:** Redacción con una falta total de coherencia entre varias ideas, que contradice y no guarda una relación lógica.

En la columna de observaciones puede complementar con su apreciación

Ítems	Redacción de Ítems			Pertinencia de los Objetivos		Observaciones
	Claro	Confuso	Incoherente	Pertinente	No Pertinente	
1	✓			✓		
2	✓			✓		
3	✓			✓		
4	✓			✓		
5	✓			✓		

Fecha:	06/02/2023	Firma:	
Especialista:	Yndira Rodríguez	Descripción de perfil del especialista:	Ing. Mecánico - Dsa. Ciencias de Edo.

**Apéndice D:** Hoja de Registro para la Validación del Instrumento



ANEXO C  
 REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
 UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**HOJA DE REGISTRO PARA LA VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO**

**INSTRUCCIONES:** Marque con una X el recuadro que identifique su punto de vista respecto al ítem de acuerdo a las siguientes apreciaciones:

- **CLARO:** Recolección simple y eficiente que ayuda a las personas a entender con facilidad lo escrito.
- **CONFUSO:** Esta redactado de forma deficiente o resulta complicado entenderla idea de la pregunta.
- **INCOHERENTE:** Redacción con una falta total de coherencia entre varias ideas, que contradice y no guarda una relación lógica.

En la columna de observaciones puede complementar con su apreciación

Ítems	Redacción de Ítems			Pertinencia de los Objetivos		Observaciones
	Claro	Confuso	Incoherente	Pertinente	No Pertinente	
1	✓			✓		
2	✓			✓		
3	✓			✓	✓	No pertinencia en Mantenimiento
4	✓			✓		
5	✓			✓		

Fecha: 06/02/2023	Firma:
Especialista: Wiston Espinoza	Descripción de perfil del especialista: Ing. Electrónico, MSc. Ing. Eléctrica

**Apéndice E:** Cuadro técnico metodológico



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA**  
**UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**CUADRO TÉCNICO METODOLÓGICO**

**OBJETIVO GENERAL:** Diseñar y simular un acumulador de energía vibracional piezoeléctrico para aplicaciones viales.

<b>OBJETIVO ESPECÍFICO</b> 1	<b>VARIABLE</b>	<b>DIMENSIÓN</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>ÍTEMS</b>	<b>FUENTE DE INFORMACIÓN</b>
Diagnosticar el estado del alumbrado de la vía de la Autopista Regional del Centro desde el peaje de Guacara hasta San Joaquín.	Alumbrado Público	Tipo de luminaria	Existencia	1	Entrevista Estructurada con Guía de Preguntas
			Eficiencia	2	
		Demanda energética del alumbrado público de la autopista	Mantenimiento	3	
			Consumo	3	
		Circulación de vehículos en la autopista	Flujo Vehicular	4	
5					

## **ANEXOS**

**Anexo A:** Especificaciones del PZT Noliac NCE51, extraídas de la página de noliac.com

Properties	Symbol & unit	NCE51 NCE51f
<b>DIELECTRIC PROPERTIES (tolerances +/- 10%)</b>		
Relative Dielectric Constant	$\epsilon^T_{33} / \epsilon_0$	1900
Dielectric Loss Factor	$\text{tg}\delta [10^{-4}]$	150
Dielectric Loss Factor at 400V/mm	$\text{tg}\delta [10^{-4}]$	
<b>ELECTROMECHANICAL PROPERTIES (tolerances +/- 5%)</b>		
Electromech. Coupling Factors**	$k_p$	0.65
	$k_{31}$	0.38
	$k_{33}$	0.74
	$k_t$	0.50
Piezoelectric Charge Constants	$-d_{31} [10^{-12} \text{ C/N}]$	208
	$d_{33} [10^{-12} \text{ C/N}]$	443
Piezoelectric Voltage Constants	$-g_{31} [10^{-3} \text{ Vm/N}]$	13
	$g_{33} [10^{-3} \text{ Vm/N}]$	26
Frequency Constants	$N^E_p [m/s]$	1925
	$N^D_t [m/s]$	2000
	$N^E_1 [m/s]$	1370
	$N^D_3 [m/s]$	1320
<b>PHYSICAL PROPERTIES (tolerances +/- 5%)</b>		
Mechanical Quality Factor	$Q_m$	80
Density	$\rho [10^3 \text{ kg/m}^3]$	7.85
Elastic Compliances	$s^E_{11} [10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}]$	16
	$s^E_{33} [10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}]$	19
Curie Temperature	$T_c [^\circ\text{C}]$	360

\*\* Measured in accordance with standard EN 50324

**Anexo B:** Especificaciones extendidas especificaciones del PZT Noliac NCE51, extraídas de la página de noliac.com

1. The presented data are determined on standardized specimens in the form of small-signal measurements according to European Standard EN 50324 and IEC Publication 483.
2. The standardized specimens are manufactured using a standard production powder and a standard production technology.
3. The data given represents nominal values which were determined 24 hours after poling process at an ambient temperature 23°C +/- 2°C.
4. Standard Tolerances: Electrical properties ± 10%. Mechanical Properties ± 5%. Piezoelectric properties ± 5%.

