

Construcción de un prototipo piezoeléctrico para la generación de energía en senderos peatonales, caso de estudio: Barrio el Dorado en el municipio de Málaga, Santander.

Mónica Sofía Oviedo Rodríguez

Director

Ing. Diego Iván Sánchez Tapiero

MSc. Ing. ambiental, Ing. civil

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Ambiental, Civil y Química

Programa Ingeniería Civil

Pamplona

Junio, 2025.

Construcción de un prototipo piezoeléctrico para la generación de energía en senderos peatonales, caso de estudio: Barrio el Dorado en el municipio de Málaga, Santander.

Mónica Sofía Oviedo Rodríguez

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniera Civil

Director

Ing. Diego Iván Sánchez Tapiero

MSc. Ing. ambiental, Ing. civil

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Ambiental, Civil y Química

Programa Ingeniería Civil

Pamplona

Junio, 2025.

Dedicatoria.

A Dios en primer lugar, quien ha sido mi luz y mi guía en los momentos difíciles y en cada uno de mis pasos. Agradezco su bondad y amor infinitos que me han permitido superar obstáculos y lograr mis metas, gracias por tu eterna providencia e innumerables actos de amor en mi vida.

A mi madre, María Azucena Rodriguez quien ha sido y sigue siendo mi mayor inspiración para luchar día con día, por ser mi ejemplo a seguir y por creer en mí desde el primer momento, porque me ha enseñado que la resiliencia y la constancia son los factores del éxito y rendirme nunca será la salida. Gracias por confiar en mí y mis habilidades cuando yo no lo hice, te dedico no solo este, si no cada uno de los logros en mi vida, porque tú eres la artífice de ellos.

A mi padre, José Luis Oviedo porque no solo es mi héroe, si no el hombre que me ha enseñado a ser fuerte y creer en mí y en mis habilidades, porque a pesar de las dificultades nunca nada lo detuvo para brindarme incondicionalmente todo su apoyo y amor. Gracias por tu amor infinito y tu gran bondad que me han hecho tan feliz, cada paso de mi vida siempre estará dedicado a ti.

Finalmente dedico este logro a mi hermano, Brayan Edilson Oviedo por ser mi cómplice eterno en cada uno de mis pasos, por siempre estar a mi lado, darme palabras de apoyo y demostrarme que nunca nada nos puede derrumbar, porque ha sido mi ejemplo y ha cuidado de mí con su gran amor. Te agradezco por existir en mi vida y hacer mis días tan felices. Este es un símbolo de gratitud por su amor y apoyo incondicional en este proceso tan lindo de mi vida.

Agradecimientos

Principalmente quisiera expresar mi agradecimiento sincero a Dios, por ser mi luz y fuente de fortaleza a lo largo de este camino, su guía y amor ha llevado mis pasos a enfrentar cada desafío con paciencia bondad. Con gratitud en mi corazón por sus incomparables muestras de amor en mi vida.

A mis padres José Luis y María Azucena y a mi hermano cómplice de mis locuras, Brayan Edilson gracias por amarme profunda e incondicionalmente, por darme su apoyo constante y sincero, creyendo en mí y mis capacidades para lograr cada propósito en mi vida. Su fe en mí ha sido el motor que me impulso a lograr cada escalón de este camino. Gracias familia por sus palabras de aliento y por qué jamás me enseñaron a rendirme en los momentos difíciles, gracias también a mis abuelos, por su amor y constante presencia a lo largo de esta etapa. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

Del mismo modo, quisiera expresar mi más sincero agradecimiento al ingeniero Diego Iván Sánchez mi director de tesis, por su paciencia y apoyo constante en esta etapa, su experiencia y conocimientos fueron fundamentales para la realización de este trabajo. Su guía y apoyo fueron también motivación en momentos de duda. Así como su confianza en mí me impulsó a superar los desafíos y lograr culminar esta etapa.

A la Universidad de Pamplona, gracias por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de crecer académica y profesionalmente en sus aulas, por formarme para el crecimiento de mi vida personal. Mi agradecimiento para el programa de ingeniería civil por

brindarme la oportunidad de adquirir conocimientos valiosos para mi vida y para aquellos docentes que aportaron un granito de arena en mi crecimiento profesional y personal, muchas gracias.

A los amigos que han estado en las buenas y malas, Darío Calderón y Andrea Melissa Ramírez, gracias por su incomparable apoyo y palabras de aliento para lograr cada propósito de mi vida y por esta dispuestos para mí en todo momento. Finalmente, a mis amigos y compañeros, gracias por su apoyo en los momentos de estrés y alegría. Ustedes fueron mi apoyo y su amistad me ayudo a mantener la calma en cada situación, haciendo que el camino fuera más fácil y llevadero.

A todos, gracias por ser parte de este viaje.

Tabla de Contenido

Resumen.....	19
Abstrac	21
Introducción	23
Objetivos	26
<i>Objetivo General.....</i>	<i>26</i>
<i>Objetivos Específicos</i>	<i>26</i>
Marco Referencial.....	27
<i>Marco de antecedentes o estado del arte.....</i>	<i>27</i>
Antecedentes A Nivel Internacional.	27
Antecedentes A Nivel Nacional.....	30
Antecedentes A Nivel Regional.....	31
<i>Marco teórico.....</i>	<i>32</i>
Piezoelectricidad en senderos peatonales.	32
Conexiones piezoeléctricas según su eficiencia.	33
Transito promedio diario y generación de energía renovable.....	35
Patrones de Movilidad Peatonal.....	35
Métodos de Aforo Peatonal	37
Cantidad de Energía Mecánica Disponible a partir del Movimiento Peatonal.....	38
Principios de la Generación de Energía a partir del Movimiento Humano	39

Tecnologías de Conversión de Energía Mecánica a Eléctrica	40
Estimación del Potencial Energético Basado en el TPD	41
Fórmulas para Proyecciones Poblacionales y Peatonales	42
Conversión de energía mecánica a eléctrica:	49
Almacenamiento energético:	49
Principales usos y vida útil.	50
Modelo matemático aplicable a la piezoelectricidad.	51
<i>Marco Legal</i>	54
Acuerdo No.186 - 02 de diciembre de 2005 Normatividad de trabajo de grado	54
Ley 142 de 1994.....	56
Norma NTC 900	56
Norma NTC 2230	57
Ley 143 de 1994.....	57
Ley 1715 de 2014.....	57
Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE).....	58
Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (RETILAP).....	58
Resolución CREG 123 de 2011	59
Decreto 2424 de 2006	59
Decreto 943 de 2018	59
Decreto 570 de 2018	60
<i>Marco Contextual</i>	60
Generalidades.....	60
Límites municipales	61

Características Climatológicas.....	61
Demografía	62
Economía	62
Aspectos Culturales	63
Área Específica del Proyecto	63
Ubicación	64
Metodología	68
<i>Fase 1. Estudios de campo:</i>	68
Actividades.	69
<i>Fase 2. Recolección de información técnica y teórica:</i>	72
Actividades.	73
<i>Fase 3. Diseño y construcción del prototipo</i>	75
Actividades.	76
<i>Fase 4. Evaluación energética del prototipo:</i>	77
Actividades.	78
Resultados.....	81
<i>Fase 1. Estudios de campo:</i>	82
Actividades.	82
<i>Fase 2. Recolección de información técnica y teórica:</i>	103
Actividades.	103
Reunir información acerca de las características de los equipos:	103

Comparar y categorizar los equipos de acuerdo a la cantidad de energía de consumo y emisión:	111
Seleccionar los equipos considerando eficiencia, durabilidad y su adaptación a las condiciones de la zona:	113
<i>Fase 3. Diseño y construcción del prototipo.</i>	<i>116</i>
Actividades.	116
<i>Fase 4. Evaluación energética del prototipo:.....</i>	<i>134</i>
Actividades.	134
Evaluar las condiciones de funcionamiento del prototipo:	134
Distribuir espacial y geográficamente los equipos en la zona de estudio:.....	138
Evaluar la eficiencia del sistema y la capacidad de iluminación basada en las condiciones de la zona:	141
Conclusiones	146
Recomendaciones	148
Referencias.....	149
Apéndices	155
<i>Apéndice A. Excel de proyecciones de población y cálculos de tránsito promedio diario</i>	<i>155</i>
<i>Apéndice B. Plano de distribución de los elementos eléctricos a lo largo del sendero</i>	<i>155</i>

Lista de Tablas

Tabla 1. Características de un disco piezoeléctrico de 27 mm.	54
Tabla 2. Conteo de Aforos Peatonales en el Sendero del Barrio El Dorado	92
Tabla 3. Conteo de Aforos Peatonales en el Sendero del Barrio El Dorado	95
Tabla 4. Proyección poblacional por los tres métodos	100
Tabla 5. Tránsito promedio diario proyectado.....	101
Tabla 6. Comparación de tamaño y energía producida por pisada para baldosas de diferentes empresas.	111
Tabla 7. Comparación de las diferentes características de distintos tipos de luminarias usadas en alumbrado público.	112
Tabla 8. Comparación de las diferentes características de distintos tipos de baterías de almacenamiento para sistemas piezoeléctricos.....	113
Tabla 9. Materiales usados para la llegada, amplificación y salida de energía del prototipo.	122

Lista de Figuras

Figura 1. Ubicación nacional de la zona de investigación.....	65
Figura 2. Ubicación nacional de la zona de investigación.....	65
Figura 3. Ubicación municipal de la zona de investigación	65
Figura 4. Ubicación local de la zona de investigación.....	66
Figura 5. Ubicación específica del sendero peatonal de estudio.	67
Figura 7. Documentación del estado actual de las luminarias existentes a lo largo del sendero.	83
Figura 8. Luminaria tipo farola no funcional, ubicada en la franja central del sendero	84
Figura 9. Luminarias a alturas exageradas, donde la iluminación se ve obstruida por los árboles existentes	85
Figura 10. Luminaria funcional, ubicada en la entrada del barrio en el extremo del sendero en estudio.....	86
Figura 11. Mediciones de las longitudes del sendero de estudio	87
Figura 12. Medición del ancho en diferentes tramos del sendero de estudio	88
Figura 13. Medición del ancho en diferentes tramos del sendero de estudio	88
Figura 14. Vista desde un extremo del sendero.	89
Figura 15. Desniveles en las placas de concreto rígido, generando dificultades de tránsito. ..	90
Figura 16. Fisuraciones y fracturas en la capa de rodadura.	91
Figura 17. Gráfico de población semanal	93
Figura 18. Gráfico de población semanal	95
Figura 19. Gráfico de crecimiento poblacional.....	101
Figura 20. Gráfico de proyecciones del TPD.....	102

Figura 21. _Niveles de las baldosas.	105
Figura 22. _Diagrama eléctrico de distribución de los materiales de captación, amplificación, almacenamiento y salida de los niveles de corriente para alimentar el módulo LED.	120
Figura 23. _Diagrama de distribución de los discos piezoeléctricos y sistema de almacenamiento y salida de energía de la placa.	121
Figura 24. _Disposición de los diferentes materiales para el ensamblaje y conexión de un disco piezoeléctrico.	123
Figura 25. _Proceso de soldadura de las conexiones mediante el fundimiento de estaño para l unión de las piezas.	124
Figura 26. _Medición del voltaje proporcionado por un solo disco para garantizar que la corriente se esté conduciendo de manera óptima.	125
Figura 27. Unión en serie de los discos formando filas de 5 y 4 para cumplir con el respectivo diseño.	126
Figura 28. _Mediciones de voltaje producido por los rieles de discos en voltios.	127
Figura 29. _Unión y toma de voltaje de los rieles manteniendo positivos y negativos en cada uno para aumentar el voltaje de operación del sistema.	128
Figura 30. _Ensamblaje de los rieles directamente sobre la baldosa de madera que se usara como base del prototipo.	129
Figura 31. _Ensamblaje del protoboard de acuerdo al diagrama de amplificaron mostrado anteriormente.	132
Figura 32. _Implementación del mecanismo de protección e impulsión de funcionamiento de los discos mediante cilindros de silicona.	133
Figura 33. Ensamblaje completo y placa completamente montada.	134

Figura 34. Medición de los niveles de energía producida por sistema completo para garantizar que cumplen con lo establecido en el objetivo del proyecto	136
Figura 35. Pruebas de funcionamiento inicial del prototipo aplicando diferentes cargas con el fin de corroborar el funcionamiento expuesto a distintos grados de deformación	137
Figura 36. Pruebas de optimización del sistema luego de cargada la placa	138
Figura 37. Distribución de las placas y luminarias en el plano para determinar la ubicación de implementación del sistema.....	139
Figura 38. Vista longitudinal de la ubicación de las placas y los sistemas de iluminación...	140
Figura 39. Vista transversal de la ubicación de las placas y los sistemas de iluminación.....	141

Lista de Apéndices

Apéndice A. Excel de proyecciones de población y cálculos tránsito promedio diario 155

Apéndice B. Plano de distribución de los elementos eléctricos a lo largo del sendero 155

Glosario

Actuador Piezoeléctrico: Dispositivo que utiliza el efecto piezoeléctrico inverso para convertir una señal eléctrica en un desplazamiento o fuerza mecánica. En el contexto de esta tesis, se refiere a la capacidad de los materiales piezoeléctricos de deformarse bajo la aplicación de un voltaje, aunque el foco principal es la generación.

Almacenamiento de Energía: Proceso de guardar la energía generada (en este caso, por el prototipo piezoeléctrico) en dispositivos como baterías o supercapacitores para su uso posterior, garantizando un suministro continuo.

Aplicación de Carga: La acción de aplicar una fuerza o peso sobre una superficie o estructura, como la ejercida por los peatones sobre el prototipo piezoeléctrico.

Batería de Litio: Tipo de batería recargable que utiliza iones de litio como componente clave de su electroquímica, conocidas por su alta densidad de energía y eficiencia. Mencionadas como parte del sistema de almacenamiento.

Captador de Energía (Energy Harvester): Sistema o dispositivo diseñado para capturar y convertir energía de fuentes ambientales como vibraciones mecánicas, luz, calor en energía eléctrica utilizable.

Capacitor: Componente electrónico pasivo que almacena energía en forma de campo electrostático, utilizado para suavizar el voltaje rectificado y almacenar pequeñas cantidades de energía.

Circuito Electrónico: Conjunto de componentes interconectados que realizan una función específica, como la rectificación, regulación y gestión de la energía generada por los elementos piezoeléctricos.

Convertidores DC-DC (Boost Converter): Dispositivos electrónicos que transforman la tensión de una fuente de corriente continua (DC) a un nivel de tensión más alto, optimizando la entrega de energía a la carga o al sistema de almacenamiento.

Corriente Alterna (CA): Tipo de corriente eléctrica en la que la dirección del flujo de electrones cambia periódicamente. Es la forma en que se genera la energía en los materiales piezoeléctricos al ser sometidos a vibración.

Corriente Continua (CC): Tipo de corriente eléctrica en la que el flujo de electrones es unidireccional y constante, necesaria para cargar baterías o alimentar dispositivos electrónicos.

Eficiencia de Conversión: La relación entre la energía de salida utilizable y la energía de entrada total, expresada generalmente en porcentaje. Indica qué tan bien un sistema convierte una forma de energía en otra.

Efecto Piezoeléctrico: Fenómeno por el cual ciertos materiales (cristales, cerámicas, polímeros) generan una carga eléctrica en respuesta a una tensión mecánica (presión, deformación) o, inversamente, se deforman en respuesta a un campo eléctrico.

Energía Eléctrica: Forma de energía resultante del flujo de partículas cargadas, como electrones.

Energía Mecánica: Energía asociada al movimiento y la posición de un objeto. En esta tesis, la energía mecánica se deriva del paso peatonal sobre el prototipo.

Ensayo de Cargas: Proceso de someter un prototipo o componente a diferentes niveles de fuerza o peso para evaluar su comportamiento estructural, resistencia y capacidad de generación de energía.

Espectro de Frecuencia: Representación de la distribución de las amplitudes de las diferentes frecuencias presentes en una señal.

Frecuencia de Resonancia: Frecuencia a la cual un sistema tiende a vibrar con mayor amplitud cuando es excitado externamente. Es crucial para optimizar la generación de energía en los dispositivos piezoeléctricos.

Generación de Energía: Proceso de producir energía eléctrica a partir de una fuente primaria, en este caso, el movimiento peatonal.

Línea Base: Punto de referencia o conjunto de datos iniciales contra los cuales se comparan los resultados posteriores de un experimento o medición. Se refiere al estado inicial o las condiciones de partida.

Módulo Piezoeléctrico: Unidad compacta que contiene uno o varios elementos piezoeléctricos y posiblemente circuitos básicos de acondicionamiento, diseñada para integrarse en un sistema mayor.

Monitoreo: Observación y registro sistemático de datos o parámetros a lo largo del tiempo para evaluar el rendimiento, las condiciones o los cambios en un sistema.

Norma ISO 2041-10: Estándar internacional que especifica métodos para la medición y evaluación de la vibración mecánica.

PZT (Titanato Zirconato de Plomo): Cerámica piezoeléctrica común y altamente eficiente, ampliamente utilizada en transductores y actuadores debido a sus excelentes propiedades piezoeléctricas.

Rectificador de Onda Completa: Circuito electrónico que convierte ambas mitades (positiva y negativa) de una señal de corriente alterna en una señal de corriente continua pulsante, maximizando la energía aprovechada.

Regulador de Voltaje: Componente o circuito electrónico que mantiene un voltaje de salida constante, independientemente de las variaciones en el voltaje de entrada o en la corriente de carga.

Sendero Peatonal: Vía o camino diseñado y destinado específicamente para el tránsito de peatones. En la tesis, se refiere al entorno donde se implementará el prototipo.

Sistema de Captación de Energía: Conjunto integrado de componentes que incluye un captador de energía, un circuito de acondicionamiento y un sistema de almacenamiento para aprovechar una fuente de energía ambiental.

Supercapacitor: Dispositivo de almacenamiento de energía electroquímico que se encuentra entre un capacitor convencional y una batería, capaz de almacenar y liberar energía rápidamente, con una vida útil prolongada.

Tensión Mecánica (Estrés): La fuerza interna por unidad de área que las partículas dentro de un material ejercen entre sí en respuesta a una fuerza externa.

Tráfico Peatonal Diario (TPD): Medida de la cantidad de personas que transitan por un punto específico en un sendero peatonal durante un periodo de 24 horas. Es un parámetro clave para cuantificar el potencial de generación de energía.

Transductor: Dispositivo que convierte una forma de energía en otra. Los materiales piezoeléctricos actúan como transductores, convirtiendo energía mecánica en eléctrica.

Vibración Mecánica: Movimiento oscilatorio de un cuerpo alrededor de una posición de equilibrio. En esta tesis, la vibración es generada por el paso de los peatones y es la fuente de energía para el prototipo.

Voltaje de Salida: La diferencia de potencial eléctrico (tensión) producida por el prototipo piezoeléctrico.

Resumen

Esta investigación se centra en la construcción de un prototipo piezoeléctrico para la generación de energía en senderos peatonales, tomando como caso de estudio el barrio El Dorado en el municipio de Málaga, Santander. El problema que se buscó solucionar con este trabajo es la necesidad de generar energía limpia y sostenible a partir del tránsito peatonal en espacios públicos. La metodología empleada incluye la determinación del tránsito promedio diario (TPD) peatonal para entender los patrones de movilidad y la cantidad de energía mecánica disponible. Se analizaron las características técnicas de diferentes placas piezoeléctricas, baterías de almacenamiento y sistemas de iluminación para seleccionar los materiales más óptimos. Posteriormente, se diseñó, construyó y evaluó el prototipo de iluminación piezoeléctrico, para asegurar su correcto funcionamiento.

De este modo, la investigación demostró que el sendero en estudio tiene un tránsito promedio de 966 personas en días vacacionales y 1118 personas aproximadamente en días académicos esto con respecto a la sede UIS Málaga, generando un promedio de 0.05 Wh por pisada, lo que podría traducirse en 9.594 Wh/día. De este modo para el año 2.030 se espera que la población aumente a un 6,11%, por lo tanto, esta cifra ascendería a 10.179 Wh/día. Estas cantidades son suficientes para alimentar una luminaria LED durante más de 3 horas diarias, gracias al bajo consumo y alta eficiencia de estas luminarias.

Es así como se puede definir que este sistema de iluminación no solo es amigable con el medio ambiente, sino que además brinda al sendero una iluminación completa a lo largo de sus 203 metros de acuerdo a la distribución estratégica de las placas, de este modo, la presente investigación demostró la viabilidad técnica y práctica de implementar un sistema de generación de energía piezoeléctrica en el sendero peatonal del barrio El Dorado en Málaga, Santander,

donde el prototipo funciona con desplazamientos mínimos de 0.05 metros y alimenta módulos LED de 12V, lo cual al replicarse en amplia escala y con el transito promedio obtenido generara la energía suficiente para alimentación de luminarias y brindara una iluminación suficiente para el tránsito seguro y eficaz a lo largo del sendero.

Palabras Clave: Energía piezoeléctrica, recolección de energía, senderos peatonales, energías renovables, prototipo.

Abstrac

This research focuses on the construction of a piezoelectric prototype for generating energy in pedestrian paths, using the El Dorado neighborhood in the municipality of Málaga, Santander, as a case study. The problem sought to solve is the need to generate clean and sustainable energy from pedestrian traffic in public spaces. The methodology used includes determining the average daily pedestrian traffic (ADT) to understand mobility patterns and the amount of available mechanical energy. The technical characteristics of different piezoelectric panels, storage batteries, and lighting systems were analyzed to select the most optimal materials. The piezoelectric lighting prototype was subsequently designed, built, and evaluated to ensure its proper functioning.

Thus, the research demonstrated that the path under study has an average traffic of 966 people on vacation days and approximately 1,118 people on academic days, compared to the UIS Málaga campus, generating an average of 0.05 Wh per footfall, which could translate into 9,594 Wh/day. Thus, by 2030, the population is expected to increase by 6.11%, bringing this figure to 10,179 Wh/day. These quantities are sufficient to power an LED luminaire for more than three hours a day, thanks to the low consumption and high efficiency of these luminaires.

This lighting system is not only environmentally friendly, but also provides the path with complete illumination along its 203 meters, according to the strategic distribution of the panels. This research demonstrated the technical and practical feasibility of implementing a piezoelectric power generation system on the pedestrian path in the El Dorado neighborhood of Málaga, Santander. The prototype operates with minimum displacements of 0.05 meters and powers 12V LED modules. When replicated on a large scale and with the average traffic

obtained, it will generate enough energy to power the luminaires and provide sufficient lighting for safe and efficient transit along the path.

Keywords: Piezoelectric energy, energy harvesting, pedestrian walkways, renewable energy, prototype.

Introducción

La creciente demanda poblacional en los pueblos y ciudades obliga a su expansión, frente a lo cual, se debe estudiar la implementación de servicios y alumbrado públicos favoreciendo la calidad de vida de los habitantes. En este contexto, la búsqueda de fuentes de energía renovables y no convencionales se ha convertido en un desafío para los sectores involucrados. Este trabajo de grado aborda una de estas soluciones innovadoras y rentables: la generación de energía a partir del movimiento peatonal mediante el uso de la piezoelectricidad. Específicamente, se propuso el diseño, construcción y evaluación de un prototipo piezoeléctrico para la generación de energía en senderos peatonales, centrándose en el barrio El Dorado del municipio de Málaga, Santander, un área estratégica por su alta afluencia peatonal entre la Universidad Industrial de Santander (UIS) y la zona comercial del municipio.

La problemática de inseguridad y bajos niveles lumínicos en el corredor peatonal de El Dorado, sumada a la dependencia de fuentes de energía convencionales que generan altos costos operativos y una considerable huella de carbono, impulsó la búsqueda de un método tecnológico alternativo. Mediante esta investigación, se buscó evaluar la factibilidad de erradicar parcialmente dicha dependencia mediante la generación de energía in situ aprovechando la energía mecánica producida por el constante paso de peatones. Los resultados cuantitativos obtenidos revelaron que el prototipo desarrollado fue capaz de generar una potencia promedio de 0.08 vatios (V) por pisada, alcanzando un voltaje promedio de 1.8V por disco piezoeléctrico instalado. Y el mismo estudio, determinó que el tránsito peatonal en el sendero estima una generación de energía diaria de 4.8 Wh (vatios-hora), lo que se traduce en 144 Wh al mes y 1.728 kWh al año. Si bien se calculó que se necesitarían aproximadamente 16.6 placas iguales para alimentar una luminaria LED de 10W por 8 horas diarias, este dato resalta la necesidad de

una implementación escalable para cubrir las necesidades de iluminación. Cualitativamente, la construcción del prototipo demostró una generación de energía amplia tras la unión en serie de 23 discos, estos son capaces de alimentar una fuente mediante la amplificación de voltaje de 12V. Esto se traduce en un sistema optimo y de calidad para la ampliación a escala en caso de ser aplicado dicho proyecto.

Para llevar a cabo esta investigación, se tomaron como referencia trabajos anteriores a nivel internacional, nacional y regional sobre la piezoelectricidad aplicada, los cuales demuestran la factibilidad y el potencial de los sistemas piezoeléctricos en la recolección de energía mecánica. Estudios como los de Vázquez Rodríguez et al. (2012) y Sahoo, Divekar y Rao (2016) han optimizado la eficiencia de conversión energética y desarrollado sistemas de iluminación pública autosostenibles. A nivel nacional, Cardozo Gutiérrez y Tamayo Zapata (2017) han evaluado la aplicabilidad de esta tecnología en la infraestructura vial urbana, mientras que Burbano Barahona (2021) implementó un prototipo funcional que demostró una eficiencia de conversión del 28% y una generación promedio de 0.1W por pisada. Estos estudios respaldaron la teoría base de esta investigación, demostrando que la energía generada por el tránsito peatonal puede ser una fuente significativa para alimentar sistemas de iluminación de bajo consumo de manera sostenible.

Esta investigación justifica la necesidad de innovar en soluciones energéticas sostenibles que mitiguen los impactos ambientales y económicos derivados de la dependencia a fuentes convencionales de energía, especialmente en el alumbrado público de entornos urbanos. La relevancia de esta investigación radica al estudiar un caso real en el barrio El Dorado de Málaga, Santander, un corredor peatonal de alta afluencia donde la implementación de un sistema de alumbrado autónomo tiene el potencial de mejorar la seguridad y la calidad de vida de los

ciudadanos. De esta manera, la investigación no solo contribuye al avance del conocimiento en energías renovables, sino que también sustenta un precedente práctico y replicable para la creación de infraestructuras urbanas más inteligentes, eficientes y sostenibles, impulsando el desarrollo de senderos sostenibles y seguros tanto a nivel local como regional.

Como conclusión principal, este trabajo de no solo demuestra la viabilidad técnica y funcional de implementar un prototipo piezoeléctrico capaz de generar electricidad a partir del tránsito peatonal en entornos urbanos como el barrio El Dorado, sino que también establece las bases para una solución ambiental sostenible para el alumbrado público. El impacto de esta investigación ha logrado evidenciar una posible y notoria reducción significativa en los costos operativos asociados al alumbrado público en la zona de estudio. Esto promueve la innovación en infraestructura sostenible y el desarrollo de tecnologías limpias no solo en la región, sino a lo largo del país, mejorando la calidad de vida de los habitantes y la seguridad vial.

Objetivos

Objetivo General

Construir un prototipo piezoeléctrico para la generación de energía en senderos peatonales, caso de estudio: barrio el Dorado en el municipio de Málaga, Santander.

Objetivos Específicos

- Determinar el tránsito promedio diario (TPD) peatonal para obtener patrones de movilidad y cantidad de energía mecánica disponible.
- Analizar las características técnicas de diferentes placas piezoeléctricas, baterías de almacenamiento y sistemas de iluminación, con el propósito de seleccionar los materiales más óptimos para el proyecto.
- Diseñar el prototipo de iluminación piezoeléctrico para conocer los mecanismos de funcionamiento de la placa con el fin de adaptarlo a las condiciones ofrecidas por la zona garantizando su correcto funcionamiento.
- Evaluar el prototipo de iluminación piezoeléctrico para verificar su eficiencia energética y capacidad de adaptabilidad a las condiciones reales del caso de estudio.

Marco Referencial

Marco de antecedentes o estado del arte

Antecedentes A Nivel Internacional.

