



RY-Ciclovía: Ciclovía generadora de energía eléctrica por medio de energía cinética

Presentado por:

Daniel Felipe Reyes Carrascal

William Felipe García Paramo

Proyecto de Grado

Facultad de Ingeniería

Universidad EAN

2025

1. Resumen

Este estudio presenta el diseño y planteamiento de un modelo de ciclovía aplicable en la ciudad de Bogotá, capaz de generar energía eléctrica. Este proyecto se plantea en base al desarrollo actual de la ciudad entorno a los métodos de transporte, mejorando vías para transporte público y vehículos particulares, así como el desarrollo de las próximas líneas de metro, con esto en cuenta la idea es abarcar la comunidad de ciclistas y proponer no solo mejores vías que ayuden a la conciencia ciudadana, sino que a su vez sea capaz de ser autosustentable con el propósito de mantener la integridad de los ciclistas y respetar su integridad. El objetivo es plantear vías de paso para ciclistas que con el contacto sobre las placas reciban energía cinética que sustente: energía para luces en los carriles, señales de tránsito y semáforos para los ciclistas, de manera que sea sostenible y no consuma energía externa de la ciudad.

2. Introducción

La movilidad urbana en Bogotá ha estado marcada por una fuerte dependencia del transporte público masivo, como el sistema Transmilenio y a su vez la extensión del SITP, una parte de la población ha optado por el uso de la bicicleta como una alternativa sostenible y económica. En los últimos años, la ciudad ha experimentado cambios significativos en su infraestructura de transporte, entre los que destacan el aumento en las tarifas de los pasajes, que se ha reflejado aún más en los últimos años, la apertura de nuevas rutas de transporte público y la construcción de la primera línea del metro, que aun sigue en desarrollo, proyecto que representa un avance en materia de movilidad metropolitana. No obstante, en contraste con estos desarrollos, la infraestructura destinada a los ciclistas presenta limitaciones en términos de cobertura, seguridad y confort.

El sistema de ciclovías en Bogotá, considerado uno de los más extensos en América Latina con más de 630 kilómetros habilitados (Instituto de Desarrollo urbano [IDU], 2023), aún enfrenta problemas asociados a la desconexión entre tramos, la inseguridad vial y la deficiente iluminación nocturna. Estas deficiencias han llevado a que muchos ciclistas opten por transitar en vías convencionales, lo que no solo aumenta el riesgo de accidentalidad, sino que también genera tensiones en la convivencia con los conductores de vehículos motorizados.

A esta situación se suma el incumplimiento frecuente de la normativa vigente por parte de algunos ciclistas. El Código Nacional de Tránsito Terrestre (Ley 769 de 2002) establece, en su artículo 95, que “cuando circulen en horas nocturnas, deben llevar dispositivos en la parte delantera que proyecten luz blanca y en la parte trasera que reflecte luz roja” (Congreso de la República, 2002, art. 95). De igual manera, la Resolución 160 de 2017 del Ministerio de Transporte reglamenta el uso obligatorio del casco en determinadas condiciones, tales como en menores de edad y en eventos deportivos (Ministerio de Transporte, 2017, art.18). El bajo nivel de cumplimiento de estas disposiciones incrementa los riesgos, especialmente en condiciones de baja visibilidad.

En el ámbito internacional, existen modelos de referencia que evidencian cómo la inversión en infraestructura ciclista puede mejorar sustancialmente la seguridad y comodidad de los usuarios. Holanda, reconocida como uno de los países con mayor cultura ciclista, cuenta con calles especialmente dedicadas a la movilidad en bicicleta, rutas interconectadas, semáforos específicos y pavimento diferenciado para aumentar la visibilidad. En contraste, Bogotá aún presenta limitaciones en estos aspectos. Tal como señalan Chamorro Ramírez y Rodríguez Lozano (2015):

“El modelo de ciclorutas en Holanda es ‘un modelo digno de seguir pues hay calles específicamente dedicadas a la movilización de bicicletas’. Así mismo, critica que en Bogotá hace mucha falta cultura ciudadana en favor del peatón y del ciclista [...] Bogotá necesita la inversión de mejores ciclorutas interconectadas [...] incluso con la implementación de semáforos para bicicletas tal como el modelo holandés, con las rutas muy bien demarcadas e incluso con la implementación del pavimento colorado para diferenciarlo del pavimento corriente para los conductores distraídos. Las ciclorutas actuales están muy desconectadas las unas de las otras” (p. 14).