Properties	Symbol	Unit	
<b>ELECTRICAL PROPERTIES</b>			
Dielectric dissipation factor	$\tan \delta$	[10 <sup>-4</sup> ]	150
Relative permittivity	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	[1]	1900
	$\epsilon_{33}^S/\epsilon_0$	[1]	823
	$\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$	[1]	1940
	$\epsilon_{11}^S/\epsilon_0$	[1]	906
Curie Temperature	$T_c$	[°C]	360
<b>Mechanical Properties</b>			
Poisson's ratio	$\sigma^E$	[1]	0.32
Density	$\rho$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	7850
<b>PIEZOELECTRIC PROPERTIES</b>			
<b>Frequency Constants</b>			
Planar	$N_p$	[Hz.m]	1925
Thickness shear	$N_{15}$	[Hz.m]	1180
Transverse	$N_{31}$	[Hz.m]	1370
Longitudinal	$N_{33}$	[Hz.m]	1320
Thickness	$N_t$	[Hz.m]	2000
<b>COUPLING FACTORS</b>			
Planar	$k_p$	[1]	0.650
Thickness shear	$k_{15}$	[1]	0.730
Transverse	$k_{31}$	[1]	0.380
Longitudinal	$k_{33}$	[1]	0.740
Thickness	$k_t$	[1]	0.500
Charge Constant	$d_{33}$	[10 <sup>-12</sup> C/N]	443
Voltage Constant	$g_{33}$	[10 <sup>-3</sup> V.m/N]	26.3
Mechanical Quality Factor	$Q_m$	[1]	80
<b>STABILITY</b>			
<b>Temperature Coefficient</b>			
Range 20 - 80 °C	$\alpha_{\text{permittivity}}$	[10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]	4000
	$\alpha_{kp}$	[K <sup>-1</sup> ]	0
Aging Rates	$c_t$	[%] per decade	-1.40
	$c_{Np}$	[%] per decade	0.25
	$c_{kp}$	[%] per decade	0.10

**Anexo C:** Matriz de coeficientes completos del PZT Noliac NCE51, extraídas de la página de noliac.com

**Elastic Properties**

ELASTIC COMPLIANCE MATRIX E					
$s^E$ [10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /N]					
17.0	-5.36	-8.69	0	0	0
-5.36	17.0	-8.69	0	0	0
-8.69	-8.69	21.3	0	0	0
0	0	0	48.9	0	0
0	0	0	0	48.9	0
0	0	0	0	0	44.6

ELASTIC COMPLIANCE MATRIX D					
$s^D$ [10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /N]					
14.5	-7.81	-3.22	0	0	0
-7.81	14.5	-3.22	0	0	0
-3.22	-3.22	9.64	0	0	0
0	0	0	22.9	0	0
0	0	0	0	22.9	0
0	0	0	0	0	44.6

ELASTIC STIFFNESS MATRIX E					
$c^E$ [10 <sup>10</sup> N/m <sup>2</sup> ]					
13.4	8.89	9.09	0	0	0
8.89	13.4	9.09	0	0	0
9.09	9.09	12.1	0	0	0
0	0	0	2.05	0	0
0	0	0	0	2.05	0
0	0	0	0	0	2.24

ELASTIC STIFFNESS MATRIX D					
$c^D$ [10 <sup>10</sup> N/m <sup>2</sup> ]					
13.2	8.76	7.34	0	0	0
8.76	13.2	7.34	0	0	0
7.34	7.34	16.2	0	0	0
0	0	0	4.37	0	0
0	0	0	0	4.37	0
0	0	0	0	0	2.24

**Dielectric properties**

PERMITTIVITIES [10 <sup>-8</sup> F/m]					
$\epsilon_{11}^T$	1.72		$\epsilon_{11}^S$	0.802	
$\epsilon_{22}^T$	1.72		$\epsilon_{22}^S$	0.802	
$\epsilon_{33}^T$	1.68		$\epsilon_{33}^S$	0.729	

RELATIVE PERMITTIVITIES [1]					
$\epsilon_{11r}^T$	1940		$\epsilon_{11r}^S$	906	
$\epsilon_{22r}^T$	1940		$\epsilon_{22r}^S$	906	
$\epsilon_{33r}^T$	1900		$\epsilon_{33r}^S$	823	