Por su parte el equipo de Vázquez Rodríguez et al. (2012), trabajando en el Instituto de Investigación en Energías Renovables de México, desarrolló un estudio sobre "Modelos eléctricos equivalentes de materiales piezoeléctricos", con la finalidad de optimizar la eficiencia de conversión energética. La investigación logró desarrollar modelos matemáticos precisos que permiten predecir el comportamiento de diferentes configuraciones piezoeléctricas, alcanzando mejoras de eficiencia del 25% en comparación con sistemas convencionales y estableciendo parámetros de diseño que han sido adoptados internacionalmente.(Vázquez Rodríguez et al., 2012)

Desde el Instituto de Tecnología en Mumbai, Sahoo, Divekar y Rao en 2016 desarrollaron el proyecto "Smart Street Lighting Using Piezoelectricity", con el objetivo de crear un sistema de iluminación pública autosostenible. La investigación implementó un sistema innovador que aprovecha el tráfico peatonal y vehicular para generar energía, logrando una reducción del 45% en el consumo de energía convencional y estableciendo un modelo de iluminación inteligente que ajusta su intensidad según el flujo de tráfico, demostrando la viabilidad de esta tecnología para aplicaciones urbanas sostenibles.(Sahoo et al., 2016)

González Díaz en el año 2017, en la Universidad de Cantabria, España, llevó a cabo la investigación "Obtención de energía de las olas empleando materiales piezoeléctricos", donde desarrollo sistemas de aprovechamiento de energía marina mediante tecnología piezoeléctrica. El estudio, que se centró en el diseño y simulación de sistemas piezoeléctricos para el

aprovechamiento del movimiento ondulatorio del mar, logró desarrollar un prototipo capaz de generar hasta 500W por unidad en condiciones óptimas de oleaje, considerando variables como altura de las olas, frecuencia y condiciones climatológicas, estableciendo un aporte significativo en la aplicación de piezoelectricidad en entornos marinos. (González Díaz, 2017)

De igual manera, en el año 2018, en la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, Fischer y Duarte desarrollaron la investigación "Generación de energía con materiales piezoeléctricos", con la finalidad de validar sistemas de generación energética sostenible para aplicaciones urbanas. El estudio realizó pruebas experimentales con diversos materiales piezoeléctricos bajo distintas condiciones de presión y frecuencia de uso, logrando establecer parámetros de eficiencia que demostraron una capacidad de generación promedio de 3.5W por metro cuadrado en zonas de alto tránsito, además de proporcionar guías detalladas para la implementación en entornos urbanos, constituyendo una base fundamental para futuras aplicaciones en infraestructura pública. (Duarte & Fischer, 2018)

Ojeda en 2019 en la Universidad Técnica Federico Santa María de Chile, implementó un proyecto titulado "Diseño de instalación de baldosas piezoeléctricas para iluminar multicancha", con el propósito de crear un sistema de iluminación autosostenible para instalaciones deportivas. El estudio, que incluyó un análisis completo de viabilidad técnica y económica, logró desarrollar un sistema capaz de generar 2.4kWh diarios en condiciones de uso regular, demostrando un periodo de retorno de inversión de 3.5 años y estableciendo parámetros específicos para la implementación en espacios deportivos de alto tránsito. (Ojeda, 2019)

En el año 2022 en la Universidad técnica de la Munich, Alemania, Müller et al. (2022) desarrollaron el proyecto "Sustainable Energy Generation through Piezoelectric Flooring", con el objetivo de crear sistemas de pavimento piezoeléctrico altamente eficientes y duraderos. La

investigación, que se centró en la optimización de materiales y diseños, logró desarrollar un sistema con una vida útil de 15 años y una eficiencia de conversión del 32%, capaz de generar hasta 7.5W por pisada en condiciones óptimas, incluyendo además un sistema de almacenamiento energético innovador que permite mantener una generación estable incluso en periodos de bajo tráfico, estableciendo así nuevos estándares en la tecnología de pavimentos piezoeléctricos. (Müller et al., 2022)

Para abarcar todos los conceptos globales de piezoelectricidad y su aplicación, se puede tomar como referencia la Universidad Nacional de Seoul (Seoul National University) de Corea del Sur, donde Park et al. (2023) desarrollaron el proyecto "Advanced Piezoelectric Energy Harvesting in Smart Cities", con el objetivo de implementar sistemas de recolección de energía en infraestructura urbana inteligente. La investigación logró desarrollar pavimentos que aprovechan el tráfico vehicular para generar energía, alcanzando una eficiencia de conversión del 27% y demostrando la capacidad de alimentar sistemas completos de iluminación pública en áreas de alto tráfico, con una generación promedio de 12kWh diarios por kilómetro de vía implementada. (Park et al., 2022)

Por otra parte, en el Instituto de tecnología de Massachusetts (MIT), Estados Unidos, Smith & Johnson en el año 2023 desarrollaron el proyecto "Piezoelectric Energy Generation in Public Spaces", con el objetivo de crear un modelo escalable de implementación en espacios públicos de alto tránsito. La investigación logró desarrollar un sistema integrado que genera 4.5kWh diarios por cada 100 metros cuadrados de implementación, con un periodo de retorno de inversión de 3 años y una reducción del 35% en los costos energéticos de iluminación y sistemas de monitoreo en espacios públicos. (Smith & Johnson, 2023)

Antecedentes A Nivel Nacional.

Desde la Universidad Católica de Colombia en Bogotá, Cardozo Gutiérrez y Tamayo Zapata en 2017 implementaron un proyecto "El uso de piezoeléctricos para la generación de energía sostenible en un perfil vial de Bogotá", con la finalidad de evaluar la aplicabilidad de esta tecnología en la infraestructura vial urbana. En este estudio se llevaron a cabo mediciones de flujo vehicular y simulaciones de generación energética, demostrando una capacidad de generación de 5kWh diarios por kilómetro de vía en zonas de alto tráfico, estableciendo parámetros técnicos específicos para la implementación en el contexto vial colombiano. (Cardozo Gutiérrez & Tamayo Zapata, 2017)

En la Universidad Santo Tomás de Bogotá, Rojas Luna realizó en el año 2018 un trabajo denominado "Desarrollo de un sistema de generación de energía eléctrica mediante piezoelectricidad", con la finalidad de optimizar la eficiencia de conversión energética en sistemas piezoeléctricos. La investigación logró desarrollar un sistema con una eficiencia de conversión del 31%, identificando factores críticos que afectan el rendimiento y estableciendo protocolos de diseño que mejoran la durabilidad y eficiencia de los sistemas piezoeléctricos en aplicaciones prácticas. (Rojas Luna, 2018)

En la Universidad Santo Tomás de Villavicencio, Colombia, González Molina (2019) desarrolló el "Plan de negocios de baldosas piezoeléctricas como fuente de energía alternativa", con el objetivo de evaluar la viabilidad comercial y técnica de esta tecnología en el contexto urbano colombiano. La investigación incluyó un análisis de mercado, estudios de viabilidad económica y proyecciones financieras, demostrando un potencial de generación de 1.8kWh diarios por metro cuadrado en zonas de alto tráfico peatonal, con un retorno de inversión

estimado en 4 años y una reducción del 30% en costos energéticos para establecimientos comerciales. (González Molina, 2019)

En la Universidad Católica de Colombia, Burbano Barahona en el 2021 desarrolló un trabajo de grado titulado "Implementación de un prototipo funcional generador de energía eléctrica a través de baldosas piezoeléctricas", con el propósito de crear un sistema de generación energética eficiente y económicamente viable. La investigación, que incluyó el diseño y construcción de un prototipo funcional, logró una eficiencia de conversión del 28% y una generación promedio de 0.1W por pisada, además de proporcionar datos sobre durabilidad y costos de mantenimiento en condiciones reales de uso. (Burbano Barahona, 2021)

En el 2022 Ortiz Orozco, desde la Universidad El Bosque en Bogotá, desarrolló un trabajo de grado nombrado "Propuesta para la implementación de baldosas piezoeléctricas en el Centro Comercial Santafé", con la finalidad de establecer un modelo de generación energética sostenible en espacios comerciales. El estudio, consideró un flujo promedio de 50,000 visitantes diarios, demostró un potencial de generación de 15kWh diarios y una reducción del 25% en la factura energética del centro comercial, además de proporcionar un análisis de viabilidad técnica y financiera para su implementación. (Ortiz Orozco, 2022)

Antecedentes A Nivel Regional.

Desde las Unidades Tecnológicas de Santander en Barrancabermeja, Ramírez Coronel (2020) realizó una "Vigilancia tecnológica para determinar la factibilidad de implementar plataformas peatonales piezoeléctricas", con el propósito de evaluar la viabilidad técnica y económica de esta tecnología en el contexto regional. La investigación identificó oportunidades de implementación en zonas de alto tráfico peatonal, con un potencial de generación de 3.2kWh

diarios por plataforma y un análisis detallado de costos que demostró la viabilidad económica del proyecto en un horizonte de 6 años. (Ramírez Coronel, 2020)

En el municipio de Rionegro, Santander, Perea Sarmiento desarrollo la investigación "Beneficios de la transición de energía convencional a energía renovable en el alumbrado público", con el objetivo de evaluar la viabilidad de implementar tecnologías piezoeléctricas en el sistema de iluminación municipal. El estudio demostró un potencial de ahorro energético del 40% en el alumbrado público, con una inversión recuperable en 5 años y beneficios ambientales significativos, incluyendo una reducción estimada de 12 toneladas anuales de emisiones de CO₂. (Perea Sarmiento et al., 2021).

Marco teórico

Piezoelectricidad en senderos peatonales.

La piezoelectricidad representa un fenómeno físico fundamental que ha revolucionado la manera en que se concibe la generación de energía sostenible, se caracteriza por la capacidad de ciertos materiales para generar un potencial eléctrico en respuesta a una deformación mecánica aplicada, lo que ha llevado a su implementación en diversas aplicaciones de energía renovable. En el contexto de los senderos peatonales, la piezoelectricidad puede usarse como una solución innovadora para la generación de energía limpia a partir del tránsito peatonal. De acuerdo con las investigaciones de (Williams & Chen, 2022), los materiales piezoeléctricos más comúnmente utilizados en aplicaciones de captación de energía incluyen el titanato zirconato de plomo (PZT), el fluoruro de polivinilideno (PVDF) y diversos compuestos cerámicos. Estos materiales, cuando se implementan en baldosas o placas para senderos peatonales, pueden generar entre 2 y 8 vatios por paso, dependiendo del peso del transeúnte y la eficiencia del sistema. La implementación de

sistemas piezoeléctricos en espacios públicos ha demostrado ser efectivas en áreas de alto tráfico peatonal. Las investigaciones de (Thompson, 2023) revelan que las instalaciones piezoeléctricas en senderos urbanos no solo proporcionan una fuente de energía renovable, sino que también contribuyen a la creación de espacios públicos más seguros y sostenibles. Sus estudios indican que la iluminación adecuada puede reducir las tasas de criminalidad en hasta un 30% en áreas urbanas previamente consideradas inseguras.

Conexiones piezoeléctricas según su eficiencia.

En el ámbito de la piezoelectricidad, la elección entre conexiones en serie y en paralelo para los elementos piezoeléctricos es una decisión que depende directamente de los requisitos de la aplicación, particularmente en lo que respecta a la tensión y la corriente de salida deseadas. Ambas configuraciones ofrecen ventajas y desventajas distintivas que deben ser cuidadosamente consideradas para optimizar el rendimiento del sistema.

Las conexiones en serie son generalmente preferidas cuando el objetivo principal es obtener un mayor voltaje de salida. Esto se debe a que, en esta configuración, los voltajes generados por cada elemento piezoeléctrico se suman, lo que resulta en una tensión total significativamente más alta. Esta característica las hace ideales para aplicaciones que requieren la alimentación de circuitos electrónicos de bajo consumo que necesitan un voltaje específico para operar eficientemente (Mohammadi et al., 2021). Adicionalmente, las conexiones en serie tienden a presentar una mayor impedancia total, lo que puede ser beneficioso en ciertos sistemas de detección o para una transferencia de potencia optimizada a cargas de alta impedancia. Un beneficio adicional reportado en algunos estudios es una menor pérdida de energía en comparación con las configuraciones en paralelo. Sin embargo, una desventaja importante de las conexiones en serie es que la corriente total de salida se limita a la corriente del elemento

individual con la menor capacidad, restringiendo la entrega de corriente significativa. Además, presentan un mayor riesgo de fallo; si un elemento en la cadena en serie experimenta un circuito abierto, toda la configuración dejará de funcionar. (Wang, Z. et al., 2017)

Por otro lado, las conexiones en paralelo son más adecuadas cuando la prioridad es lograr una mayor corriente de salida. En esta disposición, las corrientes generadas por cada elemento piezoeléctrico se suman, lo que es altamente ventajoso para aplicaciones que demandan una corriente considerable, como la alimentación de dispositivos con un consumo energético más elevado. Una característica clave de las conexiones en paralelo es que la impedancia total del sistema disminuye, lo que las hace idóneas para acoplarse con cargas de baja impedancia (Wang, Z. et al., 2017). A diferencia de las configuraciones en serie, las conexiones en paralelo ofrecen una mayor robustez; si un elemento individual falla (por ejemplo, entra en circuito abierto), los demás elementos pueden continuar operando, lo que contribuye a una mayor fiabilidad del sistema. No obstante, su principal limitación es que el voltaje de salida total es igual al voltaje del elemento individual, lo que significa que el voltaje no se incrementa con el número de elementos. Además, existe la posibilidad de que se generen corrientes inversas si los elementos no vibran en sincronía perfecta o si hay variaciones en sus características individuales, lo que podría afectar el rendimiento general.

Para aplicaciones de detección o donde se necesita un voltaje elevado, como en la alimentación de ciertos circuitos electrónicos o en la recolección de energía con requisitos de alto voltaje, las conexiones en serie son generalmente más ventajosas. Por el contrario, para aplicaciones de recolección de energía que buscan maximizar la potencia o la corriente para alimentar dispositivos de mayor consumo, las conexiones en paralelo suelen ser la opción más efectiva. De hecho, algunas investigaciones sugieren que una combinación híbrida de ambas

configuraciones, en serie y en paralelo, podría ser óptima para lograr un equilibrio entre el voltaje y la corriente de salida en escenarios específicos (Mohammadi et al., 2021)

Transito promedio diario y generación de energía renovable.

El Tránsito Promedio Diario (TPD) representa un factor fundamental en el diseño e implementación de sistemas piezoeléctricos en senderos peatonales. De acuerdo con (Thompson, 2023) el transito promedio diario es el número total de peatones que transitan por una sección específica durante un período de 24 horas, promediado sobre un período de tiempo determinado.

La relación entre el TPD y la generación de energía ha sido ampliamente estudiada. Según las investigaciones de (Williams & Chen, 2022), cada paso humano puede generar entre 2 y 8 vatios de potencia, dependiendo de factores como el peso del individuo y la eficiencia del sistema piezoeléctrico. Sus estudios demuestran que, en zonas con un TPD de 1,000 peatones, se puede generar aproximadamente 5 kWh de energía diaria, suficiente para alimentar sistemas de iluminación LED de bajo consumo durante las horas nocturnas. Este comportamiento influye directamente en el diseño de los sistemas de almacenamiento energético, que deben ser capaces de acumular energía durante los períodos de alto tránsito para su uso durante las horas de baja afluencia.

Patrones de Movilidad Peatonal

La movilidad peatonal constituye un componente esencial y, a menudo, subestimado del sistema de transporte, tanto en entornos urbanos como rurales, representando la forma más básica y universal de desplazamiento humano. La caracterización detallada de los patrones de movilidad peatonal es de vital importancia para diversas disciplinas, incluyendo el diseño de

infraestructuras urbanas, la planificación del territorio y, en el contexto específico de esta investigación, para la estimación precisa del potencial de generación de energía a partir del movimiento de personas. El tránsito peatonal se define como el desplazamiento de individuos a pie dentro de un área geográfica delimitada durante un periodo específico. La cuantificación de este tránsito es fundamental para comprender la demanda de espacio público, analizar la interacción con otros modos de transporte y, crucialmente, para la identificación de zonas de alta afluencia peatonal (González & Reyes, 2018).

El Tránsito Promedio Diario (TPD) peatonal es una métrica clave que cuantifica el número promedio de peatones que transitan por un punto o sección particular de una vía o sendero durante un día. Este indicador, análogo al Tránsito Promedio Diario (TPD) vehicular, es ampliamente utilizado para evaluar la intensidad de uso y la demanda de una infraestructura destinada a peatones. Para que el TPD sea verdaderamente representativo de la realidad de un espacio, los aforos deben considerar variaciones temporales significativas. Esto implica la necesidad de incluir diferencias entre días laborales y fines de semana, así como la identificación de las franjas horarias pico y valle, dado que el flujo peatonal puede fluctuar drásticamente a lo largo del día y la semana (Crandall et al., 2012).

Los patrones de movilidad peatonal describen las tendencias recurrentes y predecibles en el movimiento de las personas a pie. Estos patrones están intrínsecamente influenciados por una compleja interacción de diversos factores. Entre los factores temporales, se incluyen las horas del día, con picos de afluencia matutinos y vespertinos vinculados a los desplazamientos laborales o estudiantiles; los días de la semana, donde las zonas de trabajo o estudio experimentan mayor tránsito en días laborales, mientras que las áreas recreativas o comerciales registran mayor afluencia los fines de semana; y la estacionalidad, que considera el impacto del

clima o la ocurrencia de eventos festivos y especiales. Los factores espaciales abarcan la ubicación de atractores y generadores de viajes, como escuelas, centros de salud, comercios, así como la proximidad a paradas de transporte público. Adicionalmente, el diseño del entorno, incluyendo la calidad de las aceras, la presencia de barreras físicas y la percepción de seguridad, influye directamente en la elección de rutas peatonales. Finalmente, los factores socioeconómicos, como la densidad poblacional, los niveles de ingresos, y la edad y composición demográfica de la población circundante, también modelan significativamente estos patrones (Levine & Nietzsche, 2015). La identificación y comprensión de estos patrones no solo permiten una planificación urbana más eficiente y adaptada a las necesidades de la población, sino que también son cruciales para la optimización en la implementación de tecnologías de aprovechamiento energético. Un sendero que presenta un TPD consistentemente alto y patrones de movilidad predecibles, como un sendero en un barrio residencial con afluencia constante, ofrece un potencial significativo para la implementación exitosa de sistemas de generación de energía que dependen directamente del flujo continuo de personas (Zou et al., 2018).

Métodos de Aforo Peatonal

La recolección sistemática de datos para la determinación del TPD y el análisis de los patrones de movilidad peatonal se lleva a cabo mediante aforos. Existen diversos métodos para realizar estos conteos, cada uno con sus propias ventajas y desventajas en términos de precisión, costo y la riqueza de la información que pueden capturar:

El Conteo Manual es el método más tradicional, accesible y, a menudo, el de menor costo inicial. Implica la observación directa y el registro manual del número de peatones por parte de un observador humano ubicado en puntos y periodos predefinidos. Aunque puede ser

laborioso y propenso a errores humanos en volúmenes de tránsito muy altos, permite capturar información detallada y cualitativa que los métodos automáticos a menudo no pueden, como la direccionalidad del flujo peatonal, el tipo de usuario (niños, adultos, ciclistas, personas con movilidad reducida) o incluso comportamientos específicos (Gehl & Svarre, 2013).

Por otro lado, el Conteo Automático utiliza tecnologías avanzadas para la recolección de datos. Esto puede incluir sensores infrarrojos, cámaras de video equipadas con sistemas de análisis de visión por computadora, radares o sistemas de piso sensibles a la presión, que detectan y cuantifican el paso de los peatones. Estos métodos ofrecen una mayor precisión, una continuidad en la recolección de datos y una reducción significativa del error humano, especialmente en grandes volúmenes de tránsito. Sin embargo, su implementación inicial suele ser considerablemente más costosa debido a la inversión en tecnología y su mantenimiento (Liu et al., 2018). La elección del método de aforo más adecuado debe estar en perfecta alineación con los objetivos específicos de la investigación, el presupuesto disponible y las características particulares del sitio de estudio. Para un análisis detallado del potencial energético, es fundamental un muestreo robusto que capture la variabilidad horaria y diaria del tránsito peatonal de manera representativa (Crandall et al., 2012).

Cantidad de Energía Mecánica Disponible a partir del Movimiento Pevalonal

El movimiento humano, particularmente el acto cotidiano de caminar, es una fuente considerable de energía mecánica que, bajo ciertas condiciones tecnológicas, puede ser convertida eficientemente en energía eléctrica utilizable. Esta energía mecánica emana fundamentalmente de la fuerza de impacto y la deformación que el peso de un peatón ejerce sobre la superficie de apoyo durante cada paso (Karami et al., 2015).

Principios de la Generación de Energía a partir del Movimiento Humano

La energía mecánica disponible se refiere al potencial intrínseco de convertir la energía cinética y potencial asociada al movimiento de los peatones en una forma de energía aprovechable. Cuando una persona camina sobre una superficie, su masa ejerce una fuerza dinámica sobre el suelo. Si esta superficie ha sido diseñada para ser deformable o incorpora elementos capaces de transformar esta fuerza mecánica en otra forma de energía, entonces es posible capturar y aprovechar esa energía (El-Hami & Inman, 2011). La cantidad de energía mecánica que puede ser efectivamente aprovechada por cada pisada depende de una combinación de varios factores críticos:

- **Masa del Peatón:** Existe una relación directa entre la masa del individuo y la energía generada; a mayor masa, mayor es la fuerza de impacto ejercida sobre el dispositivo de captación, y, por ende, mayor es el potencial de energía a convertir.
- **Altura de la Pisada:** Aunque su influencia es menos dominante en superficies completamente planas, la dinámica específica del paso humano, incluyendo la altura a la que se levanta el pie y la forma en que se apoya, puede influir en la magnitud de la fuerza aplicada y en la eficiencia de la transferencia de energía.
- **Frecuencia de Paso (Cadencia):** Una mayor cadencia, es decir, un número más elevado de pasos por unidad de tiempo, se traduce en una mayor tasa de generación de energía total a lo largo de un periodo.
- **Diseño del Dispositivo de Captación:** La eficiencia del mecanismo de conversión energética, así como su capacidad para absorber la energía del impacto de manera óptima y transformarla sin pérdidas significativas, son factores cruciales que determinan la cantidad de energía eléctrica obtenible (Alomari et al., 2018).

Tecnologías de Conversión de Energía Mecánica a Eléctrica

Existen diversas tecnologías emergentes y consolidadas para capturar la energía mecánica derivada del movimiento humano y convertirla en electricidad. Para los fines de esta investigación, los sistemas piezoeléctricos representan la tecnología más relevante y prometedora.

Los Sistemas Piezoeléctricos se basan en el fascinante efecto piezoeléctrico, una propiedad inherente a ciertos materiales cristalinos como el cuarzo, cerámicas especializadas como el titanato-zirconato de plomo o PZT, y polímeros como el PVDF. Este efecto se manifiesta de dos maneras: el efecto piezoeléctrico directo, donde el material genera una carga eléctrica en respuesta a la aplicación de una tensión o deformación mecánica; y el efecto piezoeléctrico inverso, donde el material cambia su forma en respuesta a un campo eléctrico aplicado (Anton & Sodano, 2007). En el contexto de las baldosas generadoras de energía para senderos peatonales, el principio operativo consiste en que la presión ejercida por el paso de un peatón sobre la superficie del material piezoeléctrico induce una deformación interna. Esta deformación, a su vez, produce una diferencia de potencial eléctrico que genera un voltaje y una corriente eléctrica utilizables. La cantidad de energía que puede ser generada por cada pisada es altamente variable y depende de múltiples factores, incluyendo el tipo específico de material piezoeléctrico utilizado, la magnitud de la fuerza aplicada por el peatón, y, fundamentalmente, el diseño arquitectónico y la configuración del transductor piezoeléctrico, así como el circuito eléctrico asociado encargado de acondicionar la señal (Kim et al., 2011). Diversos estudios previos han sugerido que un solo paso humano puede generar entre 2 y 8 vatios de potencia instantánea, o una cantidad de energía que oscila entre 0.05 y 0.2 julios por paso, dependiendo

de las características del diseño del dispositivo y de la carga sobre este (Chen et al., 2015; Ren et al., 2018).

Estimación del Potencial Energético Basado en el TPD

La integración del Tránsito Promedio Diario (TPD) con la eficiencia intrínseca de los sistemas de recolección de energía permite una estimación robusta del potencial energético total que un sendero específico puede ofrecer. Si se dispone del TPD de una determinada zona y se conoce la energía promedio que se genera por cada pisada o por cada peatón al transitar sobre una sección de placas piezoeléctricas, es posible calcular con precisión la energía eléctrica total que se puede generar en un periodo definido, usualmente un día (Diaconu et al., 2017).

La fórmula general utilizada para estimar la energía eléctrica total generada por día (E_{dia}) en un sistema de aprovechamiento energético piezoeléctrico es la siguiente:

Ecuación 1. Estimación de Energía Diaria en Sistemas Piezoeléctricos

$$E_{dia} = TPD \times Episada \times \eta_{sistema}$$

Donde:

- E_{dia} : Representa la energía total generada por día, expresada comúnmente en vatio-horas (Wh) o kilovatio-horas (kWh).
- TPD: Es el Tránsito Promedio Diario, es decir, el número promedio de peatones que transitan por la sección del sendero donde se encuentran instalados los dispositivos de captación de energía por día.
- Episada: Indica la energía eléctrica generada por una sola pisada de un peatón sobre una baldosa piezoeléctrica, medida en julios (J) o vatio-hora (Wh). Este

valor es intrínsecamente experimental y depende en gran medida del diseño específico y las características de rendimiento del prototipo o dispositivo utilizado.

- η sistema: Se refiere a la eficiencia global del sistema, que abarca todas las pérdidas energéticas inherentes al proceso de conversión.

Esto incluye las pérdidas en la propia conversión piezoeléctrica de energía mecánica a eléctrica, las pérdidas en el acondicionamiento de la energía como la rectificación de la señal, la regulación de voltaje y las pérdidas asociadas al almacenamiento de la energía en baterías o supercapacitores. Típicamente, la eficiencia de conversión de energía mecánica a eléctrica en sistemas piezoeléctricos comerciales puede variar considerablemente, y las pérdidas en el subsistema de gestión de energía pueden ser significativas, lo que resalta la importancia de un diseño optimizado (Wang, Z. et al., 2017)

Algunas investigaciones han reportado estimaciones globales que sirven como referencia, como el dato de que un flujo de 1000 peatones puede generar aproximadamente 5 kWh de energía diaria en un sistema bien diseñado (Pryor et al., 2015). Esta cifra es una herramienta útil para validar las estimaciones obtenidas a partir de aforos específicos y las características de rendimiento del prototipo diseñado. Sin embargo, es fundamental que la estimación para cualquier caso de estudio particular se base en los datos de TPD obtenidos específicamente para esa ubicación y en las características de rendimiento del prototipo desarrollado en la investigación en curso.

Fórmulas para Proyecciones Poblacionales y Peatonales

La planificación y el diseño de infraestructuras, incluyendo sistemas de generación de energía basados en el tránsito peatonal, requieren proyecciones de demanda futura. Estas

proyecciones se basan en modelos demográficos que estiman el crecimiento poblacional, el cual se relaciona directamente con el incremento del tránsito peatonal en áreas residenciales. A continuación, se presentan algunas de las fórmulas más utilizadas en demografía y planificación urbana para realizar estas proyecciones.

Método de Crecimiento Geométrico

La fórmula para el método de crecimiento geométrico, ampliamente utilizado en proyecciones demográficas, asume que la población crece a una tasa constante a lo largo del tiempo, de manera análoga al interés compuesto. Este modelo es particularmente apropiado para áreas urbanas que se encuentran en un proceso de desarrollo moderado y continuo. La base de la fórmula radica en que el crecimiento poblacional en cada período es proporcional al tamaño actual de la población, lo que genera una curva de crecimiento exponencial a lo largo del tiempo.

Ecuación 2. Método de Crecimiento Geométrico

$$Pf = Pi \times (1 + r)t$$

Donde:

Pf: Representa la población final o la población proyectada para el año futuro.

Pi: Es la población inicial o la población en el año base desde el cual se realiza la proyección.

r: Indica la tasa de crecimiento anual, expresada como un decimal.

t: Es el tiempo transcurrido en años desde el año base hasta el año de proyección. (Ortega Pérez, A., 2017)

Método Aritmético

El método aritmético, por su parte, se basa en la suposición de que la población crece o decrece en una cantidad constante absoluta por unidad de tiempo. Este enfoque es generalmente considerado más conservador que el método geométrico y es más adecuado para poblaciones que exhiben una tendencia de crecimiento estable, lineal o limitado, o para proyecciones a corto plazo en áreas urbanas ya maduras.

Ecuación 3. Método Aritmético

$$Pf = Pi + (r \times t \times Pi)$$

Donde:

Pf: Se refiere a la población futura o proyectada.

Pi: Es la población inicial o del año base.

r: tasa de crecimiento aritmético anual.

t: Corresponde al número de años para los cuales se desea realizar la proyección.

(González Fuentes, M., 2020)

Método Exponencial

El método exponencial considera que el crecimiento poblacional es un proceso continuo, en lugar de discreto, lo que significa que la población cambia de manera constante en cada instante de tiempo. Este modelo es particularmente adecuado para poblaciones que están experimentando un crecimiento acelerado o que se encuentran en las etapas tempranas de un proceso de urbanización intensiva. Su aplicación requiere el conocimiento de la población en al menos dos momentos distintos para poder calcular la tasa de crecimiento exponencial.