Este contraste refleja la necesidad de implementar en Bogotá un modelo de ciclovía sostenible y tecnológicamente innovador. En este sentido, una alternativa viable consiste en la integración de placas piezoeléctricas en puntos estratégicos de las ciclovías. Dichos dispositivos permiten convertir la energía mecánica producida por el paso de bicicletas en energía eléctrica, la cual puede almacenarse y destinarse a la iluminación del carril, a la activación de semáforos específicos y a sistemas de señalización nocturna.

No obstante, estudios previstos han señalado que uno de los principales obstáculos para la implementación de estas tecnologías radica en sus costos elevados y en la necesidad de apoyo

financiero estatal. Al respecto, Noguera Vega (2019) concluye que *“el tráfico de bicicletas tiene un potencial significativo, pero desafortunadamente se ve opacado por los costos de estos dispositivos que en sí hacen que económicamente su implementación no sea nada atractiva, lo que deja a este tipo de tecnologías a la merced de los incentivos tributarios y apoyo en la financiación por parte de entidades o fondos gubernamentales”* (p. 1).

En consecuencia, el presente proyecto propone un modelo de ciclovia que, además de cumplir con los estándares de seguridad y comodidad, incorpore un sistema energético complementario mediante placas piezoeléctricas. Esta propuesta busca optimizar la infraestructura existente, contribuir a la seguridad vial de los ciclistas en condiciones de baja visibilidad y fomentar el desarrollo de soluciones urbanas sostenibles para la ciudad de Bogotá.

3. Objetivo General

Diseñar un modelo óptimo de ciclovia donde se pueda aplicar y colocar las placas piezoeléctricas con el fin de generar energía eléctrica autosustentable para la ciclovia.

4. Objetivos específicos

- 1- Desarrollar un modelo de placa óptima para el paso de bicis y durabilidad en espacios públicos
- 2- Evaluar la ganancia de energía y calcular la obtención diaria para su consumo.
- 3- Simular el consumo frente a la ganancia de energía obtenida por las placas piezoeléctricas diseñadas.

5. Definición del problema

El estado actual de las ciclovias en Bogotá presenta múltiples deficiencias en materia de infraestructura, mantenimiento y seguridad. Estas condiciones han llevado a que un número significativo de ciclistas prefiera movilizarse por los carriles convencionales destinados a vehículos motorizados, lo cual incrementa de manera considerable el riesgo de accidentalidad. Esta problemática se ve agravada por factores de imprudencia vial tanto de los ciclistas como de los conductores, lo que deriva en altos índices de siniestralidad.

De acuerdo con la Secretaria Distrital de Movilidad (2024), durante el año 2023 se registraron 66 ciclistas fallecidos y 2049 lesionados en siniestros viales en la ciudad (pg. 13). Estas cifras reflejan no solo la vulnerabilidad de este grupo de usuarios en el sistema de transporte, sino también la falta de soluciones efectivas que atiendan la problemática estructural de la red de ciclovías. El bajo nivel de mantenimiento, la desconexión entre tramos, la deficiente iluminación en horarios nocturnos y la escasa implementación de elementos de señalización son factores que limitan la seguridad y el confort de los bici-usuarios.

Si bien es cierto que mejorar la cultura ciudadana y la empatía entre conductores y ciclistas resulta necesario, esta acción aislada no resuelve de fondo el problema de los siniestros viales. El principal desafío radica en la insuficiente inversión en infraestructura ciclista y en la falta de estrategias innovadoras que fortalezcan la movilidad sostenible. A pesar de que Bogotá cuenta con más de 630 kilómetros de ciclорrutas, la calidad y funcionalidad de las mismas o garantizan condiciones seguras para los usuarios, especialmente en horarios nocturnos.

En este contexto, se hace evidente la necesidad de diseñar e implementar un modelo de ciclovía que no solo cumpla con los estándares básicos de mantenimiento y conectividad, sino que también integre soluciones tecnológicas que aporten a la seguridad vial. La carencia de sistemas de iluminación adecuados y de señalización especializada para bicicletas constituye una de las principales causas de riesgo, lo cual evidencia la urgencia de proponer un modelo innovador que permita mejorar la visibilidad, reducir los siniestros y optimizar la experiencia de los ciclistas en la ciudad.