YOUNG MODULUS MATRIX					
$Y^E$ [10 <sup>10</sup> N/m <sup>2</sup> ]					
5.9	-18.6	-11.5	0	0	0
-18.6	5.9	-11.5	0	0	0

**Piezoelectric Properties**

CHARGE CONSTANT MATRIX					
$d$ [10 <sup>-12</sup> C/N]					
0	0	0	0	669	0
0	0	0	669	0	0
-208	-208	443	0	0	0

$e$ [C/m <sup>2</sup> ]					
0	0	0	0	13.7	0
0	0	0	13.7	0	0
-6.06	-6.06	17.2	0	0	0

VOLTAGE CONSTANT MATRIX					
$g$ [10 <sup>-3</sup> Vm/N]					
0	0	0	0	38.9	0
0	0	0	38.9	0	0
-12.4	-12.4	26.3	0	0	0

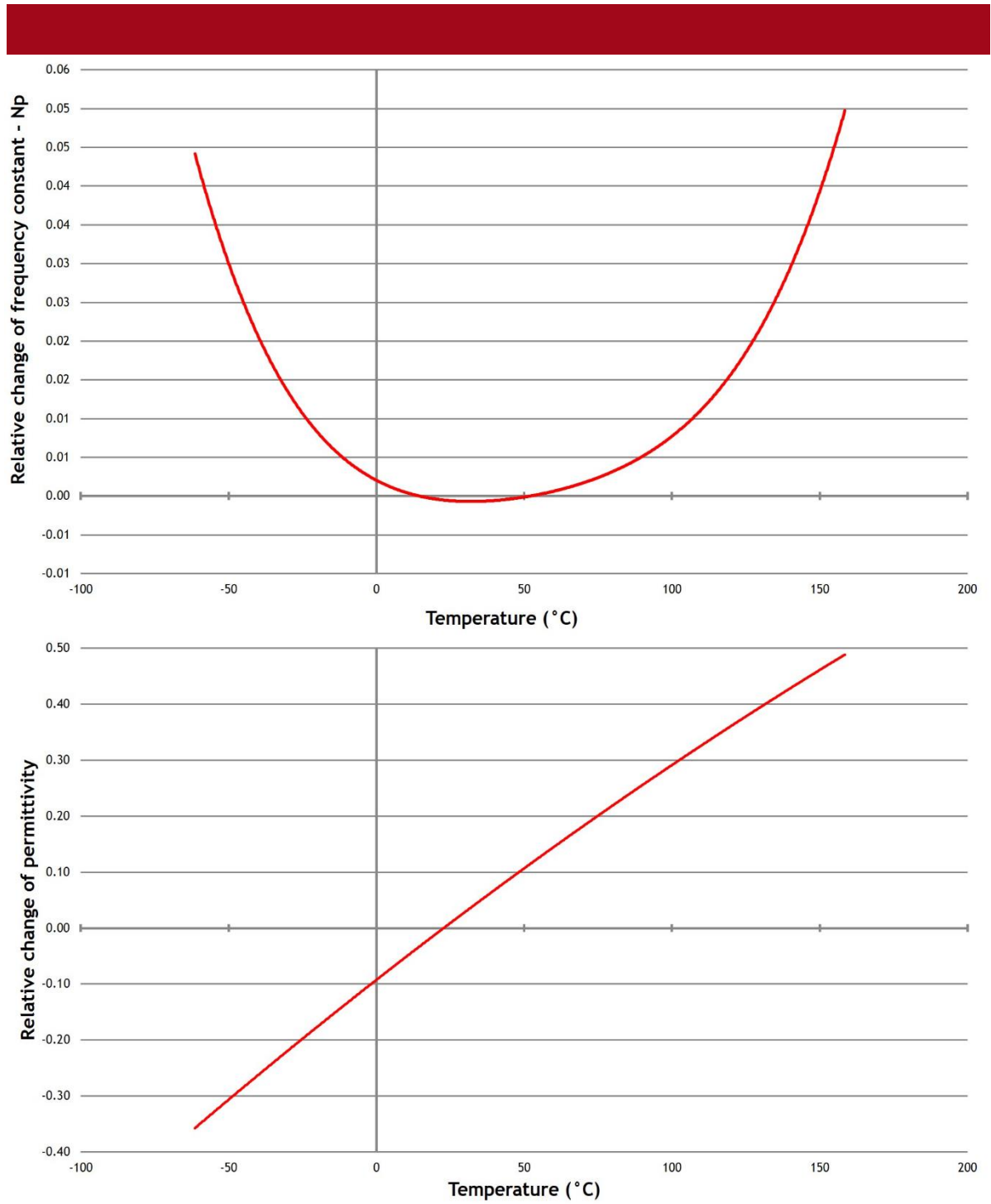
$h$ [10 <sup>8</sup> V/m]					
0	0	0	0	17.0	0
0	0	0	17.0	0	0
-8.31	-8.31	23.5	0	0	0
0	0	0	38.9	0	0
-12.4	-12.4	26.3	0	0	0