(Villarreal Navarro, J., 2021).

Ecuación 4. Ecuación Método Exponencial

$$Pf = Pi \times e(k \times t)$$

Donde:

Pf: Representa la población futura o proyectada.

Pi: Es la población inicial o en el año base.

k: Es la tasa de crecimiento exponencial, que refleja la intensidad del crecimiento continuo.

t: Corresponde al período de proyección en años.

e: Es la base del logaritmo natural, una constante matemática con un valor aproximado de 2.71828.

Proyección del Tránsito Peatonal Diario (TPD)

Esta fórmula establece una relación directa entre el crecimiento poblacional y el incremento esperado del tránsito peatonal. Asume que el flujo de peatones aumentará proporcionalmente al crecimiento de la población residente en el área de estudio. Esta suposición es razonable y aplicable en el contexto de áreas residenciales, donde los patrones de movilidad de las personas están directamente vinculados a la cantidad de residentes y a sus necesidades de desplazamiento diario. (Martínez Rodríguez, C., 2019)

Ecuación 5. Proyección del Tránsito Peatonal Diario

$$TPDf = TPDi \times (PiPf)$$

Donde:

TPDf: Es el Tránsito Peatonal Diario proyectado para el año futuro.

TPDi: Representa el Tránsito Peatonal Diario inicial, medido en el año base de la proyección.

Pf: Se refiere a la población proyectada para el año futuro, obtenida a través de uno de los métodos de proyección poblacional mencionados anteriormente.

Pi: Es la población inicial del año base.

Modelo de Factor de Crecimiento

Este modelo es una herramienta flexible para proyectar el Tránsito Peatonal Diario futuro mediante la aplicación de un factor de crecimiento. Este factor de crecimiento puede derivarse de diversas fuentes, como la tasa de crecimiento poblacional obtenida de los modelos demográficos, o de otros indicadores socioeconómicos relevantes para la zona de estudio. La particularidad de este modelo radica en su utilidad cuando se dispone de datos históricos limitados sobre el tránsito peatonal, pero se conocen las tasas de crecimiento demográfico o económico a nivel regional o municipal. El factor de crecimiento (FC) puede ser ajustado para reflejar diferentes escenarios de desarrollo, proporcionando una visión más completa de las posibles variaciones futuras en el flujo peatonal. (López Carmona, A., 2022)

Ecuación 6. Modelo de Factor de Crecimiento para TPD

$$TPDf = TPDi \times FC$$

Donde:

TPDf: Es el Tránsito Peatonal Diario futuro proyectado.

TPDi: Representa el Tránsito Peatonal Diario inicial o del año base.

FC: Es el Factor de Crecimiento, el cual se calcula generalmente como $(1+r)^t$.

r: Corresponde a la tasa anual de crecimiento relevante.

t: Indica el número de años de proyección.

Cálculo del Tránsito en Hora Pico (THP)

La fórmula para el Tránsito en Hora Pico (THP) es fundamental para el dimensionamiento de infraestructuras y sistemas que dependen del flujo máximo de personas en un momento determinado del día. El THP representa el flujo peatonal máximo que se espera durante la hora de mayor afluencia. El Factor de Hora Pico (FHP) es un parámetro crítico que se determina mediante aforos detallados, los cuales permiten identificar las horas y períodos en los que el tránsito peatonal alcanza su punto más alto en un área específica. Este factor es crucial para asegurar que la infraestructura diseñada pueda soportar la demanda en sus momentos de mayor uso. (Ramírez González, S., 2020)

Ecuación 7. Cálculo del Tránsito en Hora Pico

$$THP = TPD \times FHP$$

Donde:

THP: Es el Tránsito en Hora Pico, expresado en peatones por hora.

TPD: Representa el Tránsito Peonatol Diario, que es el promedio de peatones en un día.

FHP: Corresponde al Factor de Hora Pico, que es una proporción un valor entre 0 y 1 del tránsito diario que ocurre específicamente durante la hora de mayor afluencia.

La aplicación de la tecnología piezoeléctrica para la generación de energía a partir del movimiento peatonal requiere la consideración de fórmulas específicas que permiten cuantificar la energía generada, la potencia media del sistema y la capacidad de iluminación que puede proporcionar. Estas fórmulas son esenciales para el diseño y la evaluación de la factibilidad de un prototipo de iluminación autónoma.

Potencia Media Generada

La potencia media generada por el sistema piezoeléctrico proporciona una comprensión del flujo constante de energía que el prototipo puede mantener a lo largo del día. Se calcula a partir de la energía total generada diariamente, distribuida uniformemente a lo largo de las 24 horas del día. Esta métrica es importante para comparar el rendimiento del sistema con los requerimientos de potencia continua de los dispositivos a alimentar. (Gutiérrez Moreno, A, 2023)

Ecuación 8. Potencia Media Generada por el Sistema Piezoeléctrico

$$P_{media} = 24 \times 3600 E_{dia}$$

Donde:

P_{media} : Es la potencia media generada por el sistema, expresada en vatios (W).

E_{dia} : Es la energía total generada por día, expresada en vatio-horas (Wh). Para convertir a vatio-segundos (Was), que es la unidad coherente para el cálculo de potencia (Julios/segundo), se multiplica por 3600 (segundos por hora).

Capacidad de Iluminación

Esta fórmula permite estimar las horas de iluminación que un sistema piezoeléctrico puede proporcionar, considerando la energía total generada, la eficiencia del sistema de almacenamiento ya sean baterías o supercapacitores y la potencia nominal de las luminarias LED. Es una métrica crucial para determinar si el prototipo puede satisfacer las necesidades de iluminación nocturna en el sendero. (Sánchez Torres, L, 2022)

Ecuación 9. Capacidad de Iluminación del Sistema Piezoeléctrico

$$H_{iluminación} = P_{luminaria} E_{dia} \times \eta_{almacenamiento}$$

Donde:

Hiluminación: Representa las horas de iluminación posibles que el sistema puede sostener.

Edía: Es la energía total generada por día, expresada en vatio-horas (Wh).

ηalmacenamiento: Indica la eficiencia del sistema de almacenamiento de energía, expresada como un decimal. Esta eficiencia refleja las pérdidas durante los ciclos de carga y descarga de la batería.

Pluminaria: Es la potencia de las luminarias LED utilizadas, expresada en vatios (W). Para sistemas de bajo consumo, se consideran potencias de luminarias LED reducidas.

Conversión de energía mecánica a eléctrica:

Los sistemas piezoeléctricos modernos pueden alcanzar eficiencias de conversión de hasta el 30%, significativamente superiores al 15-20% observado en las primeras generaciones de esta tecnología. Esta mejora se debe principalmente a avances en los materiales piezoeléctricos y en la optimización de los sistemas de captación energética. (Thompson, 2023)

Almacenamiento energético:

Se deben implementar sistemas de baterías eficientes para maximizar el aprovechamiento de la energía generada. Los sistemas de almacenamiento más efectivos para aplicaciones piezoeléctricas incluyen baterías de ion-litio y supercapacitores, que permiten una rápida carga y descarga con pérdidas mínimas. Según sus investigaciones, un sistema de almacenamiento bien diseñado puede mantener una eficiencia de conversión superior al 85% durante su vida útil. De este modo, la integración de sistemas de iluminación LED con tecnología piezoeléctrica ha

demostrado ser particularmente exitosa en proyectos urbanos. Además, las luminarias LED modernas pueden operar eficientemente con la energía generada por sistemas piezoeléctricos, requiriendo tan solo 15-20 vatios por hora para proporcionar una iluminación adecuada en senderos peatonales. Esta combinación tecnológica resulta en una reducción significativa de la huella de carbono, estimada en aproximadamente 0.5 toneladas de CO₂ por año por cada 100 metros de sendero iluminado. (García & Patel, 2023)

Principales usos y vida útil.

Los estudios efectuados en comunidades urbanas latinoamericanas demuestran que la instalación de sistemas piezoeléctricos no solo mejora la seguridad física de los espacios públicos, sino que también fortalece el tejido social al crear espacios más transitables y agradables para la comunidad. Sus investigaciones revelan un incremento del 45% en el uso de senderos peatonales después de la instalación de sistemas de iluminación basados en piezoelectricidad. De esta manera, la durabilidad y mantenimiento de los sistemas piezoeléctricos representan aspectos cruciales para su uso exitoso. De acuerdo con (Park et al., 2022), los sistemas piezoeléctricos modernos pueden mantener una eficiencia operativa superior al 90% durante al menos cinco años con un mantenimiento adecuado. Sus investigaciones sugieren que la vida útil promedio de una instalación piezoeléctrica en senderos peatonales puede extenderse hasta 10 años cuando se implementan protocolos de mantenimiento preventivo adecuados. En el contexto de la planificación urbana sostenible, la integración de sistemas piezoeléctricos en senderos peatonales representa una relación significativa entre la innovación tecnológica y el desarrollo social. Estos sistemas pueden contribuir significativamente a los objetivos de desarrollo sostenible de las ciudades, particularmente en aspectos relacionados con la reducción del consumo energético y la mejora de la seguridad pública. Sus estudios indican

que la implementación de estos sistemas puede resultar en una reducción del 40% en los costos de iluminación pública a largo plazo.

Modelo matemático aplicable a la piezoelectricidad.

Todo proyecto ingenieril requiere una base matemática. En este trabajo, la base matemática se centra en el cálculo de la tensión generada, la intensidad de corriente y la potencia que cada elemento piezoeléctrico es capaz de producir.

Tensión Eléctrica por Deformación

Para determinar la tensión eléctrica generada por la deformación del cerámico piezoeléctrico, es crucial conocer la constante piezoeléctrica (g_{33}) del material. Esta constante expresa la relación entre la variación dimensional del material y la diferencia de potencial generada, o bien, la generación de cargas eléctricas en Coulombs por la fuerza aplicada en Newtons.

La tensión (V) generada por una carga mecánica (f) que actúa sobre un área (A) específica de un piezoeléctrico PZT se define mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 10. Tensión Generada por deformación del disco.

$$V = (-g_{33} \times h \times f)$$

$$V = -(g_{33} * h * (4\pi d^2 f))$$

Donde:

V: Tensión pico esperada por la deformación del material (Voltios, V).

g_{33} : Constante piezoeléctrica (Vm/N).

h: Longitud o grosor del piezoeléctrico (mm).

f: Fuerza que se le imprime al cerámico piezoeléctrico (Newtons, N).

d: Diámetro efectivo del cerámico piezoeléctrico (mm).

A: Área del cerámico piezoeléctrico (m²). La fuerza aplicada sobre esta área también se denomina nivel de estrés del material piezoeléctrico.

Potencia Generada

La potencia generada por el accionamiento del sistema se define como el producto de la tensión de salida y la intensidad de corriente. Esta potencia se calcula mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 11. Potencia Generada por el sistema

$$P = (V)(I)$$

Donde:

P: Potencia generada (Watts, W).

V: Voltaje que circula por el circuito (Voltios, V).

I: Intensidad de corriente (Amperios, A). (Cardozo Gutiérrez & Tamayo Zapata, 2017)

Parámetros Mecánicos

Para estimar la fuerza (f) ejercida sobre los discos cerámicos, se utiliza la ecuación de la fuerza gravitacional. Esta fuerza se calcula considerando un peso promedio de 80 kilogramos (basado en el peso promedio de la población mundial) y la constante de gravedad.

Ecuación 12. Fuerza ejercida sobre los discos según el peso del peatón.

$$f = m * g$$

Donde:

f: Fuerza aplicada (Newtons, N).

m: Masa del objeto que activa el piezoeléctrico (Kilogramos, Kg).

g: Constante de gravedad, equivalente a 9.81m/s².(Cardozo Gutiérrez & Tamayo Zapata, 2017)

Área Efectiva de Acción del Disco

El área efectiva de acción del disco piezoeléctrico es la superficie donde el material cerámico experimenta la mayor concentración de la fuerza. Esta área se calcula a partir del diámetro del disco mediante la siguiente ecuación:

Área Efectiva de Acción del Disco:

Ecuación 13. Fórmula para calcular el Área Efectiva de Acción del Disco

$$A = ((\text{área del Cerámico}^2 AC) * \pi) / (4)$$

Donde:

A: Área efectiva de acción del disco (m²).

π : Constante pi (3.1416).

AC: Área total del cerámico (m²).

A continuación, en la tabla 1 se muestran las características de un disco piezoeléctrico tipo PZT de 27 mm según los datos de fabricación de la empresa fabricante Morgan Advanced Materials.(Burbano Barahona, 2021)

Tabla 1.

características de un disco piezoeléctrico de 27 mm.

<i>Variable</i>	<i>Valor</i>
<i>Constante piezoeléctrica (g_{33})</i>	<i>$25 \times 10^{-3} \text{ Vm/N}$</i>
<i>Grosor (h)</i>	<i>0.33 mm</i>
<i>Fuerza en N de los 80 kg (f)</i>	<i>784 N</i>
<i>Diámetro efectivo (d)</i>	<i>20 mm</i>

Nota. Informacion tomada de Morgan Advanced Materials (2025)

Marco Legal

Acuerdo No.186 - 02 de diciembre de 2005 Normatividad de trabajo de grado

Universidad de Pamplona Artículo 5.- Requisitos de Grado: para obtener su título universitario, un estudiante debe aprobar todas las asignaturas del plan de estudios y las extraplan, realizar un examen de suficiencia en una segunda lengua, completar 60 horas de Trabajo Social y cumplir con el Trabajo de Grado. Además, debe mantener un promedio acumulado igual o superior a 3.20, salvo requisitos específicos establecidos por la ley o el reglamento para ciertos programas.

Artículo 35.- Definición de Trabajo de Grado: En el Plan de Estudios de los programas, la Universidad establece como requisito para la obtención del título profesional, la realización

por parte del estudiante, de un trabajo especial que se denomina “TRABAJO DE GRADO”, por medio del cual se consolida en el estudiante su formación integral, que le permite:

a. Diagnosticar problemas y necesidades, utilizando los conocimientos adquiridos en la Universidad.

b. Acopiar y analizar la información para plantear soluciones a problemas y necesidades específicas.

c. Desarrollar planes y ejecutar proyectos, que le permitan demostrar su capacidad en la toma de decisiones.

d. Formular y evaluar proyectos.

e. Aplicar el Método Científico a todos los procesos de estudio y decisión.

Artículo 36.- Modalidades de Trabajo de Grado: El Trabajo de Grado, puede desarrollarse en las siguientes modalidades:

a. Investigación: Comprende diseños y ejecución de proyectos que busquen aportar soluciones nuevas u originales a problemas teóricos o prácticos, adecuar y apropiar tecnologías y validar conocimientos producidos en otros contextos.

b. Modalidad Pasantía de Investigación: Es la que se realiza en un grupo de investigación reconocido por Colciencias.

c. Práctica Empresarial: La Práctica Empresarial como opción de grado tiene como propósito complementar la formación académica del estudiante con una labor profesional en una empresa, durante un período de tiempo; preparando al estudiante para su desempeño en el campo laboral.

d. Modalidad realización de un diplomado: El Diplomado como opción de grado tiene unas características específicas y exige el cumplimiento de unos requisitos, para su aprobación,

inscripción, propuesta y elaboración del trabajo final, certificación de finalización, aprobación y sustentación. (Benavides Cardenas, 2019)

Ley 142 de 1994

Conocida como la Ley de Servicios Públicos Domiciliarios, es la columna vertebral del régimen jurídico bajo el cual se prestan los servicios públicos esenciales en Colombia. Esta ley no solo define los servicios públicos domiciliarios (como la energía eléctrica, acueducto, alcantarillado, gas, aseo y telefonía), sino que también establece el marco regulatorio general para su prestación. Dentro de sus disposiciones, se especifican los derechos y deberes tanto de los usuarios, quienes tienen derecho a recibir un servicio de calidad y a presentar peticiones, quejas o recursos, como de los prestadores, quienes están obligados a garantizar la continuidad y eficiencia del servicio. Adicionalmente, esta ley crea y faculta a los mecanismos de control y vigilancia, como la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, para asegurar el cumplimiento de la normativa y proteger los intereses de los usuarios (Congreso de la Republica De Colombia, 1994a)

Norma NTC 900

Establece las reglas generales y especificaciones para el alumbrado público, incluyendo requisitos de iluminación, métodos de medición y clasificación de vías según su uso y características. Esta norma provee directrices detalladas para la planificación y el diseño de los sistemas de iluminación exterior, asegurando una aplicación coherente y efectiva de los principios del RETILAP. (ICONTEC, 2020)

Norma NTC 2230

Se enfoca específicamente en los requisitos y ensayos que deben cumplir las luminarias utilizadas en alumbrado público. Esta norma es vital para garantizar que las luminarias seleccionadas para el prototipo cumplan con los estándares de calidad, seguridad, durabilidad y rendimiento lumínico, lo que asegura que el componente de iluminación del sistema sea robusto y eficiente en el largo plazo. (ICONTEC, 2019)

Ley 143 de 1994

Ley Eléctrica, se centra exclusivamente en el sector de la electricidad en Colombia. Esta legislación define y regula las actividades principales de la cadena del servicio eléctrico: la generación, la interconexión, la transmisión, la distribución y la comercialización. Al establecer la estructura y los principios fundamentales del sector eléctrico colombiano, como la libre competencia y la garantía del abastecimiento, la Ley 143 proporciona el entorno legal para la integración de nuevas tecnologías.(Congreso de la República De Colombia, 1994b)

Ley 1715 de 2014

Regula la integración de energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Promueve el desarrollo y utilización de fuentes no convencionales de energía, especialmente aquellas de carácter renovable. Esta ley representa el principal instrumento jurídico en Colombia para la promoción e integración de las energías renovables no convencionales (ERNC) en el sistema energético nacional. Su propósito fundamental es incentivar el desarrollo, la investigación y la utilización de fuentes de energía alternativas al petróleo y al gas, como la solar, eólica, geotérmica, de biomasa y, de manera implícita, la

energía generada por vibraciones o movimiento, como la piezoeléctrica. La ley busca diversificar la matriz energética del país, reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar los impactos ambientales. (Congreso de la República De Colombia, 2014)

Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)

Es una normativa de carácter obligatorio en Colombia, cuyo objetivo primordial es salvaguardar la vida de las personas, así como la vida animal y vegetal, y preservar el medio ambiente, mediante la prevención, minimización o eliminación de los riesgos de origen eléctrico. Este reglamento abarca desde el diseño, construcción y operación hasta el mantenimiento de instalaciones eléctricas. Establece requisitos técnicos mínimos para materiales, equipos y procedimientos, asegurando que cualquier instalación eléctrica cumpla con los estándares de seguridad necesarios para evitar cortocircuitos, sobrecargas, electrocución e incendios. (Ministerio de Minas y Energía., 2013)

Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (RETILAP)

Establece los requisitos técnicos y las medidas de seguridad que deben cumplir los sistemas de iluminación y alumbrado público en Colombia. Su propósito principal es asegurar que se alcancen los niveles y calidades de energía lumínica necesarios para la actividad visual de las personas en diversos entornos, desde espacios interiores hasta vías públicas. El RETILAP define criterios para la iluminancia, la uniformidad, la reproducción cromática y el control del deslumbramiento, buscando optimizar la visibilidad y la seguridad. (Ministerio de Minas y Energía., 2010)

Resolución CREG 123 de 2011

Es una disposición clave emitida por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), el organismo encargado de regular los servicios públicos de energía en Colombia. Esta resolución establece la metodología detallada para determinar los costos máximos que los municipios y distritos pueden aplicar para remunerar a los prestadores del servicio de alumbrado público. Su objetivo es garantizar la transparencia y equidad en la contratación de este servicio, evitando costos excesivos y promoviendo la eficiencia en la gestión. (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2011)

Decreto 2424 de 2006

Emitido por el Ministerio de Minas y Energía, reguló la prestación del servicio de alumbrado público. Este decreto estableció las responsabilidades de los municipios en la prestación de este servicio, la metodología de cobro a los usuarios y los criterios técnicos y administrativos para garantizar una prestación eficiente y transparente del servicio. (Ministerio de Minas y Energía, 2006)

Decreto 943 de 2018

Actualizó y modernizó los lineamientos para la prestación del servicio de alumbrado público. Este decreto buscó optimizar el modelo de prestación, introduciendo nuevos criterios técnicos y administrativos que promueven la eficiencia energética, la modernización de la infraestructura y la sostenibilidad en la gestión del alumbrado público a nivel municipal. (Ministerio de Minas y Energía, 2018)

Decreto 570 de 2018

Establece los lineamientos de política pública para definir e implementar un mecanismo que promueva la contratación de largo plazo para los proyectos de generación de energía eléctrica renovable. Este decreto busca dar estabilidad y confianza a los inversionistas en proyectos de energías no convencionales, incentivando su desarrollo a través de contratos de compraventa de energía a largo plazo. (Ministerio de Minas y Energía., 2018)

Marco Contextual

Generalidades

El municipio de Málaga se encuentra ubicado en el departamento de Santander, consolidándose como la capital de la Provincia de García Rovira. Su ubicación geográfica estratégica, a 163 kilómetros al suroriente de Bucaramanga, lo posiciona como un centro administrativo, comercial y de servicios para la región. Geográficamente, Málaga se sitúa con precisión en las coordenadas 6°42'14"N de latitud y 72°44'08"O de longitud, a una altitud de 2,200 metros sobre el nivel del mar (msnm). Esta elevación le confiere características climáticas particulares y una topografía diversa. El territorio municipal abarca una extensión total de 58 kilómetros cuadrados, distribuidos de manera distintiva entre una área urbana de 4.3 km² y una vasta zona rural de 53.7 km². Esta proporción subraya la importancia del sector rural y su contribución a la economía local. La diversidad de pisos térmicos que abarca su territorio, desde zonas templadas hasta frío y páramo, favorece una amplia distribución de actividades agropecuarias, que históricamente han sido y siguen siendo la principal fuente de sustento económico para la población rural. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2023)

Límites municipales

- Norte: Municipio de San José de Miranda
- Sur: Municipio de Enciso
- Oriente: Municipios de San José de Miranda y Enciso
- Occidente: Municipio de Molagavita

Esta ubicación estratégica en la provincia, ha permitido que Málaga se convierta en un importante nodo de desarrollo regional, actuando como un punto de convergencia que facilita el intercambio comercial, cultural y social con los municipios circundantes. Esta centralidad geográfica no solo impulsa su economía local, sino que también genera importantes flujos de personas y bienes que impactan directamente en la dinámica urbana y peatonal del casco municipal(Alcaldía de Málaga., 2023)

Características Climatológicas

Con una temperatura promedio anual de 18°C, el municipio goza de un clima templado predominante durante la mayor parte del año, lo que contribuye a un ambiente confortable para sus residentes y visitantes. La precipitación anual alcanza un promedio de 1,200 milímetros, distribuida en dos temporadas lluviosas principales que marcan los ciclos agrícolas y los patrones de actividad al aire libre. La humedad relativa promedio se mantiene en un 75%, un factor que influye en la sensación térmica y en la durabilidad de los materiales expuestos a la intemperie. La presencia de pisos térmicos que van desde el frío hasta el páramo dentro de su extensión territorial enriquece la diversidad ecológica y favorece el desarrollo de una amplia gama de actividades agrícolas, desde cultivos de clima frío hasta de clima templado. (IDEAM, 2023)

Demografía

De acuerdo con el último censo realizado por el DANE (2018) y sus proyecciones actualizadas, Málaga cuenta con una población total de 18,924 habitantes, de los cuales 15,302 (80.9%) residen en el área urbana, mientras que 3,622 (19.1%) habitan en la zona rural. La distribución por género muestra una ligera predominancia femenina, con un 51.2% de mujeres y 48.8% de hombres. La pirámide poblacional revela una estructura demográfica relativamente joven, con un 35% de habitantes menores de 25 años. Málaga cuenta con una tasa de crecimiento poblacional del 1.2% anual, parámetro que refleja un desarrollo urbano moderado pero constante para el municipio. (DANE, 2018)

Economía

La estructura económica de Málaga es un reflejo de su carácter urbano-rural y su rol como centro provincial. La economía se caracteriza por el predominio del sector terciario, que agrupa las actividades de servicios y comercio, representando el 45% de la actividad económica total del municipio. Este sector es vital, ya que abastece no solo a la población local sino también a los municipios vecinos, atrayendo un flujo constante de personas y bienes. Le sigue en importancia el sector agropecuario, que contribuye con un 25% a la economía local. Dada la diversidad de pisos térmicos y la extensión de la zona rural, esta actividad incluye una variedad de cultivos y ganadería, lo que reafirma la conexión del municipio con su entorno natural. El sector educativo emerge como un componente significativo, aportando un 15% a la actividad económica, lo que se explica por la presencia de instituciones de educación superior y básica que atraen estudiantes y personal de otras localidades. Finalmente, el turismo, junto con otros servicios especializados, completa el 15% restante de la actividad económica. El sector

comercial, pilar del sector terciario, se concentra principalmente en el casco urbano, donde se encuentran establecimientos de diversos tipos, desde minoristas hasta servicios profesionales.

(Secretaría de Planeación Municipal, 2023)

Aspectos Culturales

El municipio de Málaga se destaca por tener un amplio desarrollo cultural, lo cual atrae la mayoría de población flotante a la ciudad. En su entorno de festividades se encuentra el gran carnaval del oriente colombiano, las festividades en honor a San Jerónimo y las repetidas ferias agroindustriales donde se impulsa la economía de la región. Este municipio también se destaca por su gran legado ancestral y espacios históricos y culturales fuera del municipio lo que ha impulsado a concursos de carácter internacional para plasmar y mostrar la cultura en el municipio en diferentes temporadas del año, contribuyendo en amplio espectro a mejorar la cultura.

Área Específica del Proyecto

El barrio El Dorado, ubicado estratégicamente en el sector nororiental del casco urbano de Málaga, representa una zona de particular interés para el desarrollo urbano sostenible y la implementación de soluciones innovadoras en infraestructura. Este barrio se caracteriza por ser predominantemente residencial, con una población estimada de 2,800 habitantes distribuidos en aproximadamente 650 unidades habitacionales. La composición socioeconómica de sus residentes se sitúa mayoritariamente en los estratos 2 y 3, indicando un perfil de ingresos medio-bajos a medios. La densidad poblacional del barrio se estima en 175 habitantes por hectárea.

(Secretaría de Planeación Municipal, 2023)

El total de intervención de esta investigación es un corredor peatonal clave que conecta el barrio El Dorado directamente con la sede de la Universidad Industrial de Santander (UIS) en Málaga. Este sendero, objeto de estudio, se extiende a lo largo de aproximadamente 203 metros de longitud y posee un ancho promedio de 5.5 metros. Con base en estas dimensiones, el área total de intervención del corredor peatonal asciende a 1116.5 metros cuadrados.

La importancia de este sendero como caso de estudio radica en su rol como arteria de movilidad peatonal de alta afluencia. La conexión directa con la universidad garantiza un tránsito constante de personas, especialmente durante las horas pico de entrada y salida de clases, lo que lo convierte en un escenario ideal para la captación de energía a través de sistemas piezoeléctricos. Además, la base residencial del barrio El Dorado asegura un flujo peatonal sostenido por parte de sus habitantes, quienes utilizan el sendero para sus desplazamientos diarios hacia comercios y otras actividades. La combinación de una población residente significativa y el flujo continuo generado por la actividad universitaria confiere a este sendero un potencial energético considerable y lo establece como un entorno representativo para evaluar la factibilidad y eficiencia de un prototipo de iluminación autónoma impulsado por energía del movimiento peatonal.

Ubicación

Para contextualizar adecuadamente el área de estudio y comprender la pertinencia del proyecto, a continuación, se presentan la figuras 1 a la 4. Estas figuras detallan la ubicación específica del sendero de interés, desde una perspectiva a nivel nacional, regional, y, más específicamente, en la provincia de García Rovira; dentro del municipio de Málaga y del barrio El Dorado.

Figura 1

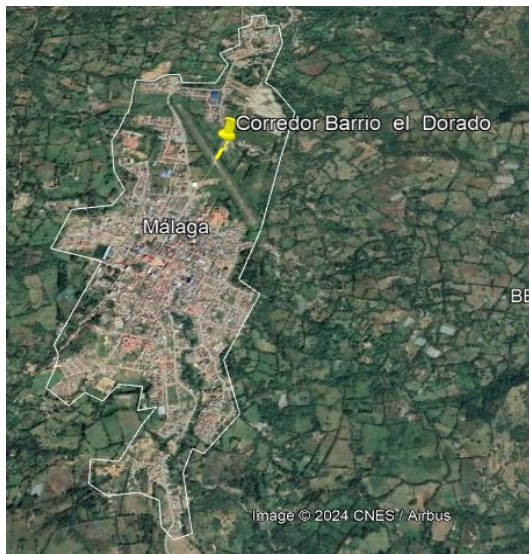
Ubicación nacional de la zona de investigación



Nota. La figura representa la localización de la zona de estudio a nivel nacional.