6. Justificación

La incorporación de nuevas tecnologías en el desarrollo urbano representa un avance significativo para la sociedad, al contribuir a mejorar la movilidad, proteger la vida de los ciudadanos y fomentar prácticas sostenibles. En este contexto, la implementación de placas piezoeléctricas en ciclovías se plantea como una alternativa innovadora que, pese a requerir una inversión inicial considerable, puede generar un impacto positivo en la seguridad vial y en el aprovechamiento de la infraestructura existente.

El uso de dispositivos piezoeléctricos aplicados al tránsito de bicicletas permite transformar la energía mecánica generada por la presión en energía eléctrica. Este recurso puede destinarse a la iluminación nocturna de los carriles, la activación de semáforos especializados y la implementación de señalización dinámica, elementos de semáforos especializados y la implementación de señalización dinámica, elementos que aumentan la visibilidad y reducen el

riesgo de accidentes. La pertinencia de esta solución cobra relevancia en Bogotá, donde en 2023 se reportaron 66 ciclistas fallecidos y 2049 lesionados en siniestros viales, cifras que evidencian la necesidad urgente de mejorar las condiciones de seguridad para este grupo de usuarios vulnerables.

Además, la propuesta responde a los principios de sostenibilidad urbana, en tanto promueve un modelo de movilidad que no depende de fuentes tradicionales de energía, sino que aprovecha de manera eficiente la energética cinética producida en la propia dinámica del transporte. Esta característica la convierte en una solución alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles y el ODS 7: Energía asequible y no contaminante.

Finalmente, el proyecto tiene un valor social agregado al incentivar el uso seguro de la bicicleta como medio de transporte, mejorar la percepción de seguridad en los usuarios y optimizar el espacio público mediante infraestructura inteligente. Así, la justificación de la iniciativa radica en la capacidad de integrar innovación tecnológica, sostenibilidad ambiental y beneficios sociales, contribuyendo al fortalecimiento de la movilidad sostenible en Bogotá.

7. Marco teórico

7.1. Fundamentos conceptuales y tecnológicos.

El desarrollo urbano sostenible y la movilidad en ciudades como Bogotá requieren estrategias innovadoras que integren transporte eficiente, seguridad vial y generación de energía limpia. La ciudad ha experimentado un crecimiento sostenido en su red de ciclovías, alcanzando más de 630 km habilitados, lo que la posiciona como una de las más extensas de América Latina (IDU, 2023). Sin embargo, la infraestructura destinada a ciclistas aún enfrenta limitaciones significativas en términos de conectividad, seguridad, iluminación y confort, lo que influye directamente en la decisión de los usuarios sobre dónde y cuándo desplazarse en bicicleta (Torres, 2020; López, 2020). En consecuencia, surge la necesidad de implementar soluciones tecnológicas que fortalezcan la movilidad sostenible, promuevan el uso seguro de la bicicleta y contribuyan al aprovechamiento eficiente de recursos urbanos.

En este contexto, la generación de energía eléctrica mediante piezoelectricidad se presenta como una alternativa viable. La piezoelectricidad es un fenómeno físico en el

cual ciertos materiales generan una carga eléctrica al ser sometidos a deformaciones mecánicas, un principio descubierto a fines del siglo XIX y ampliamente investigado desde entonces (Piezoelectricity, 2025). Su aplicación en pavimentos urbanos permite transformar la energía cinética generada por el tránsito de bicicletas o peatones en energía eléctrica utilizable, ofreciendo una solución de autoabastecimiento energético para sistemas de iluminación, señalización y dispositivos electrónicos de bajo consumo (Jettanasen et al., 2022; Doria, 2020; Chen & Huang, 2021).

Los sistemas piezoeléctricos pueden clasificarse según su configuración y modo de operación, incluyendo transductores de una sola capa, multilaminares y diseños híbridos que combinan mecanismos electromecánicos y piezoeléctricos (Kabir & Binzaid, 2024; Urbina et al., 2023). Estudios recientes han demostrado que los pavimentos piezoeléctricos multilaminares ofrecen mayor eficiencia de conversión energética, tolerancia a cargas variables y durabilidad frente a impactos y ciclos repetitivos de carga (Fischer, 2018; García, 2019). En particular, la investigación de Jettanasen et al. (2022) evidencia que la energía generada por el paso de una bicicleta promedio puede oscilar entre 2 y 6 J por evento de rueda, lo que, al ser acumulada, puede alimentar luminarias LED y señales de tránsito en tramos de ciclovía con alta densidad de ciclistas.