**Matrix**

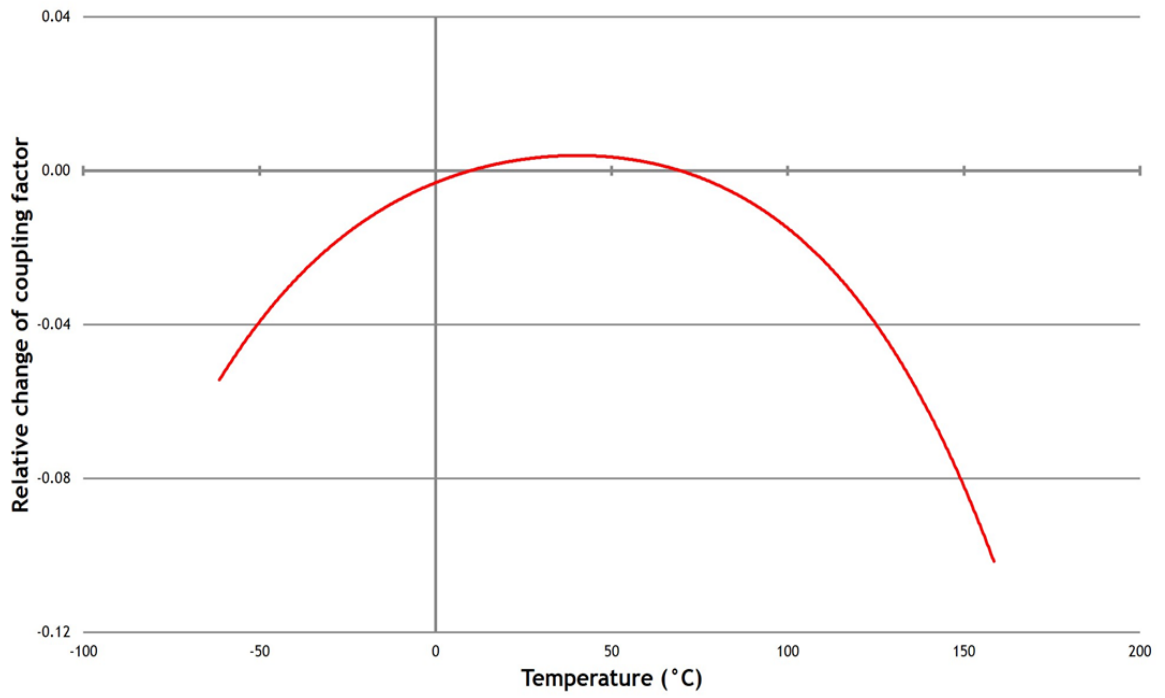
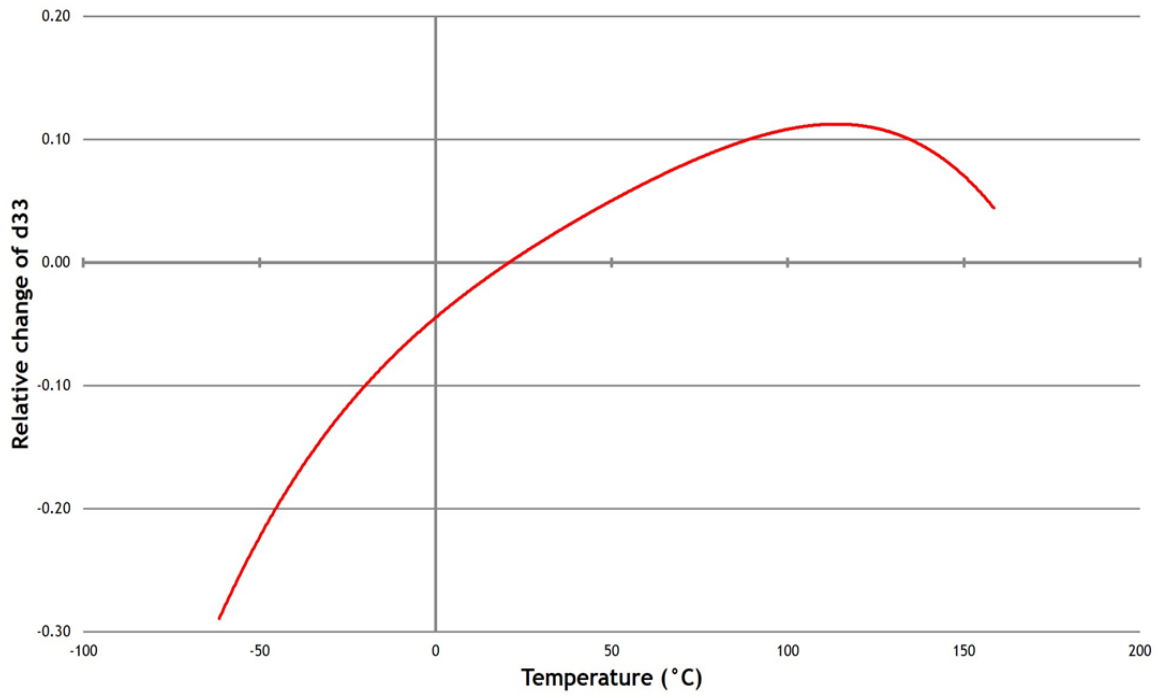
Z<sub>ab</sub> Z - Property  
a - direction  
b - direction