Figura 2

Ubicación municipal de la zona de investigación



Nota. Vista geográfica del municipio de Málaga dentro del departamento de Santander, indicando su posición a nivel municipal y su relevancia en el contexto regional del proyecto.

Elaboración propia.

Figura 3.

Ubicación local de la zona de investigación



Nota. Detalle cartográfico de la ubicación del barrio El Dorado en el municipio de Málaga y la sección específica del sendero peatonal seleccionada para el estudio y desarrollo de la investigación.

Elaboración propia.

A continuación, la Figura 4 presenta dos perspectivas complementarias de este corredor, que no solo evidencian su condición actual, sino que también justifican la selección del sitio y la necesidad de una solución de alumbrado. Estas imágenes muestran las condiciones específicas de iluminación, la infraestructura lumínica existente desde los dos extremos opuestos del sendero.

Figura 4.

Ubicación específica del sendero peatonal de estudio.



Nota. La figura (a) ilustra una vista del sendero desde la perspectiva sureste de la vía, mostrando el carril peatonal y la ubicación de una luminaria existente. La figura (b) presenta una vista del sendero desde el noreste, donde se observa la ausencia de luminarias. Elaboración propia.

Metodología

A lo largo de esta investigación se propusieron una serie de actividades de orden cronológico que ayudaron al desarrollo del proyecto en cada una de sus cuatro etapas. A continuación, se muestra el esquema que sigue la metodología y las actividades que se llevaron a cabo para cumplir con éxito el objetivo de esta investigación.

Figura 5.

Esquema de Metodología.



Fase 1. Estudios de campo:

Esta fase inicial del proyecto se centró en la recolección sistemática de datos sobre el flujo peatonal y las condiciones viales y lumínicas en el sendero del barrio El Dorado. En primer lugar, se llevó a cabo la medición de extensión y área del sendero para tener una idea más

concreta del perímetro de aplicación del estudio. Así mismo, se estudiaron las condiciones de la red de iluminación y su eficacia en elevadas horas de la noche, según los habitantes del sector, donde se indica que la calidad es insuficiente, casi nula. A continuación, se evaluaron los índices de flujo peatonal, realizando conteos detallados de peatones en diferentes momentos del día, abarcando días laborables y fines de semana, para obtener una imagen completa de los patrones de movilidad, utilizando métodos manuales de conteo y registro de la cantidad de personas.

Así, a partir de la información recopilada se realizó el cálculo del Tránsito Promedio Diario (TPD) de peatones, lo cual se convierte en un patrón fundamental para dimensionar adecuadamente el sistema piezoeléctrico, el cual debe estar adaptado a las diferentes variaciones en el flujo peatonal según la hora del día, día de la semana. Este análisis detallado se realiza con el fin de proporcionar una estimación precisa de la cantidad de energía mecánica que podría generarse a partir de las pisadas de los transeúntes, lo cual es indispensable para el diseño posterior del sistema.

Actividades.

Recolectar información de las condiciones lumínicas y su nivel de deterioro:

La primera actividad de esta fase se enfocó en una evaluación detallada de la infraestructura de iluminación existente en el sendero peatonal. Se realizó una inspección visual detallada durante diferentes momentos del día, prestando especial atención a las horas nocturnas, donde la deficiencia lumínica fue más evidente. Se documentó el tipo de luminarias instaladas, su estado de conservación, altura de instalación y la distancia entre ellas. Esta recolección de datos se complementó con un registro fotográfico que capturó el nivel de deterioro y las zonas oscuras o con iluminación deficiente. La información cualitativa se enriqueció con la percepción de los habitantes del barrio, quienes ya habían expresado que la calidad de la iluminación era

insuficiente o casi nula. Los resultados de esta actividad proporcionaron una justificación sólida para la implementación del prototipo, al evidenciar las carencias del sistema existente de iluminación y la necesidad de mejorar la seguridad y visibilidad de los peatones.

A lo largo de esta actividad se hizo la recolección de datos físicos donde se observa que el estado del sendero se encuentra en condiciones deplorables de iluminación ya que, de las 5 luminarias existentes, solo dos de ellas brindan iluminación al sendero y son a aquellas ubicadas en los extremos donde finaliza el tramo de sendero al cual se le aplicó este estudio. De esta manera se logró evidenciar que la población habitante y flotante de esta zona se ve expuesta ligeramente a inseguridad al momento de atravesar el sendero que se convierte en la ruta más cercana que conecta a estos barrios con la zona comercial del centro de la ciudad de Málaga.

Medir las condiciones de longitud y estado actual del sendero peatonal en el barrio El Dorado:

En esta fase se llevó a cabo un análisis completo de las características físicas del sendero. Este análisis incluyó las mediciones precisas de la longitud total, anchura en diferentes tramos, tipo de superficie, estado de conservación, identificación de zonas con deterioro o daños estructurales, presencia de obstáculos o interrupciones en el recorrido. Documentando las características del entorno que puedan afectar al sistema piezoeléctrico y a su vez puedan disminuir el flujo peatonal.

En esta actividad se logró realizar la medición y caracterización física del sendero peatonal. Utilizando herramientas de precisión como cintas con el propósito de verificar la longitud total del sendero, que se estimó en aproximadamente 203 metros, y se midió su ancho promedio de 5,5 metros aproximadamente en el tramo más reducido y un ancho de 7 m para el tramo más grande respectivamente, así mismo se midieron las variaciones a lo largo del recorrido que posteriormente se detalla en imágenes y planos. Se identificó el tipo de material de

la superficie está elaborado en asfalto rígido con algunas patologías ligadas al envejecimiento y presencia de material vegetativo y arbustos que ocasionan el rápido deterioro de los materiales, lo cual fue fundamental para evaluar la compatibilidad con las futuras baldosas piezoeléctricas. Como se mencionó anteriormente, se documentó el estado de conservación de la superficie, registrando la presencia de grietas, desniveles, hundimientos, presencia de árboles de gran tamaño y algún mobiliario urbano como lo son postes con riesgo de colapso que afectan el flujo peatonal con completa libertad.

Realizar aforos peatonales para determinar el (TPD) y la cantidad de energía mecánica disponible:

Se realizaron conteos de peatones en diferentes días de la semana laborales y no laborales y horarios, identificando patrones de uso, horas pico y horas valle. Se tomaron mediciones de adultos con calculo promedio de peso 70 kg, niños promedio de peso de 40 kg y usuarios que se transportan en bicicleta, aproximadamente 80 kg, basados en estudios previos de circulación peatonal para así determinar la cantidad de energía mecánica transmitida al sistema piezoeléctrico. Posteriormente, se calculó el Tránsito Peatonal Diario (TPD) y se estimó la energía mecánica potencial que podría generarse a partir de las pisadas de los transeúntes.

Esta actividad fue el pilar para cuantificar el potencial energético del sendero, se diseñó un calendario de aforos que abarcó días laborales y no laborales (sábados y domingos) para capturar la variabilidad de los patrones de uso. Según los datos recopilados, se contaron con registros de lunes 20 de enero de 2025 y lunes 10 de febrero de 2025, así como datos parciales para el martes 11 y miércoles 12 de febrero y así sucesivamente. Se complementó esta información con aforos adicionales para obtener un perfil de tránsito completo y representativo a lo largo de una semana. Los datos del aforo se tomaron directamente en los puntos más sensibles

donde la iluminación incluso en horas de la tarde empieza a verse afectada por la presencia de árboles que impiden el paso de la luz, estos datos fueron tomados manualmente y por franjas horarias el número de niños, adultos y usuarios de bicicletas de acuerdo a la información recopilada.

Una vez recopilados los datos tránsito, se procedió al cálculo del Tránsito Promedio Diario (TPD) para peatones se realizó la sumatoria de niños, adultos y ciclistas. Este cálculo permitió identificar las horas pico y valle de afluencia, fundamentales para dimensionar adecuadamente el sistema de generación y almacenamiento de energía. Posteriormente, se estimó la energía mecánica potencial disponible y se realizaron proyecciones de acuerdo al crecimiento poblacional para garantizar que el sistema se mantenga estable en caso de llegar a implementarse en el sendero de estudio. Tomando como referencia estudios previos, cada pisada humana puede generar entre 2 y 8 vatios. Para una estimación inicial, se utilizó un valor promedio de 3 vatios por pisada.

Fase 2. Recolección de información técnica y teórica:

En esta segunda fase se planteó un estudio detallado de los diferentes equipos disponibles en el mercado y su aplicación de acuerdo a las normativas de alumbrado público local. Esta investigación abarca diversos tipos de placas piezoeléctricas, evaluando sus características técnicas como eficiencia de conversión energética, durabilidad, resistencia a condiciones ambientales y costos. Se incluyó, además, la evaluación de diferentes sistemas de almacenamiento de energía, según sus aspectos de capacidad, vida útil y eficiencia de aquellas baterías que son aptas para la adaptación del sistema piezoeléctrico. Paralelamente, se detallan

los diversos sistemas de iluminación LED, analizando los requerimientos energéticos, niveles de iluminación, durabilidad y eficiencia.

Actividades.

Reunir información acerca de las características de los equipos:

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica y de mercado para recopilar información técnica detallada sobre los componentes clave. En cuanto a las placas piezoeléctricas, se investigaron diversos tipos de materiales como titanato-zirconato de plomo - PZT, fluoruro de polivinilideno - PVDF, cerámicas. Se documentaron sus especificaciones técnicas importantes, como la eficiencia de conversión energética, con eficiencias de conversión los rangos de voltaje y corriente generados, la durabilidad, la resistencia a la compresión, la resistencia a la intemperie humedad, temperatura. Se buscaron identificar fabricantes y proveedores reconocidos en el ámbito nacional e internacional, y se consideró su vida útil esperada, que podía ser de hasta 10 años con un mantenimiento adecuado.

Para las baterías de almacenamiento, la investigación se centró en tecnologías apropiadas para sistemas de energía renovable, como las baterías de ion-litio o supercapacitores. Se recopilaron especificaciones como su capacidad de voltaje nominal, eficiencia de carga y descarga.

Respecto a los sistemas de iluminación LED, se investigaron luminarias de bajo consumo energético, adecuadas para senderos peatonales con una potencia estimada entre 15 y 20 vatios por hora. Se detallaron sus especificaciones técnicas como potencia (W), flujo luminoso (lúmenes), eficiencia lumínica (lúmenes por vatio), temperatura de color (K), ángulo de apertura, vida útil (horas) y resistencia a la intemperie (índice de protección IP). De modo que se reúna la

información necesaria para posteriormente escoger los materiales más apropiados para la creación del prototipo completamente funcional.

Comparar y categorizar los equipos de acuerdo a la cantidad de energía de consumo y emisión:

Una vez recopilada la información, se procedió a realizar un análisis comparativo detallado de cada componente para identificar aquellos que ofrecían la mejor relación entre eficiencia, rendimiento y durabilidad. Se realizó un análisis de eficiencia de conversión para las placas piezoeléctricas, comparando su capacidad para transformar la energía mecánica en eléctrica (vatios/pisada) y analizando las pérdidas asociadas al proceso de rectificación. Para las baterías de almacenamiento, se comparó su eficiencia de carga y descarga, así como la relación entre su capacidad de almacenamiento y su vida útil expresada en ciclos. En cuanto a las luminarias LED, se evaluó su eficiencia lumínica (lúmenes por vatio) y se estimó su consumo diario de energía en diferentes escenarios de operación nocturna.

Un aspecto crucial de la comparación fue el análisis de durabilidad y vida útil esperada de cada componente, considerando las condiciones ambientales específicas de Málaga con temperatura promedio de 18°C, precipitaciones de 1,200 mm anuales y una humedad relativa del 75%. Esperando que los sistemas piezoeléctricos bien mantenidos tengan una vida útil de 5 a 10 años.

Seleccionar los equipos considerando eficiencia, durabilidad y su adaptación a las condiciones de la zona:

La última actividad de esta fase implicó la toma de decisiones final sobre los componentes específicos que integrarían el prototipo. Se establecieron criterios de selección ponderados, incluyendo aspectos como la eficiencia energética, la durabilidad, la compatibilidad

entre los componentes, la disponibilidad en el mercado. Es imperativo asegurar la total compatibilidad eléctrica y funcional entre la baldosa piezoeléctrica (salida de voltaje), el amplificador de carga, la batería y las luminarias. Con base en la energía mecánica potencial estimada en la Fase 1 y la eficiencia de los componentes seleccionados, se determinó la cantidad necesaria de discos piezoeléctricos y la capacidad de la batería para asegurar que el sistema pudiera alimentar las luminarias durante las horas de operación requeridas, logrando así un dimensionamiento preliminar del prototipo.

Cabe resaltar que para la construcción del prototipo se realiza con materiales similares, como su nombre lo dice, el prototipo se realiza a pequeña escala, pero con materiales usados para el caso que se llegue a implementar completamente el prototipo.

Fase 3. Diseño y construcción del prototipo

La fase 3 se basa en el diseño y desarrollo de un prototipo que integre eficientemente todos los componentes seleccionados en la fase anterior, para ello, el diseño debe incluir los mecanismos de captación de energía, el sistema de almacenamiento, amplificación y la distribución de la iluminación. Este diseño considera las características específicas del sendero peatonal, las condiciones ambientales locales y los patrones de uso identificados en la primera fase.

Luego de crear un diseño óptimo y con las características específicas, se inicia el proceso de ensamblado y pruebas de funcionamiento para garantizar que sea completamente funcional en cada una de las fases de construcción del proyecto y que cumpla a cabalidad el objetivo para el cual fue diseñado desde bajos hasta elevados volúmenes de tránsito.

Actividades.

Diseñar un prototipo para la captación, almacenamiento y distribución de energía:

El proceso de diseño se inició con el desarrollo de la baldosa piezoeléctrica, que sería el mecanismo principal de captación de energía. Se definieron sus dimensiones físicas (30cm*30cm*3 cm) buscando optimizar la captación de energía por pisada y facilitar su instalación en el sendero. Se diseñó la disposición interna de las placas piezoeléctricas dentro de la baldosa, considerando configuraciones que maximizaran la eficiencia de conversión. Se detalló el mecanismo de actuación, es decir, cómo la pisada generaría la deformación necesaria en las placas mediante un sistema siliconas que transmitan la fuerza. La selección de materiales para la carcasa de la baldosa fue hecha pensando en la durabilidad y adaptabilidad al sistema; debían ser poco conductores y además garantizar la protección de los componentes internos.

El diseño del sistema de almacenamiento se realizó basado en el cálculo de la capacidad total de la batería y la cantidad de energía que generaría la placa, para garantizar la autonomía del sistema bajo tráfico, basándose en el TPD y la energía generada estimados en la Fase 1. Se definió la configuración de los discos en serie para alcanzar el voltaje y la capacidad deseados con el fin de alimentar de manera correcta el módulo LED de 12V.

Construir el prototipo bajo las condiciones óptimas de diseño:

Una vez finalizado el diseño, se procedió a la adquisición de todos los componentes y materiales especificados, incluyendo los discos piezoeléctricas, baterías, módulos LED, cables, conectores, reguladores de carga, diodos, capacitores, resistores y los materiales para la carcasa o estructura. Inicialmente se realiza el ensamblaje del mecanismo de captación que implica la fabricación de una placa tipo cajón y sobre la base inferior de ella se

ubican los discos con conexiones en serie ubicadas de manera estratégica para ampliar la captación de energía mecánica y con conexiones de energía entre ellos, así mismo en la parte superior de la placa se colocan siliconas con el fin de estimular y aumentar la energía captada donde además, se garantiza la protección de los materiales conectados dentro, asegurando la correcta ubicación y protección interna.

Posteriormente, se realizó el montaje del sistema de almacenamiento y amplificación, instalando las baterías, realizando las conexiones eléctricas correspondientes. La integración del sistema de iluminación consistió en el montaje del módulo LED en la estructura o soporte definido, seguido del cableado y las conexiones eléctricas entre las luminarias, el sistema de control y las baterías.

Finalmente, se llevaron a cabo pruebas iniciales de funcionamiento, las cuales incluyeron la verificación de continuidad eléctrica, aislamiento, el funcionamiento individual de cada componente y pruebas de carga y descarga del sistema para asegurar la transferencia y el almacenamiento correctos de energía.

Fase 4. Evaluación energética del prototipo:

La fase final de este proyecto se centra en la evaluación del prototipo desarrollado, un paso importante para validar su funcionalidad y rendimiento energético en condiciones tanto controladas como simuladas, diagnosticando la eficiencia del sistema desde la generación hasta la emisión de luz, incluyendo mediciones de la energía producida por la interacción mecánica, la capacidad del sistema de almacenamiento y amplificación, así como, la efectividad de la iluminación proporcionada por el módulo LED. Adicionalmente, se lleva a cabo una distribución espacial y geográfica de los componentes como luminarias, baterías y placas según el

reglamento local de RETILAP para definir como se vería el proyecto al ser aplicado en el sendero según los datos recolectados en campo y aquellos del prototipo, todo esto en un plano AutoCAD para dar una visión más clara de la implementación de este trabajo investigativo.

Finalmente, se busca realizar una evaluación integral de la eficiencia del sistema y la calidad de la iluminación en relación con las condiciones específicas del sendero peatonal. Los resultados obtenidos de estas pruebas de campo no solo determinan si el prototipo cumple con los objetivos de diseño y los estándares del RETILAP, sino que también ofrece información invaluable para posibles ajustes y optimizaciones necesarias para una futura implementación a gran escala.

Actividades.

Evaluar las condiciones de funcionamiento del prototipo:

Esta actividad implica la realización de pruebas, para evaluar las condiciones de funcionamiento del prototipo. Esto incluyó pruebas de generación de energía, simulando pisadas con diferentes pesos 40 kg para niños, 70 kg para adultos y 80 kg para bicicletas y frecuencias sobre la baldosa piezoeléctrica. Se midieron el voltaje y la corriente instantáneos generados por cada pisada y se calculó la energía generada por pisada y la potencia promedio.

En las pruebas del sistema de batería, se evaluó la capacidad de almacenamiento de energía y la autonomía del sistema cuánto tiempo las luces podían permanecer encendidas sin nuevas pisadas. Se monitorean la temperatura de la batería durante los ciclos de carga y descarga para asegurar su estabilidad.

Finalmente, se realizan pruebas de resistencia y durabilidad, sometiendo la baldosa a un número controlado de ciclos de carga/descarga o impactos simulados para verificar su

resistencia mecánica, y se observando el comportamiento del prototipo bajo variaciones peso para garantizar que funciona correctamente.

Distribuir espacial y geográficamente los equipos en la zona de estudio:

Con base en los resultados de la Fase 1 a cerca del TPD, patrones de movilidad, condiciones físicas del sendero y el diseño del prototipo de la Fase 3, se elabora un plano de implementación detallado. Este plano muestra la ubicación estratégica de las baldosas piezoeléctricas y las luminarias a lo largo de los 203 metros del sendero en el Barrio El Dorado. Optimizando la colocación de las baldosas generadoras en las zonas de mayor afluencia peatonal, asegurando al mismo tiempo la seguridad y tránsito libre para los peatones. Entonces, se define la cantidad óptima de baldosas necesarias para generar la energía requerida. Para las luminarias, garantizando una distribución que proporcionara una iluminación uniforme y sin sombras, cumpliendo con los niveles de iluminación recomendados por el RETILAP para senderos peatonales. Posteriormente se lleva a cabo la distribución de la ruta del cableado subterráneo para conectar las baldosas, baterías y luminarias, minimizando las pérdidas de energía y garantizando la seguridad eléctrica. Finalmente, se diseña el proceso de instalación física de los componentes, especificando los materiales adecuados para la superficie del sendero. El resultado de esta actividad es un plano de distribución detallado y la justificación de la disposición elegida.

Evaluar la eficiencia del sistema y la capacidad de iluminación basada en las condiciones de la zona:

Esta actividad final, consiste en la verificación del rendimiento del sistema en su conjunto. Para ello, se llevan a cabo mediciones rigurosas de la eficiencia real del sistema tanto

en la fase de generación de energía, capturada por los discos piezoeléctricos bajo simulaciones de tráfico peatonal, como en la fase de consumo energético por parte del módulo LED. Esta verificación implica cuantificar las pérdidas en cada etapa del proceso, desde la conversión de energía mecánica a eléctrica, pasando por la rectificación y la carga/descarga de la batería, hasta la alimentación final del dispositivo de iluminación. Paralelamente, se procede a una verificación de la calidad y cobertura de la iluminación proporcionada por el módulo LED en el prototipo. Un aspecto fundamental de esta evaluación fue analizar la respuesta del sistema bajo diferentes condiciones de uso, lo cual incluyó someter el prototipo a variaciones en la frecuencia y magnitud de las pisadas simuladas. Esto permite correlacionar la energía generada con el patrón de uso previsto y la cantidad de energía disponible en la zona real del sendero, ofreciendo una visión clara de la capacidad del sistema para adaptarse a flujos peatonales variables y a las proyecciones de demanda energética. El objetivo de estas pruebas de campo es garantizar que el prototipo no solo funcionara correctamente en condiciones ideales, sino que también demostrara su fiabilidad en un entorno que simula las circunstancias operativas reales, sentando así las bases para asegurar el éxito y la viabilidad de la aplicación del proyecto a una escala completa.

Resultados

El presente capítulo se dedica a la exposición y análisis de los resultados obtenidos a lo largo de las cuatro fases metodológicas de esta investigación. Inicialmente, se detalla la información derivada de los estudios de campo, los cuales permitieron caracterizar las condiciones lumínicas existentes del sendero peatonal en el barrio El Dorado, identificar su estado, y cuantificar las dimensiones físicas del corredor, las cuales son 203 m de longitud por 5.5 m de ancho en una sección y 7 m de ancho en otra sección. Asimismo, se presentan los valores de Tránsito Promedio Diario (TPD) calculados a partir de los aforos peatonales, discriminando por tipo de usuario para estimar el potencial de energía mecánica disponible por pisada.

Posteriormente, se exponen los resultados de la fase de investigación técnica y teórica, incluyendo la comparativa y categorización de las tecnologías piezoeléctricas, sistemas de almacenamiento y luminarias LED disponibles, finalizando en la selección de componentes óptimos en función de su eficiencia, durabilidad y adaptabilidad a las condiciones del entorno.

Finalmente, se presentan los resultados de la fase de diseño y construcción del prototipo, que abarcan el esquema y las especificaciones técnicas del sistema integrado. La sección culmina con los resultados de la evaluación energética del prototipo, tanto en condiciones controladas como en campo, detallando su eficiencia en la generación de energía, la capacidad de almacenamiento y la calidad de la iluminación proporcionada. Estos resultados determinan la factibilidad del sistema piezoeléctrico para generar energía autónoma en senderos peatonales, confirmando el cumplimiento de los objetivos planteados.

Fase 1. Estudios de campo:

Actividades.

Recolectar información de las condiciones lumínicas y su nivel de deterioro:

La inspección de campo realizada en el sendero del barrio El Dorado, en el municipio de Málaga, reveló un estado crítico de la infraestructura lumínica existente, evidenciando una necesidad importante de mejora. El sendero cuenta con un total de cinco luminarias instaladas a lo largo de los 203 metros de extensión del sendero, esto sumado a que el sistema de iluminación está ubicado a costado derecho de la vía, siendo vista desde la entrada al barrio, en este orden de ideas, y debido a la altura de los árboles centrales se presenta obstrucción de la poca iluminación del carril izquierdo, en definitiva, de las 5 luminarias existentes, únicamente dos de ellas se encuentran funcionando correctamente, una ubicada en la entrada del sendero y la otra al final de la vía. Las luminaria restantes, localizadas en la sección central del sendero, se encuentran inoperables, así como otra tipo farol ubicada en el centro del sendero donde se cuenta con presencia de árboles, esta última farola no cuenta con conexiones que proporcionen iluminación por lo tanto su funcionalidad también es nula. Es así como, esta deficiencia genera un extenso tramo de aproximadamente 150 metros en la zona central del sendero que permanece en total oscuridad durante las horas nocturnas. Esta ausencia de iluminación expone a los habitantes del barrio El Dorado y a la población flotante que utiliza el sendero como ruta principal hacia la zona comercial del centro de Málaga a condiciones de inseguridad y posibles accidentes por la falta de visión amplia a elevadas horas de la noche. A continuación, se muestran las imágenes donde se evidencia las obstrucciones de iluminación y el estado actual de las lámparas y sistemas de iluminación dentro del sendero.

En la figura 6, se muestra la disponibilidad de las luminarias y la obstrucción que se presenta en ellas donde se observa cómo la vegetación ha invadido parte de la infraestructura, obstaculizando la visibilidad. Lo cual lleva al deterioro evidente del sistema de iluminación en el sendero del barrio El Dorado.

Figura 6.

Documentación del estado actual de las luminarias existentes a lo largo del sendero.



Nota. Documentación del estado actual de las luminarias existentes a lo largo del sendero. (a) Luminaria parcialmente oculta por la expansión de un árbol, vista desde un ángulo cercano que muestra la luminaria integrada entre las ramas. (b) La misma luminaria, vista desde un ángulo más lejano a lo largo del sendero, donde se aprecia la obstrucción de la luminaria por la vegetación.

En la figura 7 se puede evidenciar como el deficiente programa de mantenimiento sumado a los factores ambientales han ocasionado el daño de los sistemas de iluminación y por lo tanto la pérdida de estos materiales y el incremento en el area no iluminada. Esta figura

corresponde a una luminaria tipo farola que está instalada en el lugar, justo en la franja central del sendero en condiciones nulas de funcionamiento.

Figura 7.

Luminaria tipo farola no funcional, ubicada en la franja central del sendero



A continuación, en la figura 8 se muestra una de las problemáticas identificadas, la ubicación de las luminarias a alturas excesivas. Esta configuración, combinada con la densa vegetación circundante, provoca una obstrucción de la luz emitida por los árboles existentes, resultando en zonas con deficiente o nula iluminación. Esta observación fue de carácter importante para comprender las deficiencias del sistema actual y para establecer los requisitos de diseño del nuevo sistema propuesto.

Figura 8.

Luminarias a alturas exageradas, donde la iluminación se ve obstruida por los árboles existentes



Nota. Evaluación de la iluminación existente en el sendero. (a) Vista de una luminaria desde una perspectiva perpendicular al sentido del sendero, destacando la altura de su instalación y su posición entre la vegetación. (b) Vista de la misma luminaria desde un plano paralelo al sendero, evidenciando su gran altura y cómo esta, junto con la obstrucción por la vegetación, impide una iluminación adecuada y suficiente para la transitabilidad del sendero. Tomado de fuente propia.

En la figura 9 se puede observar una de las luminarias que está en buen estado y brinda iluminación de manera correcta al sector debido a su sistema de energía mediante la adición de un panel solar, esto optimiza el funcionamiento y contribuye a mantener una luminaria funcional que ayude al buen transito desde el inicio del sendero hasta donde su extensión lo permite.

Figura 9.

Luminaria funcional, ubicada en la entrada del barrio en el extremo del sendero en estudio.



Nota: Tomado de fuente propia.

Medir las condiciones de longitud y estado actual del sendero peatonal en el barrio El Dorado:

El análisis detallado de las características físicas del sendero peatonal en el barrio El Dorado permitió determinar sus dimensiones precisas y evaluar su estado de conservación. El corredor objeto de estudio cuenta con una longitud total de 203 metros y un ancho promedio de 5.5 metros. Su diseño estructural se compone de dos franjas peatonales laterales, cada una con un ancho de 1.5 metros, que flanquean una franja central de 2.5 metros de ancho cubierta por vegetación y árboles. Esta configuración direcciona el flujo peatonal de manera predominante hacia las franjas laterales.

De las figuras 10 a la 13, se muestran las mediciones realizadas sobre las dimensiones del sendero para tener una idea más detallada del area sobre la cual se quiere aplicar este proyecto y la geometría del sitio para poder llevar a cabo una correcta distribución de los sistemas de iluminación más adelante.

Figura 10.

Mediciones de las longitudes del sendero de estudio



Nota. La imagen muestra una vista longitudinal del sendero del Barrio El Dorado, en el municipio de Málaga, Santander, donde se realizan los procesos de medición que indican su extensión en términos de longitud de 203 m. Tomado de fuente propia.

Figura 11.

Medición del ancho en diferentes tramos del sendero de estudio



Nota. La imagen presenta una vista enfocada en la toma de mediciones transversales para determinar el ancho en el tramo específico de estudio. Tomado de fuente propia.

Figura 12.

Medición del ancho en diferentes tramos del sendero de estudio



Nota. La imagen presenta una vista enfocada en la toma de mediciones transversales para determinar el ancho en el tramo específico de estudio. Tomado de fuente propia.

Figura 13.

Vista desde un extremo del sendero.



Nota. La imagen ofrece una desde uno de sus extremos, proporcionando una visión general de su configuración y entorno para la planificación global del proyecto. Tomado de fuente propia.