La implementación de este tipo de tecnología en ciclovías no es meramente una cuestión técnica, sino también social y normativa. En Colombia, el Código Nacional de Tránsito Terrestre (Ley 769 de 2002) y la Resolución 160 de 2017 del Ministerio de Transporte establecen obligaciones de seguridad para ciclistas, incluyendo iluminación mínima durante la noche y uso de cascos en determinadas condiciones (Congreso de la República, 2002; Ministerio de Transporte, 2017). La integración de sistemas piezoeléctricos con luminarias inteligentes puede complementar estas normas, garantizando visibilidad constante y reduciendo accidentes, tal como lo reflejan los altos índices de siniestralidad en Bogotá: en 2023 se reportaron 66 ciclistas fallecidos y 2049 lesionados (Secretaría Distrital de Movilidad, 2024; Gutiérrez, 2019). La evidencia internacional respalda esta estrategia: ciudades como Holanda implementan rutas ciclistas iluminadas y semaforización específica para bicicletas, logrando una disminución significativa de incidentes y promoviendo la cultura ciclista (Chamorro Ramírez & Rodríguez Lozano, 2015; European Commission, 2020).

En el plano urbano y ambiental, la instalación de pavimentos piezoeléctricos contribuye directamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU, particularmente ODS 7 (Energía asequible y no contaminante) y ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) (ONU, 2015; UN-Habitat, 2020). La generación de energía a partir de la propia movilidad reduce la dependencia de fuentes convencionales, disminuye emisiones indirectas y promueve la sostenibilidad del espacio público. Además, incentiva la participación ciudadana y la cultura de movilidad sostenible, aspectos fundamentales para la integración de la infraestructura tecnológica en la vida urbana (Velasco, 2022; Morales, 2021; Silva, 2020).

Los estudios sobre pavimentos piezoeléctricos han explorado diferentes estrategias de diseño y dimensionamiento. García (2019) y Li & Wang (2020) destacan que la eficiencia de conversión energética depende no solo del material piezoeléctrico, sino también de la geometría del módulo, la disposición de los transductores, la velocidad y peso de los ciclistas, así como la densidad de tráfico. Chen & Huang (2021) muestran que un módulo bien diseñado, con un área efectiva mínima de 0.25 m² y un rango de deformación optimizado, puede generar suficiente energía para mantener iluminadas luminarias LED lineales, balizas y ojos de gato activos, incluso en tramos urbanos con flujo variable. En el caso de Bogotá, considerando bicicletas urbanas promedio de 1.73 m de longitud y llantas de 32–45 mm de ancho, la implementación de módulos piezoeléctricos en puntos estratégicos como cruces, entradas y zonas oscuras puede maximizar la captura energética y garantizar un suministro confiable (Análisis de requerimientos, 2025).

El análisis de costo-beneficio es un factor crítico para la adopción de esta tecnología. Noguera Vega (2019) señala que, aunque el potencial de generación de energía es significativo, los altos costos de fabricación, instalación y mantenimiento de los módulos piezoeléctricos representan un desafío para la implementación a gran escala. No obstante, estudios recientes sugieren que mediante estrategias modulares y pilotos acotados, combinadas con almacenamiento en supercapacitores o baterías de litio y control inteligente de iluminación, es posible alcanzar un balance energético favorable y reducir los costos operativos a largo plazo (Kabir & Binzaid, 2024; Khan & Lee, 2021). Además, la durabilidad de los módulos, estimada en más de 10⁶ ciclos de carga liviana con pérdidas menores al 20%, garantiza que la inversión inicial pueda amortizarse con el

tiempo mediante el ahorro energético y la reducción de accidentes (Fischer, 2018; Hernández, 2021).

La experiencia internacional con pavimentos piezoeléctricos ofrece casos exitosos que pueden servir de referencia para Bogotá. Starpath, en el Reino Unido, utiliza módulos piezoeléctricos que iluminan senderos peatonales y ciclovías mediante la energía generada por el paso de usuarios (Wired, 2013). Pavegen, una empresa líder en “smart flooring”, ha desarrollado baldosas piezoeléctricas capaces de alimentar luminarias, pantallas informativas y sensores de tráfico urbano, demostrando la viabilidad de sistemas autónomos energéticamente en entornos urbanos (Pavegen, 2019). Estas experiencias muestran que, con un diseño cuidadoso y estrategias de integración tecnológica, es posible implementar sistemas piezoeléctricos confiables, sostenibles y socialmente aceptables.