	1	2	3	4
1	Z <sub>11</sub>	Z <sub>12</sub>	Z <sub>13</sub>	→b
2	Z <sub>21</sub>	Z <sub>22</sub>	Z <sub>23</sub>	
3	Z <sub>31</sub>	Z <sub>32</sub>	Z <sub>33</sub>	
4	↖a			

**Anexo D:** Dependencias de temperatura del PZT Noliac NCE51, extraídas de la página de noliac.com



**Anexo E:** Variacion de la constante dieléctrica con respecto a la temperatura



**Anexo E:** Rango para ancho de carriles

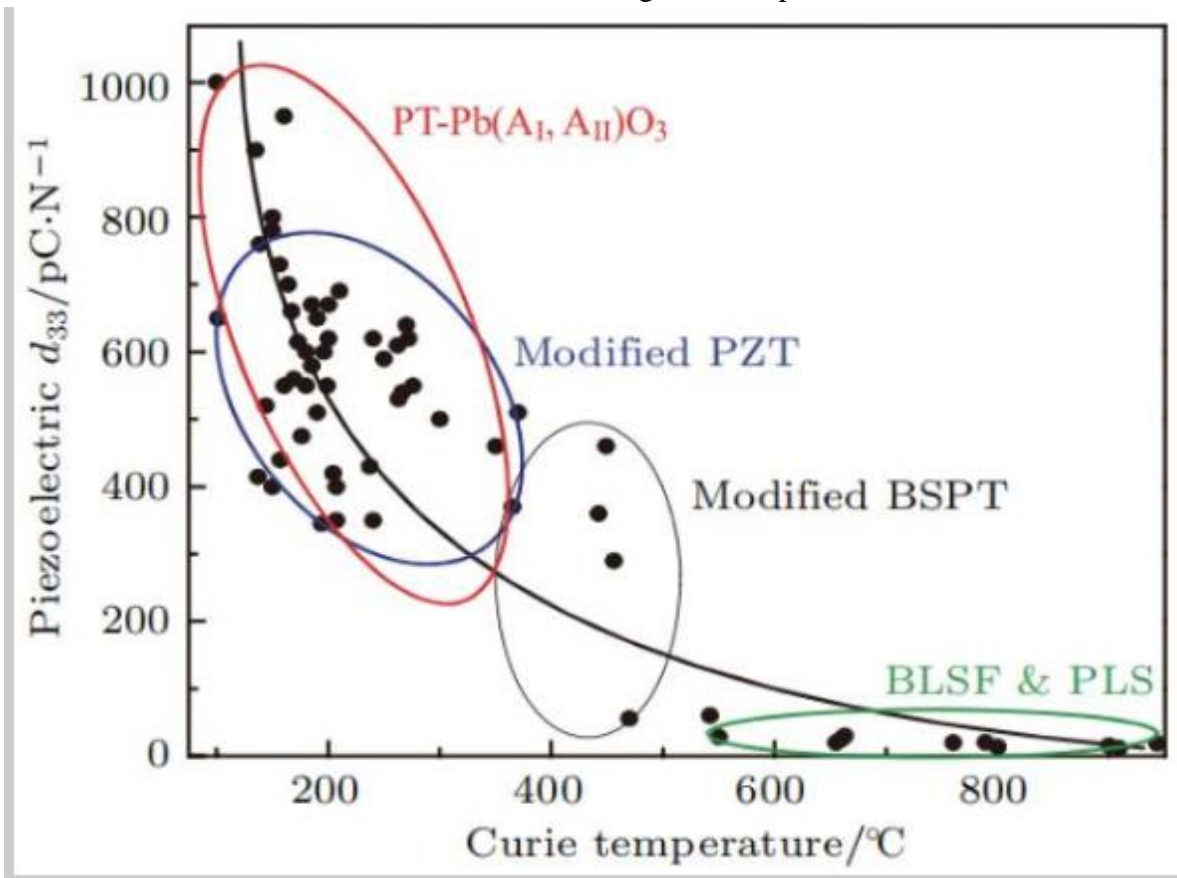
Tipo de calzada	Rural		Urbano	
	EE. UU. (pies)	Métrico (metros)	EE. UU. (pies)	Métrico (metros)
autopista	12	3.6	12	3.6
Rampas (1 carril)	12-30	3.6-9.2	12-30	3.6-9.2
Arterial	11-12	3.3-3.6	10-12	3.0-3.6
Coleccionista	10-12	3.0-3.6	10-12	3.0-3.6
Local	9-12	2.7-3.6	9-12	2.7-3.6