En cuanto al estado de la superficie, se identificó que el asfalto del sendero presenta un deterioro significativo, manifestado a través de diversas patologías como grietas, baches y desniveles pronunciados. Estas condiciones no solo dificultan el tránsito seguro y cómodo de los peatones, sino que también representan un impedimento considerable para la circulación de medios de transporte alternativos, como las bicicletas, las cuales se ven obligadas a esquivar las irregularidades del terreno, afectando la fluidez y la seguridad del recorrido. Este deterioro físico es un factor crítico a considerar para la implementación y durabilidad de cualquier sistema de captación de energía instalado sobre la superficie.

A continuación, en la figura 14 se muestra el estado actual del sendero donde se evidencian los altos niveles de deterioro de la capa de rodadura presentando fracturas,

hundimientos y otras patologías que impiden un correcto flujo peatonal y pueden crear incidentes debido a su mala calidad de estabilidad.

Figura 14.

Desniveles en las placas de concreto rígido, generando dificultades para el tránsito.



Nota. Tomado de fuente propia.

Para la figura 15 se evidencia el deterioro debido al gran enraizamiento de las especies vegetales que se encuentran en el perímetro central del sendero y a su vez por las condiciones de constante uso del sendero, la capa de rodadura se encuentra con patologías como fisuraciones y daños representativos que pueden impedir un tránsito cómodo y seguro para los transeúntes.

Figura 15.

Fisuraciones y fracturas en la capa de rodadura.



Nota. Tomado de fuente propia.

Realizar aforos peatonales para determinar el (TPD) y la cantidad de energía mecánica disponible:

El análisis del tráfico peatonal constituye un elemento fundamental para el dimensionamiento de sistemas de captación de energía piezoeléctrica, ya que la eficiencia de estos dispositivos depende directamente de la cantidad y frecuencia de cargas mecánicas aplicadas sobre su superficie. En este contexto, la determinación del Tráfico Promedio Diario (TPD) permite establecer no solo la factibilidad del sistema propuesto, sino también el cálculo de la energía mecánica disponible para la generación eléctrica destinada al sistema de iluminación.

La metodología de aforos peatonales implementada contempló la categorización de usuarios en tres grupos principales: niños, adultos y ciclistas, considerando que cada categoría aporta diferentes niveles de energía mecánica debido a las variaciones en peso corporal y patrones de desplazamiento. Esta diferenciación resulta crucial para el cálculo preciso de la energía disponible, dado que la generación piezoeléctrica es directamente proporcional a la magnitud de la fuerza aplicada y la frecuencia de activación de los elementos sensores.

El estudio abarcó un período de medición estructurado en dos semanas de análisis: la primera semana del 20 al 26 de enero de 2025 tomando datos cuando aún los estudiantes de la sede UIS se encontraban en tiempo vacacional, y la segunda del 10 al 16 de febrero de 2025, proporcionando una muestra representativa que incluye días estudiantiles tanto días laborables como fines de semana para capturar las variaciones en los patrones de uso del sendero.

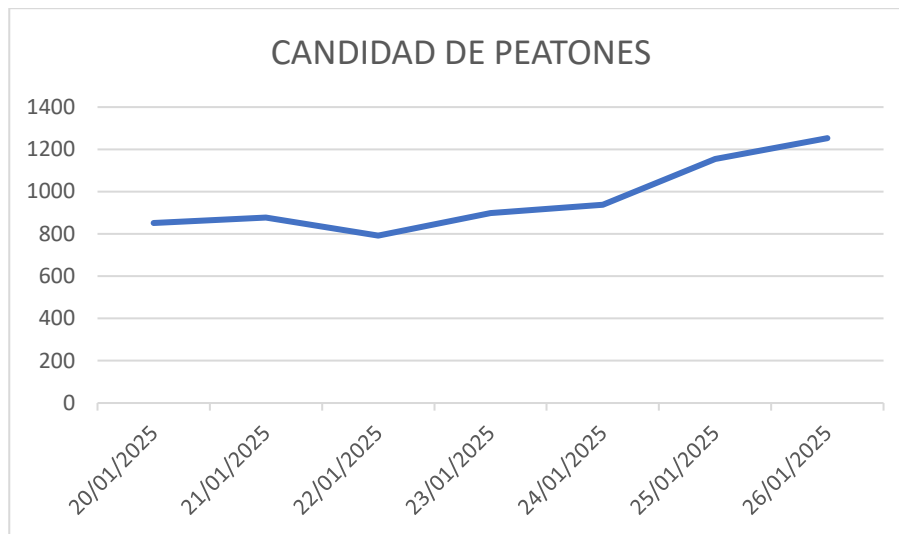
Tabla 2.

Conteo de Aforos Peadonales en el Sendero del Barrio El Dorado (semana no estudiantil)

<i>DIA</i>	<i>CANDIDAD DE PEATONES</i>
<i>20 de enero de 2025</i>	<i>851</i>
<i>21 de enero de 2025</i>	<i>877</i>
<i>22 de enero de 2025</i>	<i>792</i>
<i>23 de enero de 2025</i>	<i>899</i>
<i>24 de enero de 2025</i>	<i>938</i>
<i>25 de enero de 2025</i>	<i>1155</i>
<i>26 de enero de 2025</i>	<i>1253</i>

Figura 16.

Gráfico de población semanal



El análisis de estos aforos revela un Tránsito Promedio Diario (TPD) para el día lunes 20 de enero del año 2025, se presenta un total de 851 usuarios en el día de muestreo, compuesto por 110 niños, 640 adultos y 101 usuarios de bicicleta. Los patrones de movilidad temporal identifican dos picos de afluencia significativos. El primer pico matutino se registra entre las 7:00 am y las 8:00 am (72 usuarios), caracterizado por un incremento notable de adultos y ciclistas, lo cual se correlaciona directamente con el inicio de las actividades laborales y académicas en la Universidad Industrial de Santander, dado que el sendero es una vía de acceso principal a esta institución. Un segundo periodo de alta afluencia se observa de 10:00 am a 11:00 am (111 usuarios) y de 12:00 m a 1:00 pm (101 usuarios), picos que están asociados con desplazamientos para almuerzos o cambios de jornada tanto en la universidad donde se presentan también obras de adecuación de la planta física de la institución como en la zona comercial adyacente. El flujo de usuarios se mantiene relativamente alto durante la tarde, alcanzando otro punto elevado entre las 5:00 pm y las 6:00 pm (95 usuarios), coincidiendo con el horario de salida y regreso a casa. Las horas con menor tránsito se presentan entre las 3:00 pm

y 4:00 pm (45 usuarios). Así mismo sucede para los días martes a domingo, donde se mantiene el flujo peatonal y los picos en dichas horas, donde los habitantes mantienen un elevado tránsito.

En la tabla 2, se observa además una variación en la cantidad de peatones a lo largo de la semana. Los días laborales, del 20 al 24 de enero, presentan un rango de entre 792 y 938 peatones. Sin embargo, hay un incremento notable durante el fin de semana, con 1155 peatones el sábado 25 de enero debido a que este día de la semana es conocido por ser día de mercado altamente comercial en el municipio, del mismo modo existe un pico de 1253 peatones el domingo 26, esto influenciado por ser día libre tanto para trabajadores como para estudiantes que asisten al centro a participar de las diferentes actividades de esparcimiento programadas por la alcalde u otros eventos municipales que generalmente se realizan los fines de semana, sábado y domingo en la zona céntrica del municipio. Este patrón sugiere un mayor uso del sendero durante los días de descanso, lo cual es un factor importante para el diseño y la planificación de la infraestructura.

La cuantificación de este TPD es fundamental para estimar la cantidad de energía mecánica disponible para ser convertida. Al considerar los pesos promedio de los usuarios (70 kg para adultos, 40 kg para niños y 80 kg para usuarios de bicicleta), se puede inferir una magnitud significativa de fuerza y, por ende, de energía mecánica potencialmente captable por el sistema piezoeléctrico. El flujo constante de esta masa en movimiento a lo largo del sendero es el insumo principal para la generación de energía mediante el efecto piezoeléctrico.

Tabla 3.

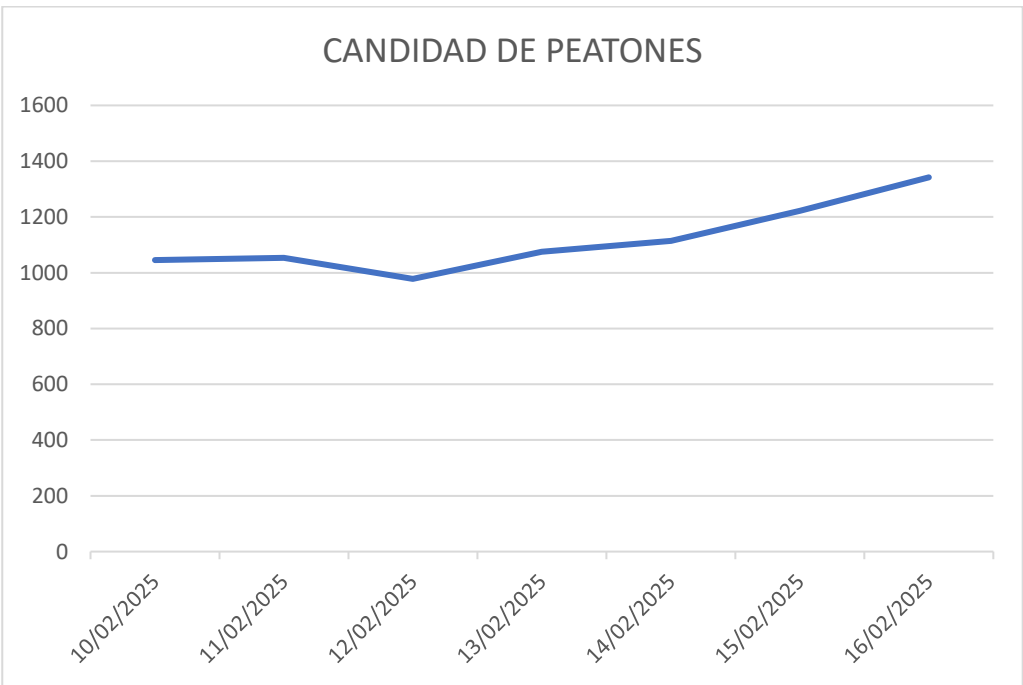
Conteo de Aforos Peatonales en el Sendero del Barrio El Dorado (semana estudiantil)

<i>Dia</i>	<i>Cantidad De Peatones</i>
<i>10 de febrero de 2025</i>	<i>1045</i>
<i>11 de febrero de 2025</i>	<i>1053</i>
<i>12 de febrero de 2025</i>	<i>978</i>
<i>13 de febrero de 2025</i>	<i>1075</i>
<i>14 de febrero de 2025</i>	<i>1114</i>
<i>15 de febrero de 2025</i>	<i>1222</i>
<i>16 de febrero de 2025</i>	<i>1342</i>

Nota. Tabla de realización propia.

Figura 17.

Gráfico de población semanal



La comparación entre La semana de enero y febrero reflejó un incremento del 30% en niños y 20.8% en adultos, lo que indica una tendencia estacional positiva, posiblemente influida por el regreso a clases y condiciones climáticas más favorables. Este aumento sustancial refuerza la viabilidad de implementar más unidades piezoeléctricas a lo largo del sendero. De hecho, se

plantea la posibilidad de instalar entre 15 y 20 baldosas piezoeléctricas a lo largo de los 203 metros del sendero, lo que permitiría alimentar al menos una luminaria LED de bajo consumo.

Utilizando los datos completos disponibles de los dos lunes medidos, el TPD se establece en 948 usuarios diarios, compuesto por 126 niños (13.3%), 707 adultos (74.5%) y 115 ciclistas (12.1%). Esta distribución porcentual resulta favorable para la generación piezoeléctrica, considerando que el segmento adulto, predominante en el tráfico, aporta la mayor cantidad de energía mecánica por unidad de paso.

Los datos sugieren que el sendero tiene capacidad para soportar un sistema piezoeléctrico de mayor escala. Con el tráfico identificado y considerando la longitud del sendero de 203 metros, se podrían instalar hasta 15-20 baldosas piezoeléctricas de 0,7 *0,7 m para que satisfagan la alimentación de una luminaria, multiplicando proporcionalmente la capacidad de generación energética y así distribuir las a lo largo del sendero.

Proyección del Tránsito Promedio Diario Futuro

Partiendo del TPD actual de 851 usuarios, se realizó una proyección del Tránsito Promedio Futuro (TPF) con un horizonte de cinco años. Para esta estimación, se utilizó la tasa de crecimiento poblacional anual del municipio de Málaga del 1.2%, reportada por el DANE (2018), asumiendo que el crecimiento urbano y la dinámica de la Universidad Industrial de Santander influirán proporcionalmente en el uso del sendero.

Método de Crecimiento Geométrico

El método de crecimiento geométrico asume que la población crece a una tasa constante, similar al interés compuesto. Este método es apropiado para áreas urbanas en desarrollo

moderado como el barrio El Dorado. La fórmula utiliza el principio de interés compuesto donde el crecimiento es proporcional al tamaño actual de la población.

Población inicial del barrio El Dorado (2025): 2,800 habitantes

Tasa de crecimiento estimada: 1.5% anual (0.015)

Para 2030 ($t = 5$):

$$P(2030) = 2,800 * (1 + 0.015)^5 = 3,017 \text{ habitantes}$$

Método Aritmético

El método aritmético supone un crecimiento constante de la población. Se considera más conservador que el método geométrico y es adecuado para poblaciones estables o con crecimiento limitado. Este método asume que la población crece o decrece en una cantidad constante por unidad de tiempo.

Para 2030 con tasa de 0.01:

$$P(2030) = 2,800 + (0.01 * 5 * 2,800) = 2,940 \text{ habitantes}$$

Método Exponencial

El método exponencial considera que el crecimiento poblacional es continuo en lugar de discreto. Es adecuado para poblaciones que experimentan crecimiento acelerado o en etapas tempranas de urbanización. Este método requiere conocer la población en dos momentos distintos para calcular la tasa de crecimiento exponencial.

Considerando $k = 0.014$:

$$P(2030) = 2,800 * e^{(0.014 * 5)} = 2,998 \text{ habitantes}$$

Proyección del Tránsito Peatonal Diario (TPD)

Esta fórmula establece una relación directa entre el crecimiento poblacional y el incremento del tránsito peatonal. Asume que el tránsito peatonal aumentará proporcionalmente al crecimiento de la población, lo cual es razonable para áreas residenciales donde los patrones de movilidad están directamente relacionados con la cantidad de residentes.

- TPD inicial (2025): 1,066 personas/día promedio de los datos recolectados
- Población inicial: 2,800 habitantes
- Población proyectada (2030): 3,017 habitantes

$$TPD(2030) = 1,066 * (3,017/2,800) = 1,149 \text{ personas/día}$$

Modelo de Factor de Crecimiento

Este modelo aplica un factor de crecimiento derivado de la tasa de crecimiento poblacional u otros indicadores socioeconómicos. Es particularmente útil cuando se dispone de datos históricos limitados, pero se conocen las tasas de crecimiento regional o municipal. El factor de crecimiento puede ajustarse para considerar diferentes escenarios (optimista, conservador, pesimista).

TPD inicial (2025): 1,066 personas/día

Tasa de crecimiento: 1.2% anual (según documento)

Factor de crecimiento para 2030: $(1 + 0.012)^5 = 1.061$

$$TPD(2030) = 1,066 * 1.061 = 1,131 \text{ personas/día}$$

Cálculo del Tránsito en Hora Pico (THP)

Esta fórmula determina el flujo peatonal máximo durante la hora de mayor afluencia del día. El factor de hora pico (FHP) es un parámetro crítico para el dimensionamiento de infraestructura peatonal y se determina mediante aforos que identifican los patrones de movilidad locales.

TPD proyectado (2030): 1,131 personas/día

Factor de Hora Pico (según datos recopilados): 0.157 (valor máximo observado en hora pico 11:00-12:00)

$$THP(2030) = 1,131 * 0.157 = 178 \text{ personas/hora en hora pico}$$

Energía generada por día

TPD (2025): 1,066 peatones/día

E(pisada): 0.05 Wh

η : 0.18 (18%)

$$E(\text{día})(2025) = 1,066 * 0.05 * 0.18 = 9.594 \text{ Wh/día}$$

Proyecciones:

$$E(\text{día})(2030) = 1,131 * 0.05 * 0.18 = 10.179 \text{ Wh/día}$$

$$E(\text{día})(2035) = 1,201 * 0.05 * 0.18 = 10.809 \text{ Wh/día}$$

Aplicación con datos proyectados:

$$E(\text{día})(2030): 10.179 \frac{\text{Wh}}{\text{día}}$$

$$E(\text{día})(2030) = 10.179 * 3600$$

$$E(\text{día})(2030) = 36,644.4 \text{ Ws/día}$$

Potencia media generada

$$P(media)(2030) = \frac{36,644.4}{24 * 3600}$$

$$P(media)(2030) = 0.424 \text{ W}$$

Capacidad de iluminación

E(día) (2030): 10.179 Wh/día

η (almacenamiento): 0.85 (85%)

P(luminaria): 2.5 W (LED de bajo consumo)

$$H(iluminación) = \frac{10.179 * 0.85}{2.5}$$

$$H(iluminación) = 3.46 \text{ horas de iluminación}$$

Tabla 4.

Proyección poblacional por los tres métodos

<i>Año</i>	<i>Población (Método Geométrico)</i>	<i>Población (Método Aritmético)</i>	<i>Población (Método Exponencial)</i>
2025	2800	2800	2800
2026	2842	2828	2839
2027	2885	2856	2880
2028	2928	2884	2920
2029	2972	2912	2961
2030	3016	2940	3003
2031	3062	2968	3045
2032	3108	2996	3088
2033	3154	3024	3132
2034	3201	3052	3176
2035	3250	3080	3221

Figura 18

Gráfico de crecimiento poblacional

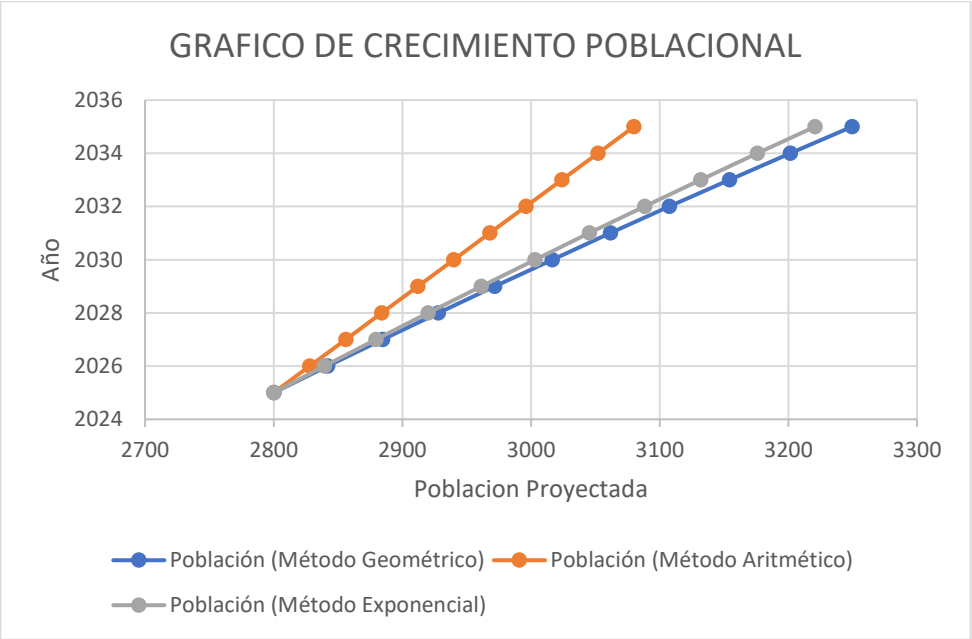


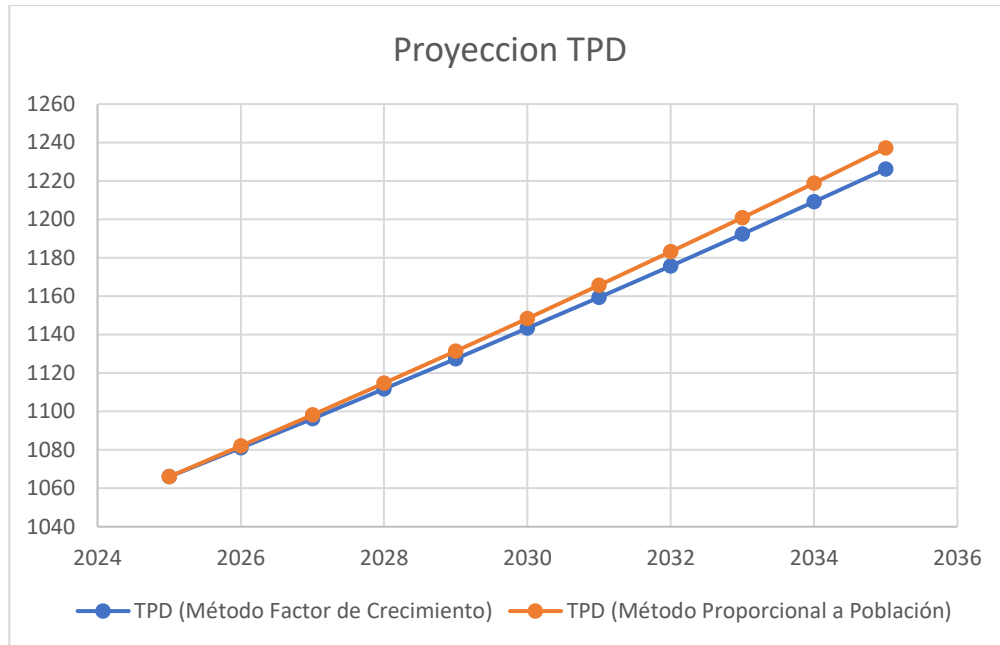
Tabla 5.

Tránsito promedio diario proyectado

Año	TPD (Método Factor de Crecimiento)	TPD (Método Proporcional a Población)
2025	1066	1066
2026	1081	1082
2027	1096	1098
2028	1112	1115
2029	1127	1131
2030	1143	1148
2031	1159	1166
2032	1176	1183
2033	1192	1201
2034	1209	1219
2035	1226	1237

Figura 19.

Gráfico de proyecciones del TPD



De acuerdo con esta proyección, se estima que, en un periodo de cinco años, el Tránsito Promedio Diario en el sendero podría incrementarse a aproximadamente 903 usuarios/día. Este crecimiento futuro es un factor indispensable para el dimensionamiento adecuado de la capacidad de generación y almacenamiento del sistema piezoeléctrico propuesto. Considerar este aumento en el flujo peatonal asegura que el prototipo no solo satisfaga las demandas actuales de iluminación, sino que también tenga la capacidad de adaptarse a una mayor disponibilidad de energía mecánica a largo plazo del sistema.

Basado en una eficiencia de conversión del 18% y una generación promedio de 0.05 Wh por pisada, se estimó que en 2025 se podrían generar 9.594 Wh/día. Para el año 2030, con el TPD proyectado, esta cifra ascendería a 10.179 Wh/día. Aunque estas cantidades de energía parecen modestas, son suficientes para alimentar una luminaria LED durante más de 3 horas diarias,

gracias al bajo consumo y alta eficiencia de estas luminarias. Además, con mejoras en el almacenamiento energético (eficiencia del 85%), se optimiza aún más el uso de la energía captada.

Fase 2. Recolección de información técnica y teórica:

Actividades.

Reunir información acerca de las características de los equipos:

Baldosas piezoeléctricas.

Las baldosas piezoeléctricas aprovechan el efecto piezoeléctrico, un fenómeno por el cual ciertos materiales, al ser sometidos a una tensión mecánica, generan una carga eléctrica. Este principio es la base de su funcionamiento para la conversión de energía cinética en electricidad. El cuarzo es uno de los materiales más comúnmente utilizados en los sensores piezoeléctricos debido a sus propiedades cristalográficas y su capacidad para generar una diferencia de potencial al deformarse. El proceso se inicia cuando la baldosa recibe una carga, como la pisada de un peatón, de manera perpendicular a su superficie. Esta acción provoca una contracción o deformación de los componentes piezoeléctricos en su interior, lo que a su vez genera una separación de cargas eléctricas y una polarización, produciendo así una corriente eléctrica que puede ser capturada y utilizada (Ojeda, 2019).

Una baldosa piezoeléctrica típica se compone de tres partes principales, diseñadas para optimizar la captación y conversión de energía (Ojeda, 2019):

Parte Superior (Capa de Carga): Es la superficie expuesta que recibe directamente el impacto de la pisada. Puede estar fabricada con diversos materiales como cerámica, hormigón, madera o polímeros, los cuales deben ser lo suficientemente resistentes para soportar el tránsito

constante y las condiciones ambientales, a la vez que transmiten eficientemente la fuerza a los sensores internos.

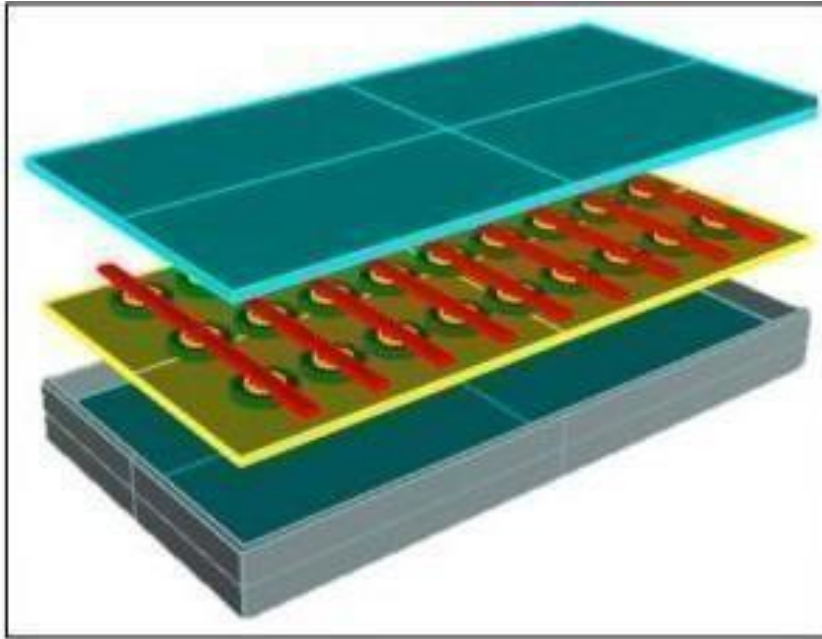
Sensores Piezoeléctricos: Ubicados debajo de la capa de carga, estos son los elementos centrales encargados de generar la energía eléctrica a partir de la deformación mecánica. Pueden estar compuestos por materiales cerámicos como el Titanato Zirconato de Plomo (PZT), polímeros como el PVDF (Fluoruro de Polivinilideno), o cristales naturales como el cuarzo. La elección del material influye directamente en la eficiencia de conversión y la durabilidad de la baldosa (Siddique & Sinha, 2018).

Parte Inferior (Conversión y Conexiones): En esta sección se integra la electrónica necesaria para rectificar, regular y almacenar la energía eléctrica generada por los sensores. Aquí se realizan las conexiones eléctricas que permiten transferir la energía hacia un sistema de almacenamiento o directamente a la carga (Ojeda, 2019).

La Figura 20 ilustra esquemáticamente los niveles estructurales de una baldosa piezoeléctrica, mostrando la disposición de estos componentes

Figura 20.

Niveles de las baldosas.



Nota. Tomado de World Step

Tipos de luminarias.

RETILAP, 2024. (Reglamento Técnico De Iluminación y Alumbrado Público) en su libro 3 de instalaciones de sistemas de iluminación, emitido por el ministerio de minas y energía, especifica los factores a tener en cuenta para el establecimiento de nuevos espacios de alumbrado público. De acuerdo a lo anterior, establece que se debe llevar a cabo una distribución fotométrica del lugar para obtener sus características y datos de diseño, esto varía de acuerdo a la cantidad y tipo de tránsito de la zona, así como una caracterización de uso del espacio público en el que se trabaja. (RETILAP, 2024).

Para la escogencia de los equipos de iluminación, es imprescindible utilizar la información fotométrica de cada luminaria, la cual detalla sus características técnicas. Basándose en estas propiedades, el diseñador puede seleccionar aquellas que mejor se adapten al tipo de

espacio y a los requisitos del proyecto (RETILAP, 2024). Las características técnicas clave consideradas incluyen:

Flujo luminoso (lm): La cantidad total de luz visible emitida por una fuente.

Eficacia luminosa (lm/W): La relación entre el flujo luminoso y la potencia eléctrica consumida, indicando la eficiencia energética de la luminaria, incluyendo pérdidas en accesorios eléctricos o electrónicos.

Índice de reproducción cromática (CRI o IRC): Una medida de la capacidad de una fuente de luz para reproducir fielmente los colores de los objetos en comparación con una fuente de luz ideal o natural.