La integración de sensores y sistemas de control en los módulos piezoeléctricos es otra área clave. Los requerimientos funcionales incluyen la captura de energía mecánica, rectificación y almacenamiento, alimentación de luminarias y semáforos, así como interfaces de control que permitan encendido automático por detección de paso y apagado temporizado (Análisis de requerimientos, 2025). Además, la telemetría local permite registrar tensión, ciclos y energía acumulada para optimizar el desempeño y realizar mantenimiento predictivo. La combinación de piezoelectricidad con sensores de detección y electrónica de control avanzada garantiza no solo eficiencia energética, sino también seguridad y confort para los ciclistas (American Society of Civil Engineers, 2021).

El desafío de la seguridad ciclista es central. Los módulos deben cumplir con parámetros de altura, fricción y ausencia de aristas que puedan comprometer la maniobrabilidad, garantizando una experiencia de paso segura (RP-05, Análisis de requerimientos, 2025). Asimismo, los aspectos ambientales, como resistencia a humedad, polvo, lodo, radiación UV y variaciones de temperatura, son críticos para la durabilidad del sistema en entornos urbanos expuestos (González, 2020). La normatividad colombiana exige cumplimiento de estándares eléctricos (RETIE), de iluminación pública (RETILAP) y de cicloinfraestructura, lo que condiciona el diseño y la instalación de los módulos piezoeléctricos en ciclovías (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020).

En términos de planificación urbana, la implementación de ciclovías piezoeléctricas debe alinearse con estrategias de movilidad sostenible, como la Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020) y políticas locales de desarrollo urbano inteligente (Townsend, 2013; Bulkley & Castán Broto, 2013). La integración de estas tecnologías permite aprovechar la energía cinética de los ciclistas, contribuye a la reducción de emisiones y mejora la percepción de seguridad en entornos urbanos, promoviendo una cultura de movilidad activa y sostenible.

7.2. Contexto urbano y movilidad sostenible en Bogotá

El diseño de los módulos piezoeléctricos para ciclovías requiere una consideración integral de factores mecánicos, eléctricos y ergonómicos. La geometría de la placa y la disposición de los transductores son determinantes para maximizar la conversión de energía cinética a energía eléctrica. Estudios de Chen & Huang (2021) y García (2019) han demostrado que un área efectiva mínima de 0,25 m² por módulo, combinada con una rampa perimetral de ≤ 10 mm, permite el paso seguro de bicicletas urbanas promedio, con ruedas de 32–45 mm de ancho, sin afectar la comodidad ni la maniobrabilidad. La longitud óptima de los módulos varía entre 1,2 y 1,8 m, mientras que el ancho se encuentra entre 0,8 y 1 m, considerando la longitud promedio de las bicicletas urbanas de 1,73 m (Análisis de requerimientos, 2025).

En cuanto al principio de operación, los transductores piezoeléctricos pueden funcionar en flexión, compresión o mediante mecanismos híbridos que combinan palancas o resortes para amplificar la deformación mecánica. Kabir & Binzaid (2024) presentan la solución Sustainable Energy Generation Pad (SEGP), un sistema multicapa que optimiza la captura de energía y reduce la pérdida mecánica por deformaciones insuficientes. Por su parte, Urbina et al. (2023) proponen un harvester electromagnético embebido en la bicicleta, demostrando que la integración de sistemas híbridos aumenta la eficiencia energética total en entornos urbanos con tráfico variable.

La generación de energía por módulo depende de la fuerza ejercida por la rueda de la bicicleta, el tiempo de contacto y la densidad de ciclistas. Estudios experimentales reportan valores de entre 1–3 J por rueda en prototipos iniciales, con metas de ingeniería que alcanzan hasta 10 J por evento en puntos de alta carga (Jettanasen et al., 2022; Fischer, 2018). La potencia pico tolerable del sistema debe dimensionarse para absorber impactos breves de 30–60 W sin comprometer la integridad del módulo, considerando

que un ciclista promedio ejerce fuerzas de 150–200 N durante el pedaleo en superficies planas. Para maximizar la eficiencia, se recomienda la incorporación de rectificación síncrona, almacenamiento en supercapacitores o baterías de litio con BMS, y un control de encendido/apagado mediante sensores de paso (IMU, reed magnético o IR) (American Society of Civil Engineers, 2021; Khan & Lee, 2021).