**Anexo F:** Propiedades materiales de PZT, PVDF, silicio y acero inoxidable.

	<b>Young's Modulus (GPa)</b>	<b>Poisson's Ratio</b>	<b>Density (kg/m<sup>3</sup>)</b>
PZT [41]	70	0.3	7,500
PVDF [42,43]	2~4	0.34	1.78
Silicon [44]	168.9	0.182	2,330
Stainless steel [41]	193	0.318	8,000

**Anexo G:** Coeficientes piezoeléctricos y temperatura de Curie de cerámicas piezoeléctricas

comunes en relación con algunos componentes.



**Anexo H:** Tipos de alumbrado publico

Tipo	Criterio	Muy importante	Importante	Medio	Reducido	Muy reducido
I (A1)	Velocidad de circulación	=====				
	Volumen de transito	=====				
	Transito de peatones					=====
	Reproducción de colores					=====
II (A1)	Velocidad de circulación			=====		
	Volumen de transito	=====				
	Transito de peatones	=====				
	Reproducción de colores					
III (A2)	Velocidad de circulación			=====	=====	
	Volumen de transito			=====	=====	
	Transito de peatones			=====	=====	
	Reproducción de colores			=====	=====	
IV (B1)	Velocidad de circulación		=====	=====		
	Volumen de transito		=====	=====		
	Transito de peatones		=====	=====		
	Reproducción de colores		=====	=====		
V (B2)	Velocidad de circulación					=====
	Volumen de transito					=====
	Transito de peatones		=====	=====		
	Reproducción de colores		=====	=====		

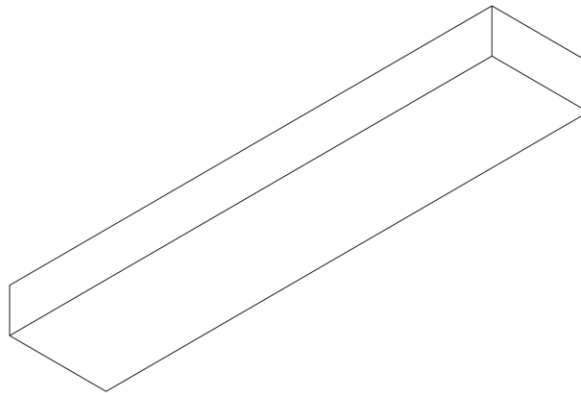
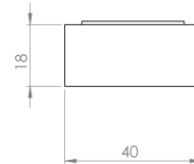
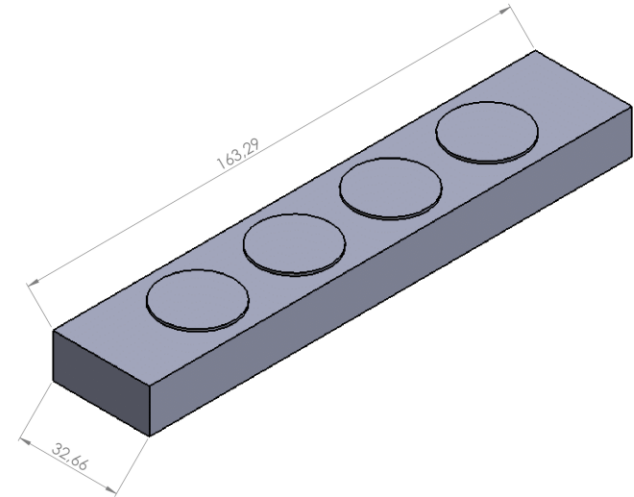
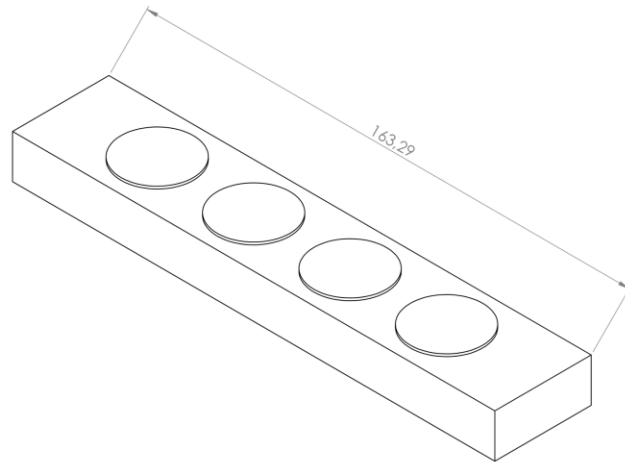
**Anexo I:** Tipo de alumbrado recomendado según la naturaleza de la vía