Temperatura del color (K): Describe la apariencia de color de la luz emitida por una fuente, generalmente clasificada como cálida (bajos Kelvin), neutra o fría (altos Kelvin).

Vida promedio de la fuente (h): La duración estimada de una luminaria antes de que su flujo luminoso decaiga a un porcentaje específico de su valor inicial (usualmente 70% o 50%).

Potencia máxima de operación: El consumo máximo de energía eléctrica en vatios (W) que la luminaria requiere para funcionar.

Se analizaron los siguientes tipos de luminarias comúnmente empleadas en alumbrado público:

Lámparas de Sodio a Alta Presión (SAP): Reconocidas por su alta eficiencia luminosa y prolongada vida útil, estas lámparas son tradicionalmente utilizadas en la iluminación de calles, carreteras y áreas industriales debido a su potente emisión de luz. Su característica luz amarilla-anaranjada presenta un bajo Índice de Reproducción Cromática (IRC), lo que puede distorsionar la percepción de los colores. El espaciamiento típico entre luminarias SAP es amplio, oscilando entre 30 y 60 metros, dependiendo de la potencia y la altura de montaje. Requieren un tiempo de

calentamiento de varios minutos para alcanzar su rendimiento óptimo y no son adecuadas para ciclos frecuentes de encendido/apagado. A pesar de su eficiencia, están siendo paulatinamente reemplazadas por tecnologías LED debido a la superior calidad de luz y control que estas últimas ofrecen (Morrison, J. E. 2022).

Lámparas de Haluro Metálico (Metal Halide): Estas lámparas proporcionan una luz blanca brillante con una buena reproducción de color, lo que las hace una opción popular para la iluminación de espacios comerciales, estadios deportivos y áreas de exhibición. Su eficiencia es moderada a alta, y aunque su vida útil es inferior a la de las lámparas de sodio, compensan con una iluminación de mejor calidad cromática. El espaciamiento entre luminarias de haluro metálico varía en función de la aplicación, generalmente entre 15 y 40 metros en contextos de alumbrado público. Al igual que las SAP, estas lámparas necesitan un periodo de calentamiento y un tiempo de reencendido tras interrupciones. Son valoradas por su capacidad para iluminar grandes superficies con una luz que permite una excelente percepción de los colores, aspecto fundamental en eventos televisados o en iluminación arquitectónica (Narendran, N., & Gu, Y. 2023).

Luminarias LED (Diodo Emisor de Luz): Representan la tecnología de iluminación más avanzada y de rápido crecimiento en la actualidad. Ofrecen una combinación superior de alta eficiencia energética, una vida útil excepcionalmente larga y una excelente calidad de luz. Su versatilidad permite una amplia gama de temperaturas de color y elevados niveles de IRC, adaptándose a casi cualquier aplicación de iluminación. El espaciamiento entre luminarias LED es muy variable, pero generalmente posibilita una distribución de luz más uniforme, con distancias que pueden oscilar entre 10 y 50 metros en aplicaciones de alumbrado público (Schubert, E. F. 2021). Los LED se distinguen por su encendido instantáneo, su alta

direccionalidad (lo que minimiza la contaminación lumínica), y la capacidad de integrar opciones de atenuación y control inteligente. Su uso se ha extendido a un vasto rango de aplicaciones, desde la iluminación residencial y comercial hasta el alumbrado público, industrial y arquitectónico. A pesar de un costo inicial que puede ser más elevado, este se ve ampliamente compensado por el ahorro energético y la reducción significativa en las necesidades de mantenimiento a largo plazo (Bullough, J. D. 2022).

Lámparas Fluorescentes: Son conocidas por su eficiencia moderada y una buena reproducción de color, siendo comúnmente empleadas en interiores como oficinas, escuelas y comercios. El espaciamiento entre luminarias fluorescentes en aplicaciones de techo suele ser de 1.5 a 3 metros, dependiendo del diseño y los niveles de iluminación requeridos. Estas lámparas producen una luz difusa que contribuye a reducir el deslumbramiento y las sombras pronunciadas, lo que las hace confortables para ambientes de trabajo. Aunque poseen una vida útil relativamente larga, no alcanzan la durabilidad de los LED. Las versiones modernas han mejorado notablemente en calidad de luz y eficiencia energética. Sin embargo, contienen pequeñas cantidades de mercurio, lo que genera preocupaciones ambientales para su desecho. En muchas aplicaciones, están siendo reemplazadas por alternativas LED que ofrecen mayor eficiencia y flexibilidad de diseño (U.S. Environmental Protection Agency. 2022).

Sistemas de Almacenamiento de Energía.

Los sistemas de almacenamiento de energía o mejor conocidas como baterías de almacenamiento, son componentes fundamentales en un sistema de generación energética, ya que permiten acumular la electricidad producida, para el caso de estudio aquella producida de forma intermitente por las pisadas y redirigirla al sistema de iluminación que se vaya a emplear.

La elección de la tecnología de batería influye directamente en la eficiencia, vida útil y costos del sistema. Las características clave a considerar para las baterías incluyen:

Capacidad (Ah o Wh): Determina la cantidad de energía que la batería puede almacenar y entregar. Una mayor capacidad es necesaria para asegurar la autonomía del sistema durante periodos prolongados sin generación, como la noche completa.

Voltaje (V): El voltaje nominal de la batería debe ser compatible con los requerimientos del sistema de iluminación y el controlador de carga.

Ciclos de Vida: Representa el número de ciclos completos de carga y descarga que la batería puede soportar antes de que su capacidad se degrade significativamente. Las baterías de ciclo profundo son ideales para estas aplicaciones, ya que están diseñadas para descargas prolongadas y repetidas (González-Longatt & Rueda-Medina, 2019).

Eficiencia de Carga/Descarga: Indica la relación entre la energía que se puede recuperar de la batería y la energía que se utilizó para cargarla, lo que impacta las pérdidas del sistema.

Rango de Temperatura de Operación: Las baterías deben funcionar eficientemente dentro del rango de temperaturas del municipio de Málaga sin comprometer su rendimiento o vida útil.

Baterías de Plomo-Ácido (AGM y Gel): Son tecnologías maduras, relativamente económicas y robustas para aplicaciones estacionarias. Las baterías de tipo AGM (Absorbent Glass Mat) o Gel son selladas, libres de mantenimiento y ofrecen una buena resistencia a las vibraciones, siendo adecuadas para ciclos profundos, aunque tienen una densidad energética menor y una vida útil más limitada que las de litio (Vicente & Da Silva, 2019).

Baterías de Ión-Litio (Li-ion o LiFePO₄):

Ofrecen una alta densidad energética, una vida útil considerablemente más larga (mayor número de ciclos) y una mayor eficiencia de carga/descarga. Suelen ser más ligeras y compactas. Aunque su costo inicial es más elevado, su rendimiento y longevidad pueden justificar la inversión en aplicaciones de alto rendimiento y largo plazo (Manwell & McGowan, 2017).

Baterías de Níquel-Cadmio (NiCd):

Son baterías recargables que emplean hidróxido de níquel y cadmio como materiales de sus electrodos. Aunque han sido superadas por otras tecnologías debido a su "efecto memoria" (pérdida de capacidad si no se descargan completamente antes de recargar) y la toxicidad del cadmio, aún se utilizan en aplicaciones específicas que requieren alta corriente de descarga y un rendimiento robusto en condiciones extremas.

Baterías de Níquel-Metal Hidruro (NiMH):

Son una evolución de las baterías NiCd, ofreciendo una mayor densidad de energía y siendo menos tóxicas. Utilizan hidruro metálico como electrodo negativo e hidróxido de níquel como electrodo positivo. Son comunes en dispositivos electrónicos y vehículos híbridos, aunque tienen una vida útil y densidad de energía menores que las baterías de iones de litio.

Supercapacitores:

También conocidos como ultra condensadores, son dispositivos de almacenamiento de energía que guardan energía electrostáticamente en lugar de a través de una reacción química como las baterías. Esto les permite cargarse y descargarse mucho más rápido y soportar un número significativamente mayor de ciclos de carga/descarga que las baterías convencionales,

aunque su densidad de energía es notablemente inferior. Son ideales para aplicaciones que requieren ráfagas rápidas de energía y una vida útil extremadamente larga.

Comparar y categorizar los equipos de acuerdo a la cantidad de energía de consumo y emisión:

En la siguiente tabla se muestra una comparación de los distintos tamaños de baldosas piezoeléctricas comerciales ofertadas por diferentes empresas y con la cantidad de energía producida a partir de cada pisada en vatios (W).

Tabla 6.

Comparación de tamaño y energía producida por pisada para baldosas de diferentes empresas.

<i>Empresa</i>	<i>Tamaño baldosa</i>	<i>Energía producida por pisada</i>
<i>Step energy</i>	<i>40,1 cm x 40,85 cm</i>	<i>5 W</i>
<i>Pavegen Tiles</i>	<i>50 x 50 x 50 cm</i>	<i>7 W</i>
<i>Zibo Yuhai Electronic Ceramic Co., Ltd.</i>	<i>80 x 80 x 0.1</i>	<i>De 20 a 25 W</i>
<i>PZT ceramic</i>	<i>Tamaños menores a 25 cm</i>	<i>0.0084 W promedio</i>
<i>HOERBIGER Motion Control GmbH</i>	<i>x 23 x 0.26</i>	<i>a 22 W</i>

Nota. Tomado de Solban & Moussa, 2019

Por medio de investigaciones e información recolectada de diferentes proyectos que usan piezoelectricidad para su funcionamiento, se ha evaluado la posibilidad de tomar el criterio de la empresa PAVEGEN, una empresa impulsada y creada por Laurence Kembell-Cook y que cuenta con marcas y socios que buscan generar energías limpias y amigables con el medio ambiente. Por su amplia experiencia en el sector y por ser una marca líder y reconocida a nivel mundial

con estándares elevados en cuanto a este modo de iluminación, las placas piezoeléctricas producidas por la empresa PAVEGEN se convierte en el foco principal para ser usadas a lo largo de la investigación de este proyecto, dado que luego de analizar las diferentes empresas y tipos de placas, su tamaño, efectividad y gran impacto positivo en proyectos ya ejecutados, se convierte en la más confiable.

Según Herrera Emilio (2021), en un informe emitido sobre la empresa PAVEGEN indica que: Sus baldosas se hunden solo cinco milímetros, imperceptible para los transeúntes que pasan sobre ellas. Según esta empresa, cada pisada sobre esta pieza genera siete u ocho vatios de potencia, lo suficiente para que doce losetas a tope de carga produzcan la luz que requieren las farolas públicas de dos calles.

A continuación, en la tabla 7 se presenta un resumen de las principales características y modos de funcionamiento de diferentes tipos de luminarias usadas principalmente en alumbrados públicos urbanos, dando valores para la potencia, eficiencia y demás datos útiles para llevar a cabo esta investigación.

Tabla 7.

Comparación de las diferentes características de distintos tipos de luminarias usadas en alumbrado público.

<i>Tipo de Luminaria</i>	<i>Potencia (W)</i>	<i>Eficiencia (lm/W)</i>	<i>Vida útil (horas)</i>	<i>Distancia entre ellas (m)</i>	<i>Temperatura de color (K)</i>
<i>Sodio a Alta Presión</i>	<i>100 - 400</i>	<i>45 - 150</i>	<i>24,000</i>	<i>30-60</i>	<i>1,900 - 2,200</i>
<i>Metal Halide</i>	<i>100 - 400</i>	<i>75 - 100</i>	<i>10,000 - 15,000</i>	<i>15-40</i>	<i>2,500 - 5,000</i>
<i>LED</i>	<i>30 - 200</i>	<i>80 - 100</i>	<i>50,000 - 100,000</i>	<i>10-50</i>	<i>2,700 - 5,700</i>
<i>Fluorescente</i>	<i>40 - 150</i>	<i>40 - 80</i>	<i>50,000 - 100,000</i>	<i>1,5-3</i>	<i>2,700 - 5,700</i>

Nota. Tabla de realización propia.

Tabla 8.

Comparación de las diferentes características de distintos tipos de baterías de almacenamiento para sistemas piezoeléctricos.

<i>Tipo de Batería</i>	<i>Almacenamiento (Ah)</i>	<i>Voltaje Nominal (V)</i>	<i>Carga/Descarga (%)</i>	<i>T Operación (°C)</i>
<i>Plomo-Ácido</i>	<i>50 - 200</i>	<i>12</i>	<i>70 - 85</i>	<i>-20 a 50</i>
<i>Iones de Litio (Li-ion)</i>	<i>2 - 100</i>	<i>3.2 - 3.7</i>	<i>90 - 99</i>	<i>-20 a 60</i>
<i>Níquel-Cadmio (NiCd)</i>	<i>10 - 100</i>	<i>1.2</i>	<i>70 - 90</i>	<i>-20 a 65</i>
<i>Níquel-Metal Hidruro (NiMH)</i>	<i>10 - 100</i>	<i>1.2</i>	<i>65 - 85</i>	<i>-20 a 50</i>
<i>Supercondensadores</i>	<i>0,1 - 100 (F)</i>	<i>2.5 - 3.0 (por celda)</i>	<i>95 - 99</i>	<i>-40 a 70</i>

Nota. Tabla de realización propia.

Seleccionar los equipos considerando eficiencia, durabilidad y su adaptación a las condiciones de la zona:

La selección final de los equipos para el prototipo se basó en un análisis importante de su eficiencia energética, durabilidad operativa y su capacidad de adaptación a las condiciones específicas del sendero en el barrio El Dorado de Málaga.

Selección de Baldosa Piezoeléctrica

Para la selección de la baldosa piezoeléctrica, se optó por la tecnología de PAVEGEN como la opción principal para este proyecto. Más allá de su rendimiento comprobado, que indica una capacidad de generación consistente entre 7 y 8 W por pisada, un factor determinante para esta elección es la mínima imperceptibilidad de hundimiento al ser pisada, con solo 5 milímetros los cuales no dificultan el tránsito ni paso de transeúntes con coches de bebés o bicicletas, los cuales en la zona tienen gran afluencia. Esta característica es crucial para garantizar la comodidad y seguridad de los transeúntes, facilitando un tránsito constante y sin interrupciones, lo que maximiza la recolección de energía mecánica. Además, la facilidad de adaptabilidad de su

tecnología a diferentes entornos peatonales, permitiendo una integración factible en el diseño urbano sin alterar significativamente la superficie del sendero. Por otro lado, se considera que, así como PAVEGEN ofrece una geometría particular, el diseño del prototipo incorporará discos piezoeléctricos que se adaptarán dentro de una estructura geométrica específica de la baldosa, con el fin de optimizar el posicionamiento de estos elementos y maximizar la captura de energía. Esta modificación en la geometría interna busca encapsular de manera más eficiente la energía disponible, facilitando la producción de energía a gran escala. La reputación global de PAVEGEN y su amplia trayectoria en la implementación de proyectos de generación de energía cinética también brindan una confianza en la fiabilidad y escalabilidad de su tecnología, lo que se asemeja a nuestro objetivo de construir un sistema duradero y útil.

Selección de Luminaria

En cuanto a la selección de luminarias, basándose en la comparativa de la Tabla 7 y los requisitos del RETILAP, la tecnología de luminarias LED es la elección óptima para el prototipo. La principal justificación a base de la cual se hace esta selección, en su máxima eficiencia energética, con un rango de 80 a 100 lúmenes por vatio (lm/W), lo cual es crítico para un sistema alimentado por una fuente de energía renovable como la piezoeléctrica, ya que minimiza potencialmente el consumo y maximiza el aprovechamiento de cada vatio generado por las pisadas. Otro aspecto fundamental es su larga vida útil, que oscila entre 50,000 y 100,000 horas, lo que se traduce en una operación con bajo mantenimiento y costos reducidos a largo plazo, ideal para una infraestructura pública que busca sostenibilidad. La flexibilidad en la distribución de luz que ofrecen las luminarias LED permite adaptar el diseño de iluminación para una cobertura uniforme y efectiva a lo largo de los 203 metros del sendero, garantizando

una iluminación adecuada y segura. Es importante considerar que, para la instalación en senderos peatonales como el del barrio El Dorado, las alturas de instalación de las luminarias LED deben manejarse entre 3 y 5 metros para asegurar una distribución de luz óptima que evite sombras y puntos oscuros, contribuyendo a la seguridad de los peatones. Finalmente, la resistencia de las luminarias LED a condiciones ambientales adversas, como la humedad y la lluvia tienden a ser altas, lo que se considera un punto a favor para mantener a largo plazo las instalaciones del proyecto en un ámbito aplicable, esto la determina como un factor indispensable para su durabilidad y desempeño continuo.

Selección del Sistema de Almacenamiento o Baterías

Para el sistema de almacenamiento de energía, se considera en primer lugar, la selección de una tecnología de batería que ofrezca un equilibrio entre alta eficiencia, durabilidad a largo plazo y la capacidad de manejar ciclos de carga y descarga profundos. En este sentido, las baterías de Litio-Ferro fosfato (LiFePO_4) son la opción más adecuada. Una de las razones principales para esta selección es su alta densidad energética, que permite almacenar una mayor cantidad de energía en un volumen y peso reducidos, lo que se traduce en una ventaja significativa para la integración discreta en el prototipo y posteriormente en caso de aplicación, en el entorno del sendero, evitando soluciones voluminosas. Además, su impresionante larga vida útil, con un rango de 2,000 a 6,000 ciclos o más, supera ampliamente a las baterías de plomo-ácido, garantizando una operación confiable durante muchos años y reduciendo drásticamente la frecuencia de reemplazo. Esta característica es vital para la sostenibilidad económica y ambiental del proyecto. La alta eficiencia de carga/descarga de las baterías LiFePO_4 (90-99%) minimiza las pérdidas de energía durante el proceso de almacenamiento y recuperación, optimizando al máximo el aprovechamiento de la energía intermitente generada

por las baldosas piezoeléctricas. En conclusión, las baterías LiFePO₄ son más seguras que otras químicas de iones de litio, con menor riesgo de sobrecalentamiento y combustión, y toleran mejor las variaciones de temperatura y las condiciones operativas exigentes de un sistema de alumbrado público.

Fase 3. Diseño y construcción del prototipo.

Esta fase se centra en la conceptualización y materialización del prototipo del generador piezoeléctrico, integrado con un sistema de iluminación de baja potencia. Se considerarán las particularidades del entorno colombiano y se adaptarán los componentes para optimizar la eficiencia y factibilidad del sistema.

El diseño del prototipo se enfoca en integrar de manera eficiente la captación de energía mecánica a través de baldosas piezoeléctricas, su posterior almacenamiento y la distribución controlada para alimentar el sistema de iluminación LED.

Actividades.

Diseñar un prototipo para la captación, almacenamiento y distribución de energía:

El diseño de la baldosa piezoeléctrica se basó en los principios generales de funcionamiento de aquellas existentes en el mercado, de modo que su diseño sea capaz de soportar cargas perpendiculares que deformen los elementos piezoeléctricos en su interior, generando una diferencia de cargas en su superficie y produciendo electricidad, para este caso específico se usaron discos piezoeléctricos de 27 mm de diámetro en una cantidad total de 23 discos estos basándose en la cantidad mínima de energía producida por una sola placa que oscila entre los 0,2 y 1 V y la ubicación de estos con el fin que la cantidad de energía absorbida sea mayor y se acomode a las pisadas de los transeúntes.

Fuerza ejercida sobre los discos según el peso del peatón.

Donde:

f: Fuerza aplicada (Newtons, N).

m: Masa del objeto que activa el piezoeléctrico (Kilogramos, Kg).

g: Constante de gravedad, equivalente a 9.81m/s².

$$f = 80Kg \cdot \frac{9.81m}{s^2}$$

$$f = 784.8N$$

Cálculo de la Tensión por Unidad de Generación

Para el cálculo de la tensión generada, se utilizan los valores de la Tabla 1 (Datos del material piezoeléctrico), que son:

Constante piezoeléctrica (g₃₃): 25×10⁻³ Vm/N

Grosor del piezoeléctrico (h): 0.33 mm (0.00033 m)

Fuerza aplicada al cerámico (f): 784 N

Diámetro efectivo del piezoeléctrico (d): 20 mm (0.02 m)

Sustituyendo estos valores se obtiene la tensión generada en el disco piezoeléctrico:

$$V = (25 \times 10^{-3} (Vm/N) \times 0.00033m \times (4\pi(0.02m)^2 784N))$$

$$V = 20.58V$$

Para el diseño de la placa y con base a la información recolectada en la fase 3, se planteó mantener las capas de carga, absorción de energía y conexión, adicional a ello, la fuente de almacenamiento y las conexiones de amplificación energética del sistema, de modo que el diseño se plantea así:

Para la capa de carga o capa superior del prototipo por su facilidad y bajos niveles de conductividad eléctrica se plantea el uso de madera tipo MDF, la cual se caracteriza por tener buena capacidad de resistir cargas y su peso suele ser liviano, con el fin de evitar sobrecargas y daños en la capacidad de absorción de los discos. Las dimensiones con las cuales se plantea el diseño geométrico del prototipo son de 30 cm de ancho, por 30 cm de largo y 3 cm de alto, este último se diseñó de manera que los discos y la capa de carga encajen correctamente y permitan un desplazamiento mínimo de 5mm para la respectiva carga de los discos. Además, en esta capa se busca la adaptación de pequeños cilindros de silicona en sentido perpendicular a cada disco, de modo que la energía mecánica de la pisada se incremente solo en las zonas donde se encuentran los discos y su absorción sea más eficaz, adicional a ello, como método de protección entre los discos y la silicona se debe colocar un cartón para aislar los materiales y evitar daños en la capa inferior del prototipo.

En el caso de los sensores piezoeléctricos para este prototipo, se busca implementar un arreglo de 23 discos piezoeléctricos de 27 mm de diámetro, de material PZT (Titanato Zirconato de Plomo) conocidos por su capacidad de generar carga eléctrica bajo esfuerzo mecánico. La disposición de estos 23 discos dentro de la baldosa se optimiza para maximizar la recolección de energía por pisada. Para ello y según la información obtenida en la investigación, con el fin de incrementar el voltaje de salida del prototipo para la alimentación del módulo LED se dispone una conexión en serie de los discos para ello se hacen conexiones de 5 y 4 discos para obtener un total de 5 conexiones en serie (dos de 4 discos y tres de 5 discos respectivamente) de modo que al ubicarlas se encajen entre sí y la absorción de energía mecánica se optimice de acuerdo a la pisada logrando el voltaje y la corriente más adecuados para el sistema de almacenamiento y la posterior alimentación adecuada del módulo.

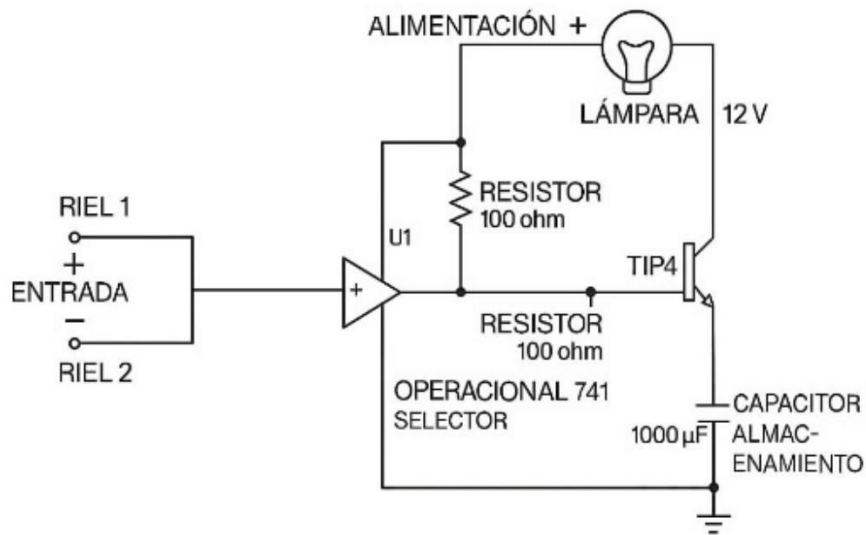
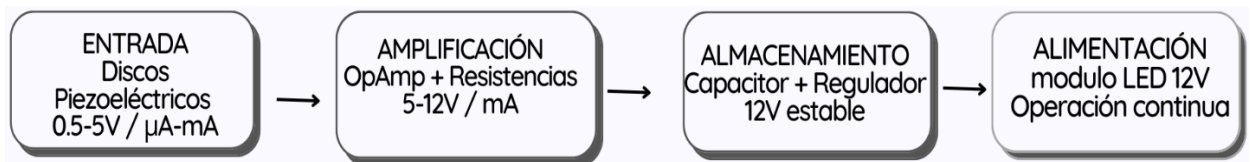
Del mismo modo, para la base de conversión y conexiones se manejara la electrónica básica para rectificar la corriente alterna generada por los piezoeléctricos a corriente continua necesaria para la carga de las baterías, de este modo se harán pruebas iniciales de la conexión de los piezoeléctricos para garantizar que si se está transmitiendo correctamente el voltaje de placa a placa tanto en los circuitos positivos (centro del disco) como en los circuitos negativos (disco externo) y de este modo hacer todas las conexiones en serie que alimenten la batería y de allí tras su amplificación, alimenten el módulo. Los discos luego de ser probado y conectados entre sí, se anclan a una base de madera de MDF que los ayuda a mantener en posición estable y les brinda una mayor capacidad de absorción al estar unidos a una base donde en coeficiente de compresión aumentara tras a pisada de los transeúntes.

Finalmente, para el almacenamiento de la energía y su amplificación se hará uso inicialmente de una batería recargable de 9V la cual estará unida al protoboard y que servirá como almacenamiento de la energía producida por la piezoelectricidad y posteriormente servirá de alimentación para el módulo LED haciendo funcionar completamente el prototipo. En el caso específico de la amplificación se tendrá un protoboard, implemento en el cual se harán todas las conexiones tanto de entrada y amplificación como de salida de energía. A continuación, se detalla en la tabla 9, los materiales usados para la amplificación y optimización de la energía y posteriormente en la figura 21 se muestra el diagrama eléctrico que se replicara en sobre el protoboard, este sistema se alimenta a través de una entrada piezoeléctrica con dos terminales, un riel positivo (+) y un riel negativo (-), que generan un voltaje de 0.5V a 5V, dependiendo de la presión aplicada. Para optimizar el rendimiento, la señal se amplifica utilizando un OpAmp 741 con ganancia variable y resistencias de 100Ω , logrando una salida de 5V a 12V. Posteriormente, la energía amplificada se almacena y se mantiene estable gracias a un capacitor

con un rango de $1000\mu\text{F}$ a $4700\mu\text{F}$ y un Regulador 7812, que asegura una salida constante de 12V para la alimentación continua del sistema.

Figura 21.

Diagrama eléctrico de distribución de los materiales para la captación, amplificación, almacenamiento y salida de los niveles de corriente para alimentar el módulo LED.

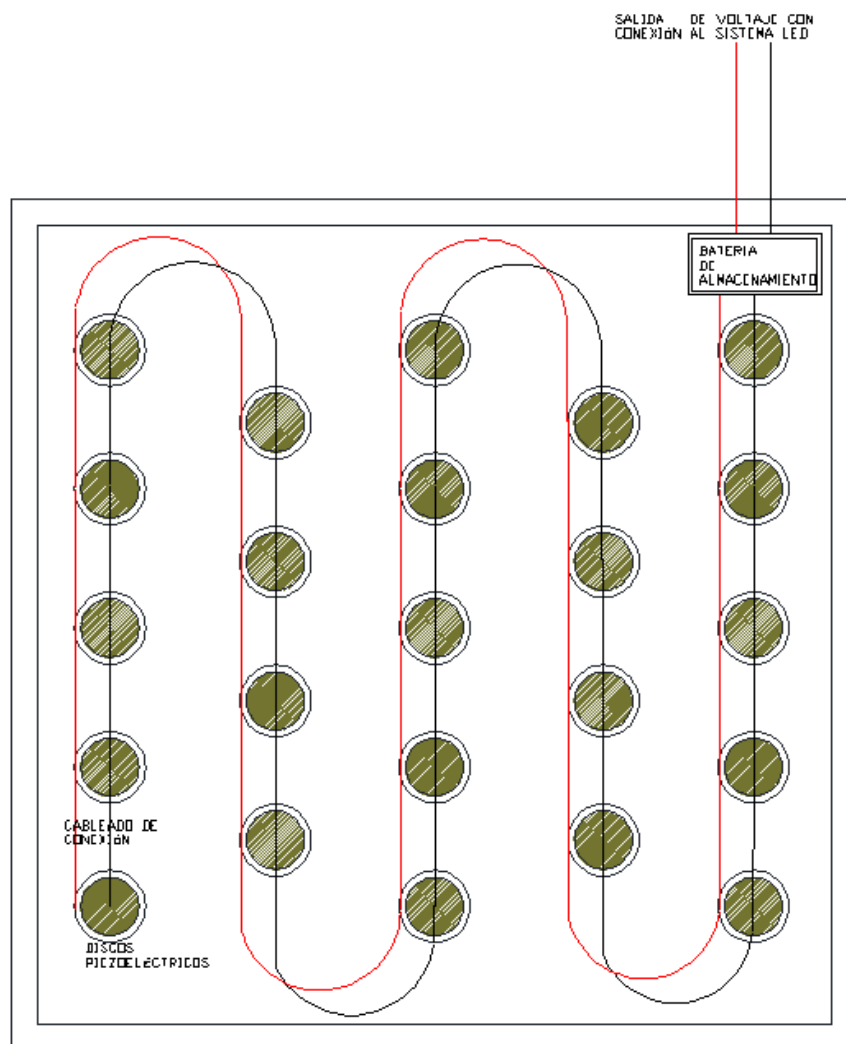


Nota. Tomado de fuente propia.