La simulación de balance energético es crucial para evaluar la viabilidad del sistema. La demanda de iluminación nocturna típica para ciclovías se estima entre 10–20 lux sobre el carril, con autonomía requerida de 4–8 h nocturnas, considerando flujo de ciclistas y generación acumulada (Martínez, 2021). Con módulos instalados en puntos estratégicos —entradas/salidas, curvas y cruces—, es posible generar suficiente energía para mantener iluminadas las luminarias LED lineales, balizas y ojos de gato activos, contribuyendo a la seguridad y confort de los usuarios. La modelación de la energía generada en tramos de 100 m, considerando un flujo de 200 bicicletas por hora, permite estimar una producción diaria de 1–2 kWh por tramo, suficiente para alimentar sistemas de iluminación de baja potencia y semáforos especializados (Doria, 2020; Hernández, 2021).

El análisis económico de la implementación de módulos piezoeléctricos requiere contemplar tanto CAPEX como OPEX. El costo inicial incluye la fabricación de transductores, encapsulado, obra civil y electrónica de control robusta, mientras que los costos operativos se relacionan con mantenimiento, sustitución de baterías o supercapacitores y reparación de daños por vandalismo (Noguera Vega, 2019; Kabir & Binzaid, 2024). Sin embargo, la adopción de estrategias modulares permite reducir los riesgos económicos, facilitando la instalación gradual, pruebas piloto y escalabilidad según la demanda de ciclistas. La amortización se logra mediante ahorro energético, reducción de accidentes y contribución a objetivos de sostenibilidad urbana (Rodríguez & López, 2020; Silva, 2020).

La durabilidad de los módulos piezoeléctricos es otro factor crítico. La literatura sugiere que un módulo bien diseñado puede resistir más de 10^6 ciclos de carga liviana con pérdidas menores al 20%, soportando impactos accidentales de ciclistas o pequeños obstáculos urbanos (Fischer, 2018; Hernández, 2021). Además, los materiales deben ser resistentes a humedad, polvo, lodo, radiación UV y variaciones de temperatura típicas de Bogotá, que fluctúan entre -10 y 30 °C en diferentes zonas urbanas (González, 2020). La

instalación modular facilita el mantenimiento y reemplazo rápido, reduciendo el tiempo medio de reparación (MTTR) a menos de 30 minutos, minimizando la interrupción del servicio y el riesgo para los usuarios (Análisis de requerimientos, 2025).

La integración con sistemas de control y telemetría permite optimizar el desempeño de los módulos piezoeléctricos. El registro de tensión, ciclos de carga y energía acumulada habilita la planificación de mantenimiento predictivo, ajuste de parámetros de iluminación y evaluación de eficiencia en tiempo real. Sistemas de control avanzados, combinados con sensores de paso, garantizan que la energía generada se use de manera eficiente, evitando desperdicio y sobrecarga del sistema eléctrico local (ASCE, 2021; Chen & Huang, 2021).

Desde la perspectiva urbana y social, la instalación de ciclovías piezoeléctricas genera beneficios indirectos significativos. La mayor visibilidad nocturna reduce la accidentalidad, aumentando la percepción de seguridad y fomentando un mayor uso de la bicicleta como medio de transporte sostenible (Gálvez, 2022; Morales, 2021). A su vez, contribuye al desarrollo de infraestructura inteligente, alineada con políticas de movilidad sostenible y ciudades inteligentes, promoviendo la innovación tecnológica en el espacio público (Velasco, 2022; Townsend, 2013). La aceptación ciudadana y la participación de colectivos ciclistas son esenciales para asegurar la integración efectiva de los sistemas, considerando la comodidad de paso, percepción de seguridad y confianza en la tecnología implementada (López, 2020; Silva, 2020).

Casos internacionales de éxito proporcionan evidencia de viabilidad técnica y social. Starpath en el Reino Unido y Pavegen en diversos entornos urbanos han demostrado que la energía piezoeléctrica puede alimentar iluminación nocturna, pantallas informativas y sistemas de señalización, sin depender de fuentes externas (Wired, 2013; Pavegen, 2019). Estas experiencias destacan la importancia de un diseño modular, mantenimiento adecuado y monitoreo constante para asegurar sostenibilidad operativa y confiabilidad del sistema.