Ubicación	Clase de vía	Tipo de alumbrado
Zonas Rurales	Autopistas y distribuidores	I (A1)
	Vías interurbanas	I (A1)
	Vías secundarias	IV (B2)
Alrededores y acceso a zonas urbanas	Vías de acceso	I ó II (A2)
	Vías colectoras	II (A2)
	Avenidas de circunvalación	I ó II (A2)
Zonas pobladas	Avenidas y calles	II (A1)
	Vías comerciales	II (A1)
	Vías secundarias	III (B1)
	Vías residenciales	V (B2)
Situaciones especiales	Cruces peligrosos	Tratamiento particular
	Redomas	
	Pendientes	
	puentes túneles	

**Anexo J:** Características de clasificación de las vías de tránsito

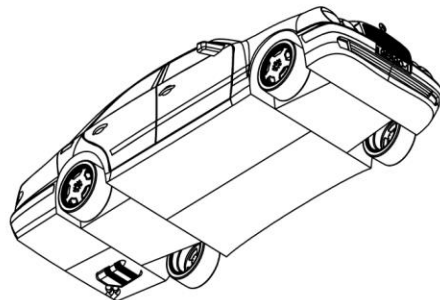
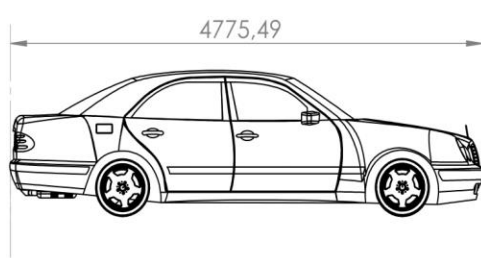
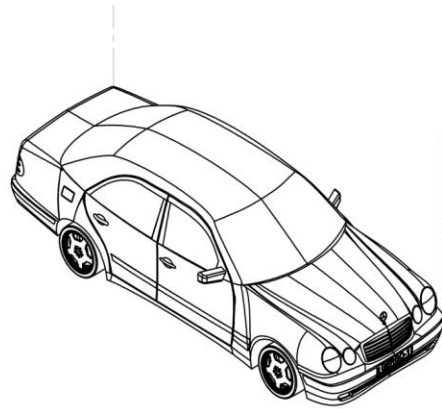
Criterio		Autopistas (A1)	Vías expresas (A1)	Vías principales (A2)	Vías secundarias (B1)	Vías locales (B2)
U S O	Transito	Expreso	Expreso	Principal	Local principal	Local secundario
	Velocidad de circulación	Sobre 80 km/h.	Sobre 80 km/h.	Menos de 60 km/h.	Menos de 45 km/h.	Menos de 40 km/h.
	Longitud del tramo principal	Más de 5 km	Más de 5 km	Menos de 1,5 km	Menos de 1,5 km	Menos de 0,8 km
A C C E S O S	Volumen de tránsito	Alto o muy alto	Alto o muy alto	Alto o muy alto	Alto o bajo	Bajo
	Control	Total	Total o parcial	Normalmente ninguno	Ninguno	Ninguno
	Cruce con calles secundarias	No	No	A nivel	A nivel	A nivel
	Cruce con calles principales	Sin intersección	Generalmente sin intersección a nivel, Usualmente con distribuidores	Intersección a nivel	Intersección a nivel	Intersección a nivel
	Control de tráfico para cruce o giro a nivel	No existe	Principalmente señales de pare. Algunas veces semáforos	Señales de pare o semáforos	Señales de pare o semáforos	Señales de pare generalmente
	Tipo de acceso	Rampa o canal de acceso	Canal de acceso	Normal o con ensanchamiento	Normal o con ensanchamiento	Normal
	Vías laterales	Posible	Posible	Normalmente no	Normalmente	No
	Isla central	Siempre	Siempre	Normalmente	Normalmente no	No
	Central de cruce de peatones	Dispositivo de cruce separado	Paso de peatones o separados	Paso de peatones	Paso de peatones	A veces paso de peatones
	Canal de estacionamiento	No	No	Restringido o ninguno	Posible	Posible
Hombriño	Incluido	Incluido	Normalmente no	No	No	
Distancia de visibilidad	100 m	100 m	80 m	60 m	50m	