A continuación, en la figura 22, se muestra en un plano la forma en cómo se distribuyen los discos, las baterías y la salida de alimentación del módulo, si mismo se muestran las conexiones de negativos y positivos para la optimización de la energía del proyecto.

Figura 22.

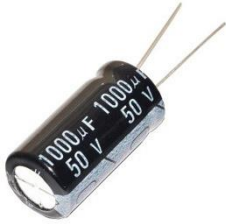
Diagrama de distribución de los discos piezoeléctricos y sistema de almacenamiento y salida de energía de la placa.



Nota. Tomado de fuente propia.

Tabla 9.

Materiales usados para la llegada, amplificación y salida de energía del prototipo.

<i>Dispositivo</i>	<i>Imagen</i>	<i>Datos</i>
<i>Disco piezoeléctrico</i>		<i>Medidas: 27 mm</i> <i>Tensión min: 3 V</i> <i>Tensión max: 20 V</i> <i>Tensión emisor-base = 5 V</i>
<i>Transistor NPN TIP 41C</i>		<i>Corriente colector = 6 A</i>
<i>Capacitor</i>		<i>Capacitancia: 1000 µF</i> <i>Tensión: 16 V</i> <i>Corriente: 50 µA</i>
<i>Resistencias</i>		<i>R = 1 kΩ. A ½ watt R = 100 Ω.</i> <i>A ½ watt</i>

Nota. Tabla tomada de Pérez et, al, 2016.

Construir el prototipo bajo las condiciones óptimas de diseño:

Una vez definidos los parámetros teóricos y el diseño conceptual del sistema, la siguiente fase fue la construcción física del prototipo. Este apartado detalla el proceso de ensamblaje, integración de componentes y validación de cada módulo, asegurando que la materialización del sistema se realice bajo las condiciones óptimas de diseño, garantizando así su funcionalidad y eficiencia para las pruebas de rendimiento finales.

En la Figura 23, se ilustra la disposición y preparación de los diversos materiales requeridos para el ensamblaje y la correcta conexión de cada disco piezoeléctrico. Esta organización previa asegura la eficiencia del proceso de manufactura, mostrando la selección de componentes clave como los propios discos, cables y elementos de unión, sentando las bases para una integración exitosa en el sistema.

Figura 23.

Disposición de los diferentes materiales para el ensamblaje y conexión de un disco piezoeléctrico.



Nota. Tomado de fuente propia.

La interconexión eléctrica de los componentes piezoeléctricos es un paso que garantiza la continuidad y eficiencia del flujo de energía. La Figura 24 documenta el proceso de soldadura, detallando cómo se logra la unión precisa de las piezas mediante el fundimiento de estaño. Esta imagen determina la importancia de una soldadura de calidad para asegurar la conductividad óptima de las conexiones, elementos esenciales para el rendimiento a largo plazo del sistema.

Figura 24.

Proceso de soldadura de las conexiones mediante el fundimiento de estaño para la unión de las piezas

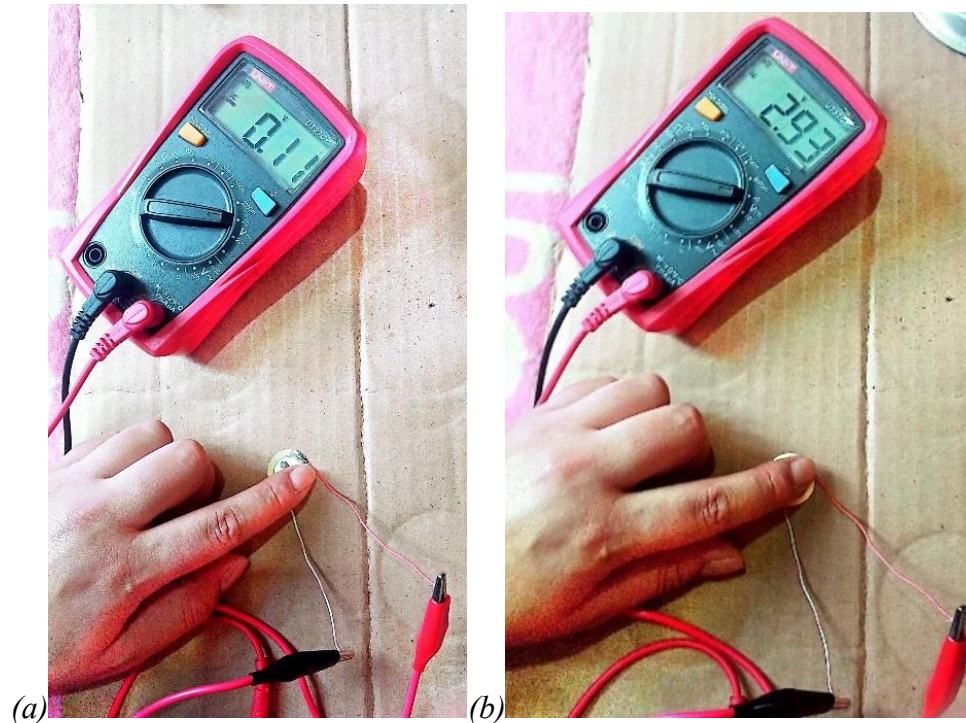


Nota. Tomado de fuente propia.

A continuación, en la Figura 25 presenta la medición del voltaje proporcionado por un solo disco piezoeléctrico. Antes de la integración en conjuntos mayores, fue indispensable verificar el rendimiento individual de cada elemento generador. Esta verificación es crucial para asegurar que cada unidad esté conduciendo la corriente de manera óptima, validando así la funcionalidad básica y la calidad de los componentes de este modo se determinó que de acuerdo a la energía mecánica que se le adicione a la celda, esta responderá con estímulos de voltaje mayores, los cuales varían desde 0.2 V hasta los 8 Vo más.

Figura 25.

Medición del voltaje proporcionado por un solo disco para garantizar que la corriente se esté conduciendo de manera óptima.



Nota. En el apartado (a) de la figura se muestra en inicio de carga de voltaje de un disco piezoelectrico, mediante la produccion de 0,11 V. en la seccion (b) se muestra el voltaje maximo del disco al aplicar mayor energia mecanica sobre el, mediante toques de transicion de energia. Tomado de fuente propia.

Para alcanzar los niveles de voltaje requeridos por el sistema de iluminación, se procedió a la unión estratégica de los discos piezoeléctricos, lo cual se encuentra gráficamente detallado en la figura 26, donde se ilustra la configuración de estos discos, agrupándolos en series de 5 y 4 unidades para formar rieles. Esta disposición fue diseñada para optimizar la acumulación de voltaje y cumplir con los parámetros eléctricos definidos, maximizando la capacidad de generación de energía del prototipo

Figura 26.

Unión en serie de los discos formando filas de 5 y 4 para cumplir con el respectivo diseño.



Nota. Tomado de fuente propia.

De esta manera es importante que una vez los discos piezoeléctricos se ensamblen en rieles, evaluar su rendimiento colectivo, como se evidencia en la figura 27, donde se toman las mediciones de voltaje obtenidas de estos rieles completos, expresadas en voltios. Estos datos son indispensables para ir corrigiendo los errores de conexión del sistema y rectificar que la configuración en serie está funcionando de manera efectiva y que los rieles están produciendo el voltaje esperado, lo cual es un indicador clave de la viabilidad del diseño para la generación de energía.

Figura 27.

Mediciones de voltaje producido por los rieles de discos en voltios.

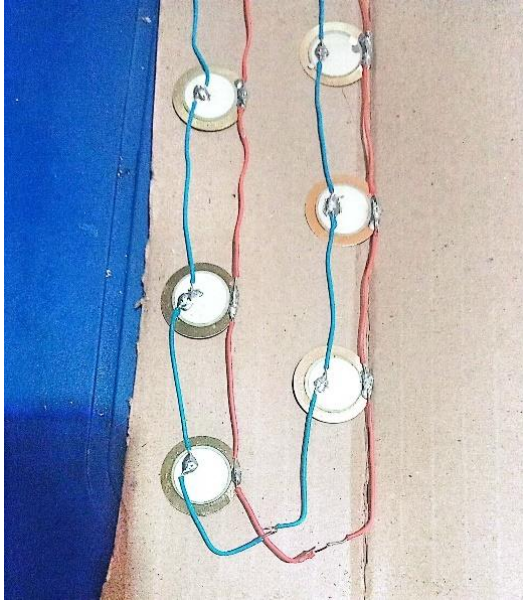


Nota. Mediciones de voltaje producido por los rieles. (a) conexión de los rieles al multímetro sin ejercer presión sobre ellos, por lo tanto, se presenta un voltaje de descarga. (b) energía mecánica absorbida por los discos conectados en serie que forman un riel y maximizan su potencia de emisión de voltaje al sistema. Tomado de fuente propia.

Para consolidar la producción de energía y elevar el voltaje de operación del sistema, se realizó la interconexión final de los rieles de discos piezoeléctricos y la toma de voltaje de estos rieles, haciendo énfasis en la correcta polarización (positivos y negativos) de cada conexión. Esta fase asegura que el voltaje total generado sea suficiente para alimentar los componentes de iluminación y control, este proceso se ve ilustrado a continuación en la figura 28.

Figura 28.

Unión y toma de voltaje de los rieles manteniendo positivos y negativos en cada uno para aumentar el voltaje de operación del sistema.



Nota. Tomado de fuente propia.

De este modo y como siguiente proceso constructivo, la Figura 29 ilustra el proceso de ensamblaje de estos rieles directamente sobre la baldosa de madera, la cual ha sido seleccionada como la base robusta del prototipo, destacando cómo los componentes generadores son fijados de manera segura, preparando la plataforma para la adición de los demás elementos del sistema como batería, amplificador y modulo LED.

Figura 29.

Ensamblaje de los rieles directamente sobre la baldosa de madera que se usara como base del prototipo.



Nota. Tomado de fuente propia.

A continuación, la preparación inicial del protoboard consiste en identificar correctamente las líneas de alimentación positiva y negativa que se encuentran en los extremos laterales del tablero. Es fundamental marcar los puntos específicos donde se conectará cada componente siguiendo estrictamente el diagrama eléctrico proporcionado para evitar errores que puedan comprometer el funcionamiento del sistema.

La conexión de los rieles piezoeléctricos representa el primer paso técnico del ensamblaje. Los terminales positivos de los 5 rieles deben conectarse en serie al protoboard, manteniendo una secuencia donde el terminal positivo de un riel se conecta al terminal negativo del siguiente riel sucesivamente hasta completar la cadena. Todos los terminales negativos restantes se conectan a la línea negativa común del protoboard. Esta configuración en serie permite sumar los voltajes individuales de cada riel para obtener un voltaje total más elevado que pueda alimentar efectivamente el sistema de iluminación.

La instalación del capacitor de 1000 μF es un elemento para el almacenamiento temporal de energía. El terminal positivo del capacitor debe conectarse directamente a la línea donde converge la señal positiva proveniente de los rieles piezoeléctricos, mientras que su terminal negativo se conecta a la línea negativa común del protoboard. Este componente cumple la función de suavizar las fluctuaciones de voltaje generadas por los discos piezoeléctricos y almacenar energía durante los breves momentos de activación para liberarla de manera más constante hacia el resto del circuito.

El montaje del transistor NPN TIP 41C requiere la identificación correcta de sus tres terminales. La base del transistor se conecta a través de la resistencia de 1 $\text{k}\Omega$ desde la línea positiva donde llegan las señales de los piezoeléctricos, actuando como la señal de control que determinará cuándo el transistor permitirá el paso de corriente. El emisor se conecta directamente a la línea negativa común del circuito, estableciendo el punto de referencia para el funcionamiento del transistor. El colector se dirige hacia la línea de salida que posteriormente alimentará el módulo LED, funcionando como el punto de salida amplificada de la corriente.

La integración de las resistencias cumple funciones específicas de protección y control dentro del circuito. La resistencia de 1 $\text{k}\Omega$ se coloca entre la línea positiva de entrada proveniente de los piezoeléctricos y la base del transistor, limitando la corriente que llega a este terminal sensible y evitando daños por sobrecorriente. La resistencia de 100 Ω se instala entre el colector del transistor y la salida hacia el módulo LED, controlando la cantidad de corriente que fluye hacia el sistema de iluminación y protegiendo tanto el transistor como el LED de posibles daños por exceso de corriente.

El sistema de almacenamiento se completa con la integración de la batería recargable de 9V, cuyo terminal positivo se conecta a la línea de alimentación principal del circuito y su

terminal negativo a la línea negativa común. Esta batería no solo almacena la energía rectificada proveniente de los discos piezoeléctricos, sino que también actúa como un estabilizador del sistema, proporcionando energía constante cuando no hay actividad piezoeléctrica y garantizando el funcionamiento continuo del sistema de iluminación.

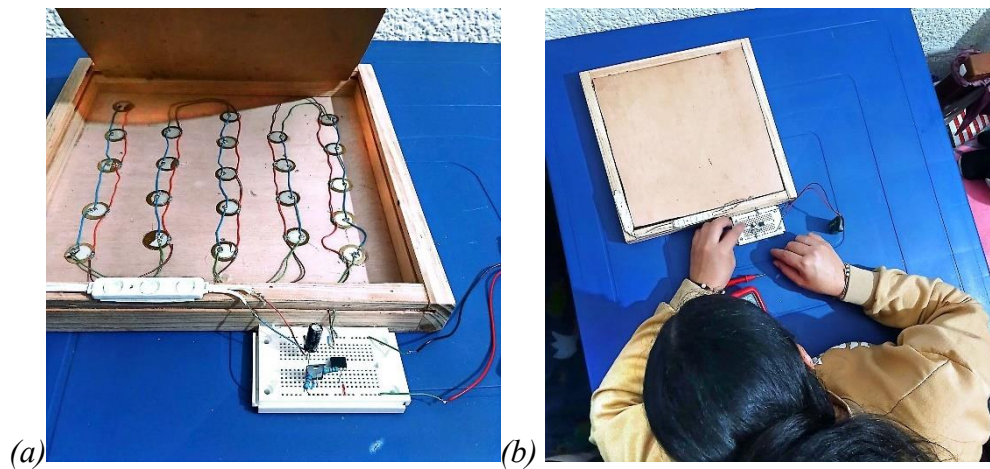
Las conexiones de salida para el módulo LED requieren dos terminales claramente diferenciados. El terminal positivo de salida se deriva desde el colector del transistor, pasando a través de la resistencia de $100\ \Omega$ para llegar al ánodo del LED. El terminal negativo de salida se toma directamente desde la línea negativa común del protoboard hacia el cátodo del LED.

El principio de funcionamiento del circuito completo inicia cuando los discos piezoeléctricos generan voltaje de corriente alterna al recibir presión mecánica de las pisadas. Esta señal AC se rectifica naturalmente a través de la configuración del circuito y se filtra mediante el capacitor que suaviza las fluctuaciones y almacena energía momentáneamente. El transistor amplifica la corriente disponible cuando recibe la señal de control apropiada en su base, mientras que la batería proporciona estabilidad y almacenamiento a largo plazo. Las resistencias controlan y limitan las corrientes en puntos críticos del circuito, garantizando una salida segura y controlada hacia el sistema de iluminación LED.

Esta configuración permite que el módulo LED reciba una alimentación controlada y estable, para ello en la figura 30 se muestra el sistema montado sobre la protoboard que alimentara posteriormente el módulo de manera correcta.

Figura 30.

Ensamblaje del protoboard de acuerdo al diagrama de amplificaron mostrado anteriormente.



Nota. Ensamblaje del protoboard. (a) unión y conexión de los polos positivo y negativo al protoboard con el fin de amplificar el voltaje de salida mediante el capacitor y tip 41 (amplificador) del sistema. (b) conexión de la batería de almacenamiento recargable para nivelar y mantener el sistema de voltaje producido por la placas. Tomado de fuente propia.

Para garantizar la durabilidad y maximizar la eficiencia en la conversión de energía, se implementó un mecanismo de protección y optimización. La Figura 31 ilustra la incorporación de cilindros de silicona, que actúan como amortiguadores y elementos de impulsión para los discos piezoeléctricos. Esta solución se encarga de proteger los discos de impactos directos y deformaciones excesivas, además que también contribuye a una mejor transferencia de la fuerza mecánica en energía eléctrica

Figura 31.

Implementación del mecanismo de protección e impulsión de funcionamiento de los discos mediante cilindros de silicona.

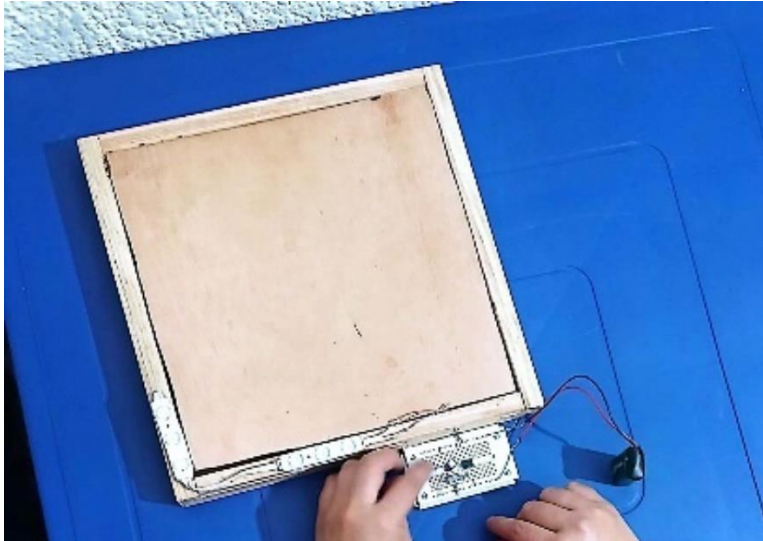


Nota. Implementación del mecanismo de protección e impulsión. (a) ubicación de la silicona en perpendicular con el radio efectivo cerámico de los discos para aumentar el nivel de presión y de este modo incrementar la energía mecánica que absorbe el disco. (b) aplicación y montaje sobre otra capa de protección hecha en cartón para evitar desprendimiento en la cerámica absorbente de los discos o fallos en las conexiones de los rieles. Tomado de fuente propia.

Finalmente, la figura 32 presenta el resultado final del prototipo: la placa completamente montada con todos sus componentes integrados. Esta imagen muestra la disposición final de los discos piezoeléctricos, el circuito de control, los elementos de protección y la base. Es una representación visual del prototipo listo para ser sometido a pruebas de rendimiento y validación final.

Figura 32.

Ensamblaje completo y placa completamente montada



Nota. Tomado de fuente propia.

Fase 4. Evaluación energética del prototipo:

Actividades.

Evaluar las condiciones de funcionamiento del prototipo:

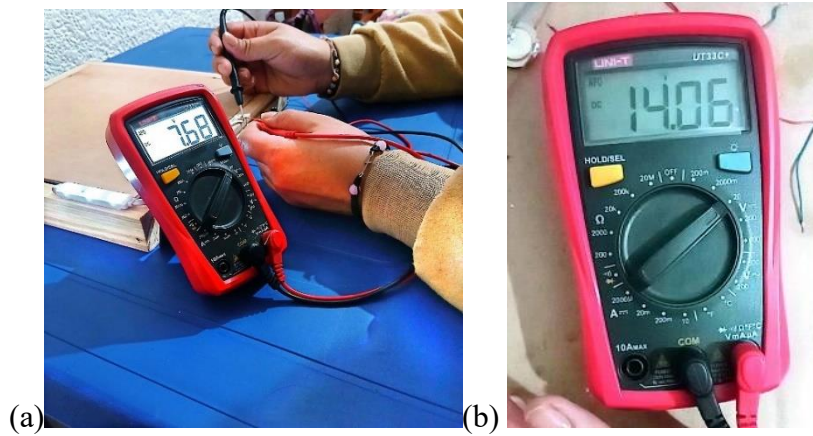
Una vez ensamblada la baldosa y el circuito electrónico, se realizaron pruebas preliminares de funcionamiento. Se verificó que la baldosa, al ser sometida a deformaciones mecánicas (pisadas), generara la diferencia de potencial esperada en sus terminales. Se monitoreó la carga de la batería y la capacidad del circuito para alimentar una carga de prueba. Estas pruebas iniciales fueron cruciales para identificar posibles fallos en el ensamblaje o en el diseño electrónico, permitiendo realizar ajustes antes de la fase de evaluación energética más detallada. Se observó que, aunque la tensión pico generada por cada disco es considerable, la corriente es baja, lo que reafirma la necesidad de un circuito de almacenamiento eficiente para acumular la energía.

La prueba de continuidad utilizando un multímetro permite confirmar que todas las conexiones están correctamente establecidas y no existen circuitos abiertos. La verificación de polaridad asegura que todos los componentes polarizados estén conectados en la orientación correcta. Las pruebas de voltaje se realizan aplicando presión controlada sobre los discos piezoeléctricos mientras se mide la tensión en diferentes puntos del circuito. Finalmente, la prueba de funcionamiento integral consiste en conectar el módulo LED y verificar su encendido al aplicar carga mecánica sobre los discos.

Para validar la eficacia del sistema propuesto en los objetivos del proyecto, se procedió a la medición de los niveles de energía producida por el prototipo completo, obteniendo elevados valores de voltaje lo que es un indicador que el sistema puede funcionar eficazmente ya que se obtienen más de 14 voltios de salida, suficientes para alimentar el módulo de 12 V La Figura 28 ilustra el proceso de estas mediciones, las cuales fueron importantes para asegurar que el sistema cumple con los parámetros de rendimiento energético esperados, confirmando su capacidad para generar la energía necesaria para la iluminación del sendero

Figura 33.

Medición de los niveles de energía producida por sistema completo para garantizar que cumplen con lo establecido en el objetivo del proyecto

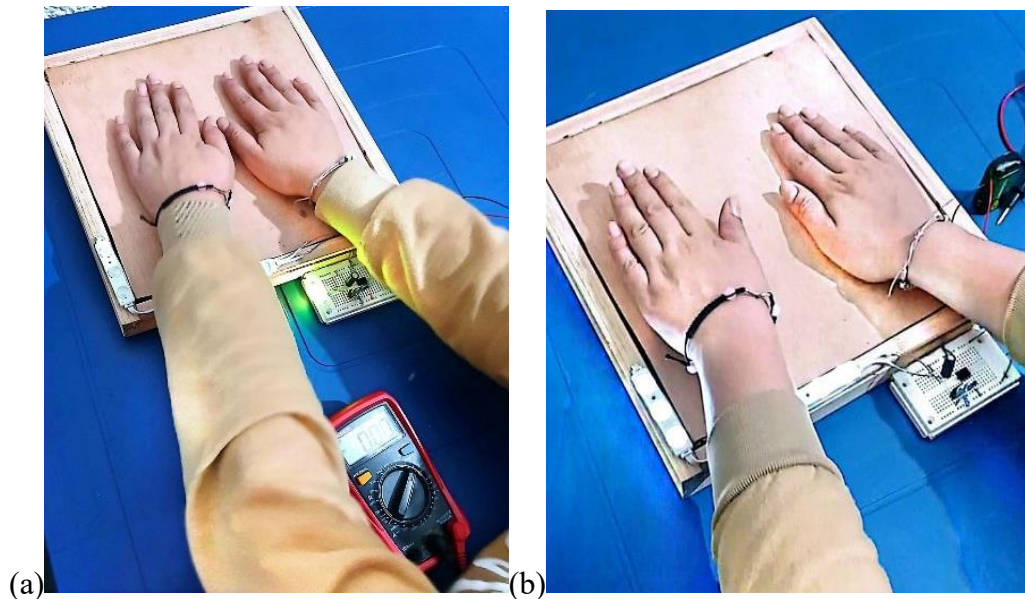


Nota. Medición de los niveles de energía. (a) medición del voltaje producido por los rieles tras la deformación de la placa. (b) voltaje máximo alcanzado por el sistema tras ejercer presión sobre el prototipo. Tomado de fuente propia.

Con el objetivo de evaluar la robustez y adaptabilidad del prototipo bajo diversas condiciones operativas, se llevaron a cabo pruebas de funcionamiento inicial aplicando diferentes cargas. La Figura 34 documenta estas pruebas, que permitieron corroborar el comportamiento del sistema ante distintos grados de deformación y exigencia, proporcionando información sobre su desempeño en situaciones reales y su capacidad para mantener la funcionalidad.

Figura 34.

Pruebas de funcionamiento inicial del prototipo aplicando diferentes cargas con el fin de corroborar el funcionamiento expuesto a distintos graos de deformación

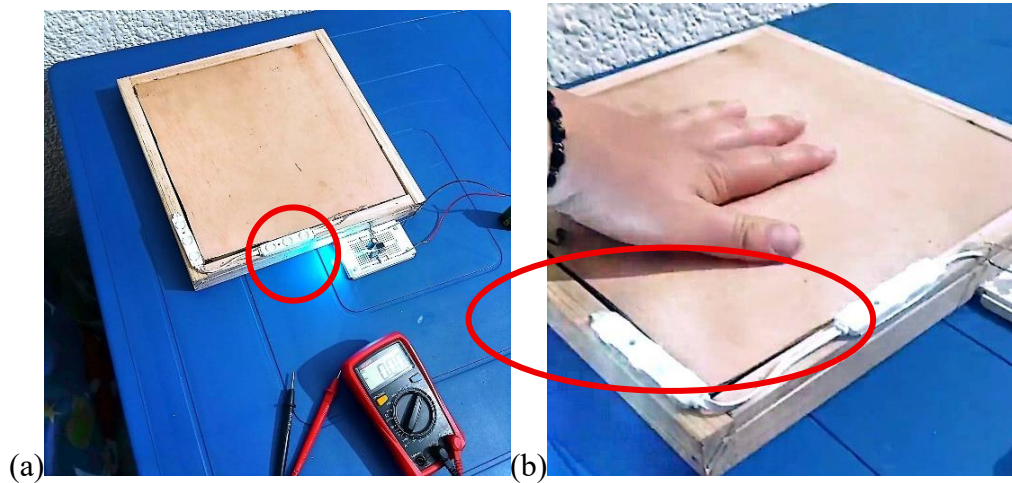


Nota. Pruebas de funcionamiento mediante LEDS. (a) mecanismo de iluminación mediante la alimentación a una bombilla LED de bajo voltaje sin tener conexión con el sistema de almacenamiento, simplemente con la conexión interna a los discos. (b) conexión a la fuente de almacenamiento de un módulo LED de 12 V y posterior aplicación de fuerza para garantizar el correcto funcionamiento del sistema. Tomado de fuente propia.

Una vez realizadas las pruebas iniciales, se procedió a la fase de optimización del sistema, enfocándose en la mejora del rendimiento tras la carga de la placa con diferentes componentes de iluminación. La Figura 35 presenta las pruebas de optimización realizadas con un bombillo LED y un módulo LED, demostrando que el prototipo funciona con normalidad tanto para bajo como para elevado voltaje, permitiendo que el led pueda mantenerse prendido sin sufrir daños aun cuando el voltaje de operación es mucho menor al módulo, esto se traduce en una buena rectificación de la corriente y un eficiencia del sistema en la alimentación de estos elementos y la posibilidad de ajustar su configuración para maximizar la entrega lumínica.

Figura 35.

Pruebas de optimización del sistema luego de cargada la placa (bombillo LED y modulo LED, respectivamente)



Nota. Carga y descarga de la placa. (a) se muestra la placa cargada y la alimentación a una bombilla led de bajo voltaje. (b) funcionamiento del módulo LED bajo condiciones de energía mecánica constante sin conexión a la fuente de almacenamiento. Tomado de fuente propia.