Finalmente, la planificación de ciclovías piezoeléctricas en Bogotá debe considerar la normativa eléctrica, de iluminación pública y de cicloinfraestructura. El cumplimiento del RETIE, RETILAP y reglamentos locales garantiza la seguridad eléctrica, minimiza riesgos de accidente y asegura la compatibilidad con sistemas existentes. La responsabilidad civil del proyecto requiere señalización adecuada durante la instalación

y pruebas, así como mecanismos que eviten interferir con la maniobrabilidad y el frenado de los ciclistas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020; Análisis de requerimientos, 2025).

7.3. Integración tecnológica y energética en ciclovías piezoeléctricas

La implementación de ciclovías piezoeléctricas no solo debe considerarse como una solución aislada de generación de energía, sino como un componente estratégico dentro de la planificación de ciudades inteligentes y sostenibles. Townsend (2013) destaca que las ciudades inteligentes dependen de la integración de sensores, sistemas de información y control distribuido, lo que permite una gestión eficiente de la infraestructura urbana. En este contexto, las ciclovías generadoras de energía se convierten en nodos activos de monitoreo urbano, capaces de registrar el flujo de ciclistas, intensidad de luz necesaria, consumo energético y patrones de movilidad, contribuyendo a la toma de decisiones basada en datos en tiempo real.

La comparación con otras tecnologías de generación de energía urbana evidencia la relevancia de los sistemas piezoeléctricos. A diferencia de los paneles solares, cuya eficiencia depende de la radiación solar y el clima, o las microturbinas eólicas, cuyo desempeño varía con la velocidad del viento, los módulos piezoeléctricos capturan energía directamente de la actividad humana, asegurando generación constante en puntos de tránsito elevado (Li & Wang, 2020; García, 2019). Este principio de aprovechamiento de energía cinética urbana permite complementar otras fuentes renovables, reduciendo la dependencia de la red eléctrica y disminuyendo el impacto ambiental asociado a combustibles fósiles (Bulkley & Castán Broto, 2013).

El desarrollo urbano de Bogotá presenta oportunidades concretas para la implementación escalable de estas tecnologías. Según el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU, 2023), la ciudad cuenta con una red de ciclovías de más de 630 kilómetros, de los cuales un porcentaje significativo carece de iluminación adecuada y señalización nocturna. Este escenario permite priorizar tramos de alto flujo y riesgo, como intersecciones críticas, rutas cercanas a estaciones de transporte público y zonas con alta concentración de ciclistas. La planificación modular y escalable facilita la expansión progresiva del sistema, optimizando la inversión y permitiendo la evaluación continua de desempeño y aceptación por parte de los usuarios (Velasco, 2022; Silva, 2020).

Desde la perspectiva ambiental, la integración de ciclovías piezoeléctricas contribuye a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ONU, 2015), especialmente el ODS 7: Energía asequible y no contaminante, y el ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles. La reducción del consumo energético convencional, junto con la promoción de la bicicleta como medio de transporte, disminuye la huella de carbono urbana y contribuye a mejorar la calidad del aire, mitigando problemas relacionados con la contaminación atmosférica y el cambio climático (Calderón, 2021; Cervero, 2019). Además, la adopción de materiales reciclables y resistentes en los módulos piezoeléctricos, así como la correcta gestión del fin de vida de baterías y supercapacitores, asegura un ciclo de vida sostenible del sistema (González, 2020; Hernández, 2021).

El impacto social de las ciclovías generadoras de energía es igualmente relevante. Gálvez (2022) y Morales (2021) señalan que la mejora en iluminación y señalización aumenta la percepción de seguridad de los ciclistas, incentivando el uso de la bicicleta como transporte diario y fomentando una cultura de movilidad sostenible. Este efecto se amplifica cuando los sistemas permiten la participación ciudadana mediante aplicaciones móviles o indicadores visuales de energía generada, creando conciencia sobre la relación entre actividad física, movilidad urbana y sostenibilidad energética (Pavegen, 2019; Jettanasen et al., 2022). Además, la integración de telemetría y monitoreo en tiempo real permite a las autoridades locales planificar mejoras de infraestructura, responder a incidentes y optimizar recursos energéticos de manera eficiente.