## **PLANOS**



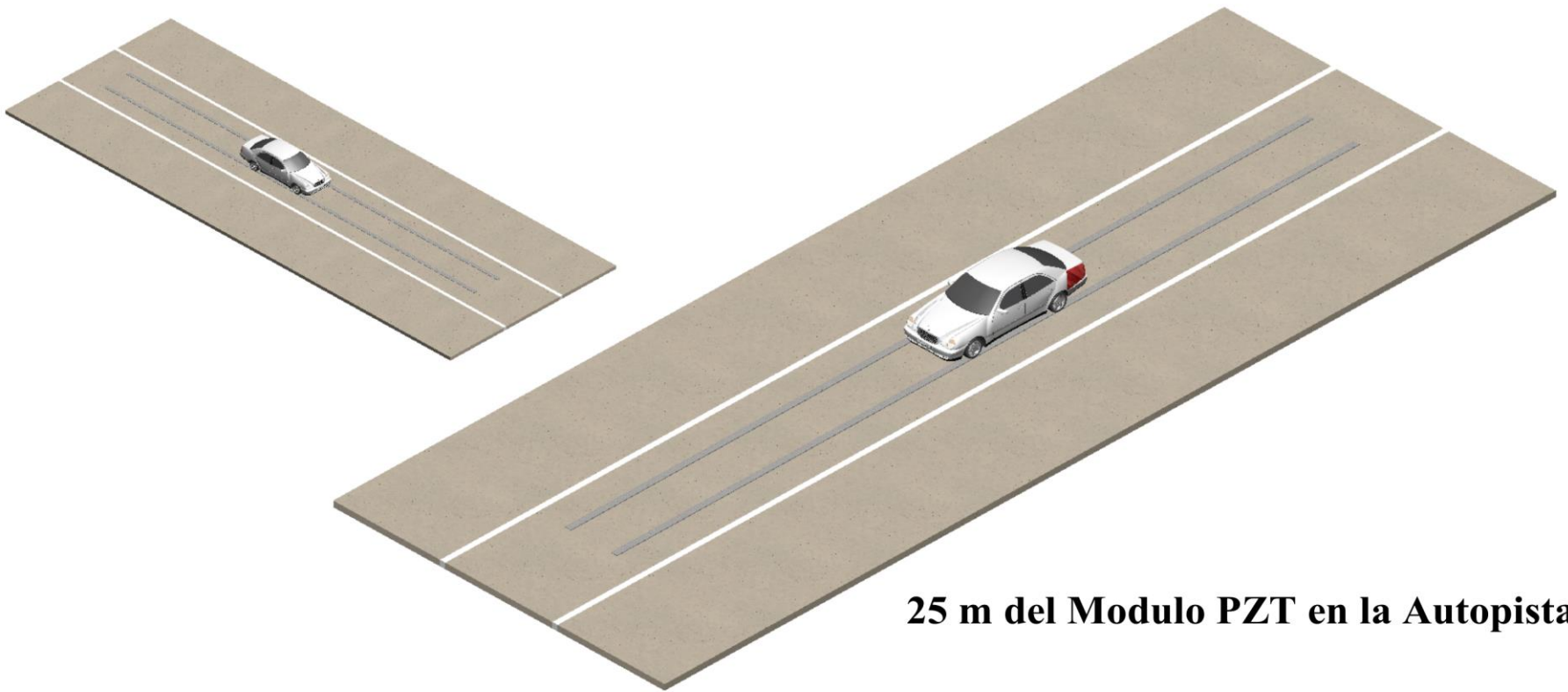
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAS: ANGULAR:				ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISION
DIBJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA			TITULO:	
VERB.							
APROB.							
FABR.							
CAID.					MATERIAL:		
					FEQ:	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1

PLANO 4 PZT EN PARALELO



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:			ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
	NOMBRE	FIRMA	FECHA		TÍTULO:	
DIBUJ.						
VERIF.						
APROS.						
FABR.						
CALID.				MATERIAL:		
				PESO:	ESCALA:1:50	HOJA 1 DE 1

# PLANOS VEHICULO LIGERO



## 25 m del Modulo PZT en la Autopista



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA			TITULO:	
VERIF.							
APROS.							
FABR.							
CAUID.					MATERIAL:	N.º DE DIBUJO	
						Autopista	
					PESO:	ESCALA:1:200	HOJA 1 DE 1
							A3