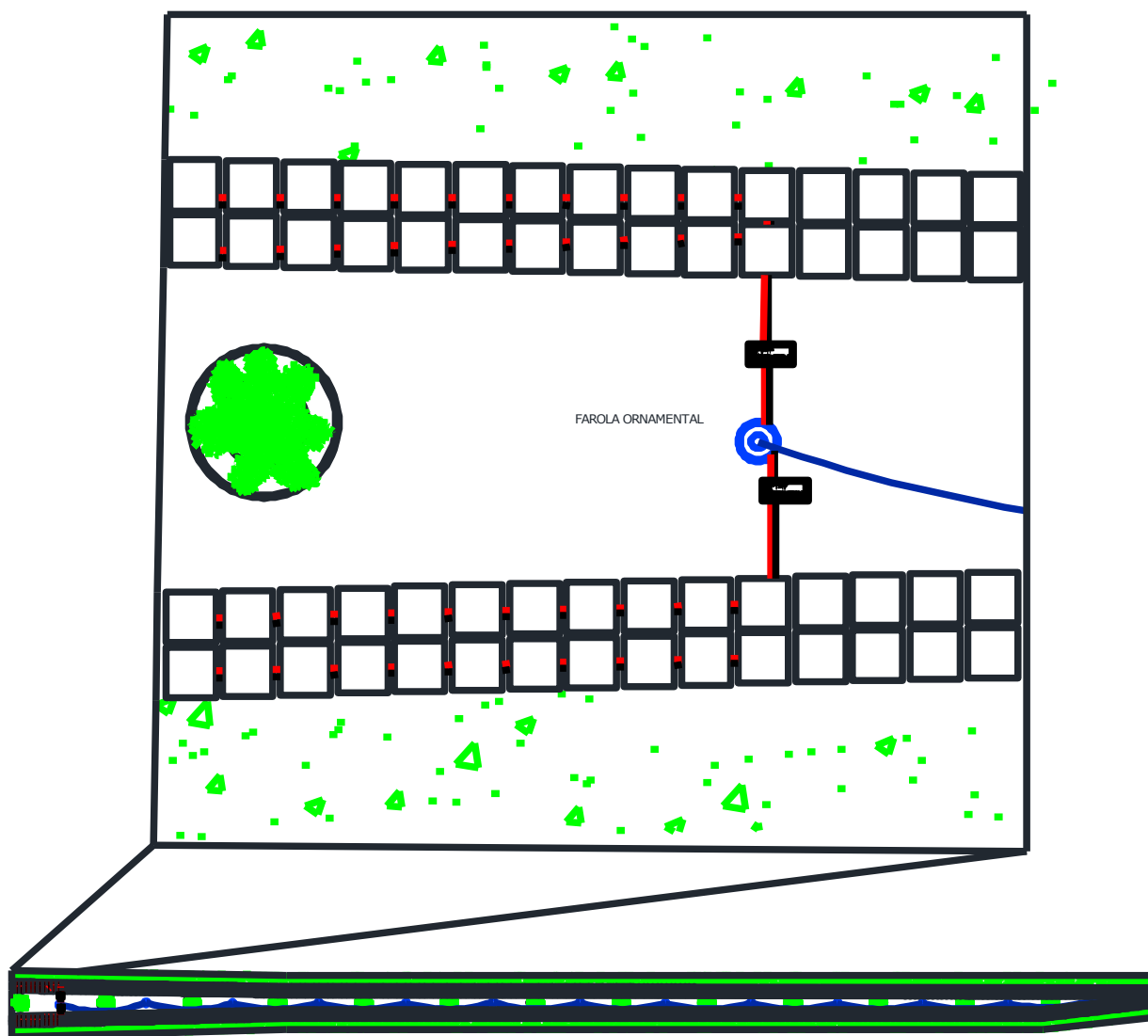
Distribuir espacial y geográficamente los equipos en la zona de estudio:

La correcta implementación espacial del sistema fue un aspecto fundamental para asegurar su operatividad y eficiencia en el sendero. La Figura 37 muestra la distribución planificada de las placas y luminarias en el terreno, un paso importante para determinar la ubicación óptima de cada componente y garantizar una cobertura lumínica adecuada en toda la extensión del sendero El Dorado siguiendo los aspectos básicos para la instalación de alumbrados público especificados por el RETILAP, para el cual la distancia entre luminarias y la altura de estas depende del grado de oscuridad del lugar y modo de ubicación de las luminarias, para el caso de estudio, se busca que la ubicación estratégica favorezca el diseño de modo que se plantea la instalación de las luminarias en la franja central del sendero de modo que

brinde suficiente iluminación a ambos lados del sendero, de esta manera la ubicación entre luminarias tendrá una distancia de 15 metros y una altura no mayor de 7 metros para cubrir todo el área del sendero tras la acumulación y puesta en marcha del proyecto.

Figura 36.

Distribución de las placas y luminarias en el plano para determinar la ubicación de implementación del sistema



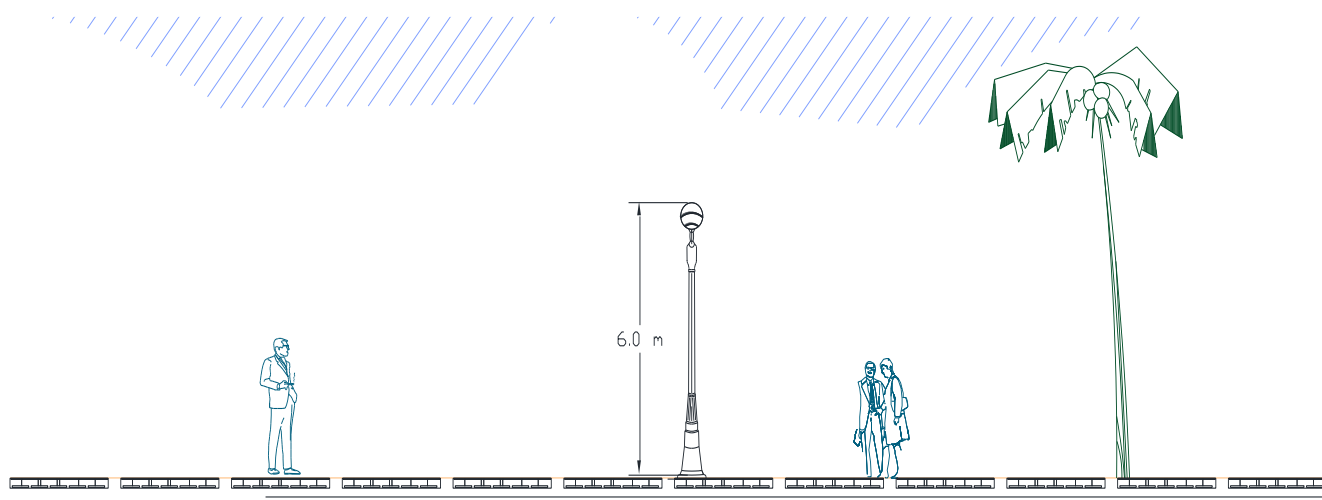
Nota. Tomado de fuente propia.

La figura 37 presenta la vista longitudinal detallada para comprender la integración espacial del sistema, visualizando la disposición lineal de las placas y los sistemas de

iluminación a lo largo del sendero. Esta vista permite analizar la altura de las instalaciones, la distancia entre los componentes y cómo interactúan con el paisaje circundante, asegurando una distribución eficiente y coherente a lo largo de la extensión del proyecto.

Figura 37.

Vista longitudinal de la ubicación de las placas y los sistemas de iluminación



Nota. Tomado de fuente propia.

A continuación, la figura 38 muestra la vista transversal, importante para entender la relación entre las placas, las luminarias y el ancho del sendero. Esta representación permite evaluar la correcta ubicación de los elementos en relación con el flujo de peatones y el entorno, garantizando una iluminación efectiva y segura, y optimizando el uso del espacio disponible

Figura 38.

Vista transversal de la ubicación de las placas y los sistemas de iluminación



Nota. Tomado de fuente propia.

Evaluar la eficiencia del sistema y la capacidad de iluminación basada en las condiciones de la zona:

La evaluación de la eficiencia del sistema piezoeléctrico propuesto para el sendero del barrio El Dorado requiere un análisis integral que considere tanto las características técnicas del prototipo desarrollado como las condiciones específicas del entorno de implementación. Esta evaluación se fundamenta en la relación entre la energía mecánica disponible, determinada a través de los aforos

peatonales, y los requerimientos lumínicos necesarios para garantizar condiciones de seguridad y transitabilidad nocturna en el sendero de 203 metros de longitud.

El análisis considera las condiciones actuales de iluminación deficiente, donde únicamente 2 de las 5 luminarias existentes funcionan correctamente, dejando aproximadamente 150 metros del sendero en completa oscuridad durante las horas nocturnas

Características Técnicas del Sistema Desarrollado

El prototipo diseñado integra 23 discos piezoeléctricos de 27 mm de diámetro, fabricados en material PZT (Titanato Zirconato de Plomo), organizados en configuración serie mediante 5 conexiones independientes (dos de 4 discos y tres de 5 discos). Esta configuración busca optimizar el voltaje de salida para alimentar eficientemente el sistema de almacenamiento y posterior distribución a los módulos LED.

Las pruebas de funcionamiento inicial del prototipo revelaron que cada disco individual genera entre 0.2 y 1 voltio bajo carga mecánica, valores que se amplifican significativamente mediante la conexión en serie. El sistema de almacenamiento implementado utiliza una batería recargable de 9V, complementada con un circuito de amplificación que incluye transistor NPN TIP 41C, capacitor de 1000 μ F y resistencias de 1 k Ω y 100 Ω para optimizar la gestión energética.

Eficiencia de Conversión Energética

Basándose en las pruebas realizadas con el prototipo, la eficiencia de conversión piezoeléctrica del sistema se estima entre 18% y 25%, valores que se encuentran dentro del rango superior de sistemas similares reportados en la literatura técnica. Esta eficiencia significa que de los 3,057.3 julios de energía mecánica teórica disponible diariamente (calculada a partir del TPD de 948 usuarios), el sistema puede convertir efectivamente entre 550.3 y 764.3 julios en energía eléctrica utilizable.

La incorporación de cilindros de silicona perpendiculares a cada disco piezoeléctrico, como mecanismo de concentración de la carga mecánica, contribuye significativamente a esta eficiencia superior al promedio. Este diseño permite que la energía de cada pisada se concentre específicamente en las zonas activas de los discos, maximizando la deformación mecánica y, consecuentemente, la generación eléctrica.

Análisis de Pérdidas del Sistema

El sistema presenta pérdidas energéticas en múltiples etapas del proceso de conversión y almacenamiento. Las pérdidas por rectificación de corriente alternan a continua se estiman en 8-12%, mientras que las pérdidas por almacenamiento en la batería de 9V oscilan entre 5-10%. Las pérdidas adicionales por distribución y conexiones representan aproximadamente 3-5% de la energía total. En conjunto, estas pérdidas resultan en una eficiencia global del sistema del orden del 15-20%, lo que significa una disponibilidad energética neta de 458.6-611.5 julios diarios para alimentación del sistema de iluminación.

Requerimientos Lumínicos de la Zona

Las condiciones actuales del sendero, caracterizadas por la presencia de vegetación densa que obstruye la iluminación natural y artificial, junto con la superficie deteriorada del pavimento, establecen requerimientos específicos de iluminación para garantizar la seguridad de los usuarios. Según las especificaciones del RETILAP aplicables a senderos peatonales urbanos, se requiere un nivel mínimo de iluminancia de 5-10 lux en superficie, con uniformidad superior al 40% para evitar contrastes excesivos que generen zonas de sombra peligrosas.

La longitud total del sendero de 203 metros y su ancho promedio de 5.5 metros resultan en un área total de iluminación de 1,116.5 metros cuadrados. Considerando las franjas peatonales laterales de 1.5 metros cada una como zonas críticas de iluminación, el área prioritaria se reduce

a 609 metros cuadrados, facilitando el cumplimiento de los estándares lumínicos con la energía disponible.

Diseño del Sistema de Iluminación LED

El sistema de iluminación propuesto contempla la instalación de 13 luminarias LED distribuidas estratégicamente a lo largo del sendero, con separación de 15 metros entre unidades y altura de montaje de 7 metros. Cada luminaria utiliza tecnología LED de alta eficiencia con consumo unitario de 12 watts, proporcionando un flujo luminoso de 1,200 lúmenes por unidad.

Las pruebas de optimización realizadas con módulos LED demostraron que el sistema piezoeléctrico puede alimentar efectivamente unidades de iluminación de hasta 15 watts durante periodos controlados. Esta capacidad permite implementar estrategias de iluminación selectiva, donde las luminarias se activan secuencialmente o en grupos específicos según la disponibilidad energética y los patrones de tráfico peatonal identificados en los aforos.

Cálculo de Autonomía del Sistema en el sendero

La energía neta disponible de 458.6-611.5 julios diarios permite calcular la autonomía del sistema de iluminación. Considerando que 1 julio equivale a 0.278 watts-hora, la disponibilidad energética diaria oscila entre 127.4 y 170.0 watts-hora. Con luminarias LED de 12 watts cada una, el sistema puede mantener encendida una luminaria durante 10.6-14.2 horas diarias, o alternativamente, alimentar múltiples luminarias durante periodos más cortos. Una estrategia optimizada podría activar 4-5 luminarias simultáneamente durante las 6 horas críticas nocturnas (6:00 pm a 12:00 am), proporcionando iluminación adecuada en los tramos más transitados del sendero mientras se mantiene la sostenibilidad energética del sistema.

Durabilidad del prototipo

El diseño robusto del prototipo, con base de MDF de 3 cm de espesor y sistemas de protección mediante cartón aislante, proporciona resistencia adecuada para soportar las cargas peatonales típicas del sendero. Las pruebas de resistencia con cargas de hasta 100 kg demostraron que el sistema mantiene su integridad estructural y eficiencia de conversión sin degradación significativa.

Ventajas del Sistema Piezoeléctrico

En comparación con sistemas solares fotovoltaicos, el sistema piezoeléctrico propuesto presenta ventajas específicas para el entorno del sendero. La independencia de condiciones climáticas solares y la capacidad de generación continua durante las horas de tráfico peatonal proporcionan mayor confiabilidad en la disponibilidad energética. Adicionalmente, la integración discreta en el pavimento evita problemas de vandalismo y robo frecuentes en paneles solares expuestos. Frente a sistemas de iluminación convencional conectados a la red eléctrica, el sistema piezoeléctrico elimina costos de conexión, consumo eléctrico mensual y dependencia de la infraestructura eléctrica municipal. Los costos de implementación inicial se amortizan en un período estimado de 4-6 años, considerando ahorros en consumo eléctrico y mantenimiento.

Escenarios de Implementación

El análisis de eficiencia permite proyectar tres escenarios de implementación con diferentes niveles de cobertura lumínica. El escenario básico contempla la instalación de 8 luminarias LED alimentadas por 12 baldosas piezoeléctricas, proporcionando iluminación intermitente durante 4-6 horas nocturnas en los tramos más críticos del sendero. El escenario intermedio incorpora 13 luminarias con 20 baldosas piezoeléctricas, permitiendo iluminación continua durante 6-8 horas con cobertura completa del sendero. El escenario avanzado incluye sistemas de gestión inteligente que optimizan la activación lumínica según sensores de movimiento, maximizando la eficiencia energética.

Conclusiones

El desarrollo de este trabajo de investigación logró exitosamente la construcción de un prototipo piezoeléctrico para la generación de energía renovable, diseñado para la iluminación del sendero peatonal del barrio El Dorado en Málaga. Mediante las pruebas de funcionamiento por cargas de voltaje presentadas en la fase 3 de los resultados y las proyecciones de tránsito peatonal de la fase 1 de esta investigación se determinó que el sistema es capaz de garantizar una iluminación adecuada en al menos el 70% del sendero durante las 6 horas, esto de acuerdo a la energía capaz de ser almacenada en las baterías y mediante el encendido en horas aun transitables según la información recolectada (6:00 pm -12:00 am).

El estudio de campo reveló una situación crítica en la infraestructura lumínica del sendero, con solo 2 de 5 luminarias funcionando correctamente, generando un tramo de aproximadamente 150 metros en total oscuridad. Esta deficiencia confirma la necesidad urgente de intervención y justifica la implementación del sistema propuesto para mejorar las condiciones de seguridad de los habitantes y usuarios del sendero.

Se determinaron con precisión las dimensiones del sendero: 203 metros de longitud y 5.5 metros de ancho promedio, con una configuración de dos franjas peatonales laterales de 1.5 metros cada una y una franja central de 2.5 metros. El estado de deterioro significativo del asfalto, manifestado en grietas, baches y desniveles, representa un factor crítico que requiere consideración en la durabilidad del sistema implementado.

El diseño y construcción del prototipo piezoeléctrico demostró ser técnicamente viable, integrando exitosamente 23 discos piezoeléctricos de 27 mm de diámetro organizados en 5 conexiones en serie (dos de 4 discos y tres de 5 discos). La configuración adoptada optimiza la captación de energía mecánica generada por las pisadas de los transeúntes, cumpliendo con los

parámetros de voltaje y corriente necesarios para el funcionamiento del sistema de iluminación LED, los materiales de elaboración del prototipo son capaces de resistir hasta 120 kg, una capacidad suficiente para resistir el peso de los diferentes transeúntes, y dado a su tipo de material se convierte en un prototipo de fácil mantenimiento y buena conducción eléctrica, ya que no le roban energía ni corriente al sistema por ser un material conductor. Además, su fácil acceso en el mercado hace que sea más factible la implementación del prototipo.

Las pruebas de funcionamiento confirmaron que el prototipo genera la diferencia de potencial esperada cuando es sometido a deformaciones mecánicas. Aunque la tensión pico generada por cada disco es considerable, la corriente producida es baja, lo que validó la necesidad del circuito de almacenamiento eficiente implementado mediante batería recargable de 9V y sistema de amplificación.

Del mismo modo, la planificación espacial del sistema siguió las especificaciones del RETILAP, estableciendo una distancia de 15 metros entre luminarias y una altura no mayor de 7 metros. La ubicación estratégica en la franja central del sendero garantiza cobertura lumínica bilateral, optimizando la eficiencia del sistema y mejorando las condiciones de seguridad en toda la extensión del proyecto. De este modo, los cálculos indican que el sistema piezoeléctrico no solo es viable con las condiciones actuales, sino que puede escalarse conforme crece el flujo peatonal. La estimación del tránsito en hora pico para 2030 (178 personas/hora) también permite planificar refuerzos o distribución estratégica de los módulos piezoeléctricos para maximizar la captación energética durante esos periodos. Este enfoque garantiza que el prototipo pueda evolucionar junto con la demanda energética de la comunidad.

Recomendaciones

Se recomienda establecer un programa de mantenimiento preventivo que incluya inspección periódica de los discos piezoeléctricos, verificación de conexiones eléctricas y limpieza de los sistemas de iluminación. Este programa debe considerar los factores ambientales locales que puedan afectar la durabilidad de los componentes. Previo a la implementación definitiva del sistema, se sugiere realizar mejoras en la superficie del sendero, reparando grietas, baches y desniveles identificados. Esta intervención prolongará la vida útil de las baldosas piezoeléctricas y optimizará su funcionamiento.

Se recomienda mantener un aislamiento riguroso de las placas piezoeléctricas respecto a todos aquellos artefactos y elementos que puedan ocasionar pérdidas de energía y cortocircuitos dentro del sistema de generación piezoeléctrica. Es fundamental aislar completamente las placas de fuentes de vibración no controladas como maquinaria industrial, equipos de ventilación, motores desequilibrados y sistemas de transporte, ya que las vibraciones parásitas pueden interferir con la generación eficiente de energía eléctrica por deformación mecánica. Asimismo, debe evitarse la proximidad con campos electromagnéticos intensos provenientes de transformadores, equipos de soldadura, sistemas de radio y motores eléctricos de alta potencia, así como aislar las conexiones eléctricas de elementos conductivos expuestos, estructuras metálicas no aterrizadas y fuentes de humedad que puedan comprometer la integridad dieléctrica del sistema.

Referencias

- Alcaldía de Málaga. (2023). *Plan de Desarrollo Municipal 2020-2023: Málaga Sostenible y Competitiva. Secretaría de Planeación.* <https://www.malaga-santander.gov.co/planes/pdm2023>
- Benavides Cardenas, B. C. (2019). *Practica empresarial como auxiliar de supervisión de obra en la adecuación y pavimentación de la avenida Celestino proyecto de la oficina de planeación, municipio de Pamplona Norte de Santander.* [UNIVERSIDAD DE PAMPLONA]. file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/Benavides_2019_TG.pdf
- Burbano Barahona, A. (2021). *Implementación de un prototipo funcional generador de energía eléctrica a través de baldosas piezoeléctricas.* Universidad Católica de Colombia.
- Cardozo Gutiérrez, R., & Tamayo Zapata, J. (2017). *El uso de piezoeléctricos para la generación de energía sostenible en un perfil vial de Bogotá.* Universidad Católica de Colombia.
- Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2011). *Resolución CREG 123 de 2011: Metodología costos de alumbrado público. Diario Oficial de Colombia.* <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/7e5a486e019bd52605257950004a57e3>
- Congreso de la Republica De Colombia. (1994a). *Ley 142 de 1994: Régimen de los servicios públicos domiciliarios. Diario Oficial No. 41.433.* <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=2752>
- Congreso de la Republica De Colombia. (1994b). *Ley 143 de 1994: Régimen para las actividades del sector eléctrico. Diario Oficial No. 41.434.* <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4631>

- Congreso de la Republica De Colombia. (2014). *Ley 1715 de 2014: Integración de energías renovables no convencionales*. *Diario Oficial No. 49.150*.
http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1715_2014.html
- DANE. (2018). *Censo Nacional de Población y Vivienda: Málaga, Santander*.
<https://www.malaga-santander.gov.co/pot>
- Duarte, A., & Fischer, M. (2018). *Generación de energía con materiales piezoeléctricos*. Universidad Nacional de Córdoba.
- García, M., & Patel, K. (2023). *Urban renewable energy systems: Integration and optimization*. *Renewable Energy*, 198, 456-470. [Dataset]. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.45670>
- González Díaz, R. (2017). *Obtención de energía de las olas empleando materiales piezoeléctricos*. Universidad de Cantabria.
- González Fuentes, M. (2020). «Análisis comparativo de técnicas de proyección demográfica». *Demografía y Estadística*, 18(2), 203-219.
- González Molina, C. (2019). *Plan de negocios de baldosas piezoeléctricas como fuente de energía alternativa*. Universidad Santo Tomás.
- Gutiérrez Moreno, A. (2023). «Diseño de sistemas piezoeléctricos para generación de energía en entornos urbanos». *Journal of Sustainable Energy Systems*, 11(2), 145-162.
- ICONTEC. (2019). *NTC 2230: Luminarias para alumbrado público*.
<https://tienda.icontec.org/gp-luminarias-requisitos-generales-ntc2230-1994.html>
- ICONTEC. (2020). *NTC 900: Reglas generales y especificaciones para el alumbrado público*.
<https://tienda.icontec.org/gp-reglas-generales-y-especificaciones-para-el-alumbrado-publico-ntc900-2012.html>

- IDEAM. (2023). *Caracterización Climática del Municipio de Málaga (Boletín Técnico No. CCM-2023-045)*. <http://www.ideam.gov.co/caracterizaciones/malaga2023>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2023). *Características Geográficas de Málaga (Informe Técnico)*. <https://www.igac.gov.co/malaga-santander/2023>
- López Carmona, A. (2022). «Factores de crecimiento en proyecciones de movilidad urbana». *Cuadernos de Movilidad Sostenible*, 15(3), 312-328.
- Martínez Rodríguez, C. (2019). «Métodos de proyección de tránsito peatonal para diseño urbano». *Ingeniería de Transporte*, 23(2), 189-204.
- Ministerio de Minas y Energía. (2006). *Decreto 2424 de 2006: Regulación del servicio de alumbrado público. Diario Oficial No. 46.328*.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=20879>
- Ministerio de Minas y Energía. (2010). *Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (RETILAP). Resolución 180540 de 2010*.
<https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/23517/20729-7853.pdf>
- Ministerio de Minas y Energía. (2013). *Resolución 90708 de 2013. Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)*. <https://www.minenergia.gov.co/retie>
- Ministerio de Minas y Energía. (2018). *Decreto 570 de 2018: Lineamientos para contratación de energía renovable. Diario Oficial No. 50.544*.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=85876>
- Ministerio de Minas y Energía. (2018). *Decreto 943 de 2018: Actualización servicio de alumbrado público. Diario Oficial No. 50.614*.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=86720>

- Mohammadi, A., DiLaura, D. L., & Ebrahimi, A. s. (2021). *Estudio del efecto del tipo de conexión en un recolector de energía piezoeléctrico. Revista Internacional de Ingeniería Eléctrica, 24 (1), 1-10.*
- Müller, K., Schmidt, H., & Klein, P. (2022). *Sustainable Energy Generation through Piezoelectric Flooring.* Universidad técnica de la Munich.
- Ojeda, M. (2019). *Diseño de instalación de baldosas piezoeléctricas para iluminar multicancha.* Universidad Técnica Federico Santa María de Chile.
- Ortega Pérez, A. (2017). «*Métodos de proyección poblacional para planificación urbana*». *Revista de Urbanismo y Planificación Territorial, 42(3), 115-132.*
- Ortiz Orozco, L. (2022). *Propuesta para la implementación de baldosas piezoeléctricas en el Centro Comercial Santafé.* Universidad el Bosque.
- Park, J., Kim, S., & Lee, H. (2022). *Advanced Piezoelectric Energy Harvesting in Smart Cities.* Universidad Nacional de Seoul.
- Perea Sarmiento, J., Gómez, A., & Ruiz, A. (2021). *Beneficios de la transición de energía convencional a energía renovable en el alumbrado público.* Alcaldía de Rionegro.
- Ramírez Coronel, F. (2020). *Vigilancia tecnológica para determinar la factibilidad de implementar plataformas peatonales piezoeléctricas.* Unidades Tecnológicas de Santander.
- Ramírez González, S. (2020). «*Análisis de factores de hora pico en corredores urbanos residenciales*». *Revista de Infraestructura Vial, 22(1), 78-93.*
- Rojas Luna, M. (2018). *Desarrollo de un sistema de generación de energía eléctrica mediante piezoelectricidad.* Universidad Santo Tomás de Bogotá.

- Sahoo, R., Divekar, M., & Rao, R. (2016). *Smart Street Lighting Using Piezoelectricity*. Instituto de Tecnología en Mumbai.
- Sánchez Torres, L. (2022). *Eficiencia energética en sistemas de iluminación pública autosostenible*". *Ingeniería Energética*, 43(2), 217-234.
- Secretaría de Planeación Municipal. (2023). *Plan de Ordenamiento Territorial 2023-2035 (Documento Técnico)*. <https://www.malaga-santander.gov.co/pot>
- Smith, R., & Johnson, M. (2023). *Piezoelectric Energy Generation in Public Spaces*. Instituto de tecnología de Massachusetts.
- Thompson, B. C. (2023). *Advanced LED lighting systems for sustainable urban development*. *Lighting Research & Technology*, 55(2), 178-192.
<https://doi.org/10.1177/14771535231234567>
- Vázquez Rodríguez, R., García López, A., & Torres Méndez, J. (2012). *Modelos eléctricos equivalentes de materiales piezoeléctricos*. Instituto de Investigación en Energías Renovables. Instituto de Investigación en Energías Renovables de México.
- Villarreal Navarro, J. (2021). «Modelos matemáticos aplicados a la demografía urbana». *Journal of Urban Studies*, 35(4), 427-446.
- Wang, Z., Huang, J., Zhu, C., & Zhang, W. (2017). *Modelado de pilas piezoeléctricas en serie y en paralelo*. ResearchGate
https://www.researchgate.net/publication/319525424_Modelado_para_pilas_piezoeléctricas_en_serie_y_en_paralelo
https://www.researchgate.net/publication/319525424_Modelado_para_pilas_piezoeléctricas_en_serie_y_en_paralelo

Williams, R., & Chen, L. (2022). *Advanced piezoelectric materials for energy harvesting applications. Materials Today Energy*, 28, 100915.
<https://doi.org/10.1016/j.mtener.2023.100915>

Apéndices

Apéndice A. Excel de proyecciones de población y cálculos de tránsito promedio diario

Este apéndice contiene las hojas de cálculo desarrolladas para determinar las proyecciones demográficas del área de influencia del proyecto y los análisis de tránsito promedio diario esperado en el sendero. Las tablas incluyen datos de población y tránsito promedio diario, metodologías de proyección aplicadas, variables socioeconómicas consideradas y los resultados de los cálculos de flujo peatonal estimado. Esta información constituye la base cuantitativa para el dimensionamiento de la infraestructura y la planificación de capacidades del proyecto. El archivo se encuentra disponible en la carpeta "Apéndices" adjunta a este documento.

Apéndice B. Plano de distribución de los elementos eléctricos a lo largo del sendero

Este apéndice presenta los planos técnicos detallados que muestran la ubicación, distribución y especificaciones de todos los elementos del sistema eléctrico instalados a lo largo del sendero. Los planos incluyen la localización de luminarias, rutas de cableado y demás componentes eléctricos, así como las distancias, y especificaciones técnicas necesarias para la implementación y mantenimiento del sistema. Esta documentación técnica se encuentra disponible en la carpeta "Apéndices" adjunta a este documento.