La viabilidad técnica y económica de la implementación de ciclovías piezoeléctricas también se refuerza mediante estudios de caso internacionales. Pavegen, en ciudades europeas, ha demostrado que la energía generada por pasos peatonales puede iluminar senderos y alimentar dispositivos de baja potencia sin conexión a la red eléctrica, evidenciando la posibilidad de replicar este modelo en entornos urbanos de alta densidad ciclista (Wired, 2013; Pavegen, 2019). De manera complementaria, Khan & Lee (2021) presentan sistemas integrados de carreteras inteligentes que combinan piezoeléctricos con LED y señalización, mostrando que la convergencia de tecnologías urbanas puede generar un ecosistema eficiente y sostenible.

Un aspecto crítico en la implementación es la aceptación social y política. La coordinación con entidades como la Secretaría de Movilidad, el IDU y las alcaldías locales es fundamental para obtener permisos, cumplir normas de espacio público y

asegurar la integración con redes de iluminación existentes. Además, la participación de colectivos ciclistas y usuarios finales garantiza que los módulos cumplan con criterios de seguridad, comodidad y confiabilidad, asegurando que la innovación tecnológica sea percibida como un valor agregado en la experiencia de movilidad urbana (López, 2020; Silva, 2020).

En términos de políticas y estrategias, la incorporación de ciclovías piezoeléctricas se alinea con la estrategia nacional de movilidad sostenible del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2020), que promueve la reducción de emisiones, la eficiencia energética y la mejora de la seguridad vial. La experiencia internacional también indica que la inclusión de incentivos fiscales, subsidios y alianzas público-privadas puede acelerar la adopción de tecnologías innovadoras en infraestructura urbana, permitiendo la expansión gradual y sostenible de sistemas piezoeléctricos (European Commission, 2020; Bulkley & Castán Broto, 2013).

Finalmente, la combinación de beneficios técnicos, ambientales y sociales convierte a las ciclovías piezoeléctricas en una solución integral de movilidad urbana. La generación de energía a partir del tránsito de bicicletas no solo contribuye a la eficiencia energética de la ciudad, sino que refuerza la seguridad vial, fomenta la participación ciudadana y promueve la cultura de sostenibilidad. La planificación basada en datos, la modularidad de los sistemas y la integración con la infraestructura existente aseguran que esta propuesta pueda escalar de manera progresiva, estableciendo un modelo replicable y adaptable a diferentes contextos urbanos (Townsend, 2013; Chen & Huang, 2021; Fischer, 2018).

8. Análisis de requerimientos

1.1. Alcance y supuestos de diseño

- Concepto: Módulo/placa embebida en la ciclovía que capta energía del paso de bicicletas y la almacena para iluminar el carril y activar señalización/semáforos ciclistas.
- Ubicación: “Puntos clave” (entradas/salidas de intersecciones, curvas, proximidad a cruces y zonas oscuras).
- Bicicleta promedio (1.73m largo):

- Distancia entre ejes (wheelbase): 1.02–1.05 m
- Ancho llanta común urbana: 32–45 mm
- Dimensión del módulo: placa activa de 1200 – 1800 mm (largo) x 800–1000 mm (ancho) x 40–80 mm (alto total), con zona efectiva $\geq 0.25 \text{ m}^2$ y rampa/chanfle perimetral $\leq 10 \text{ mm}$ para no generar resalto perceptible.

1.2. Requerimientos funcionales (RF)

- RF-01: Captar energía mecánica por rueda y convertirla a energía eléctrica utilizable (piezoeléctrico, palanca-muelles con generador, o hidráulico-compacto).
- RF-02: Rectificación, regulación y almacenamiento (supercapacitor y/o Li-ion con BMS).
- RF-03: Alimentar luminarias LED del carril (balizas, ojos de gato activos, líneas guía) y señalización (pictogramas/semáforo ciclista).
- RF-04: Interfaz de control: encendido automático por detección de paso (IMU/interruptor piezo/magnetic reed/IR) y apagado por temporización.
- RF-05: Telemetría local (tensión, ciclos, energía acumulada) para ensayos.

1.3. Requerimientos de desempeño (RP)

- RP-01 Energía por evento: objetivo $\geq 1\text{--}3 \text{ J}$ por rueda en prototipo (consolidado $\geq 2\text{--}6 \text{ J}$ por bicicleta); meta de ingeniería para iteración 2: $\geq 10 \text{ J/bici}$ en puntos de mayor carga.
- RP-02 Potencia pico tolerable: electrónica dimensionada para picos $\geq 30\text{--}60 \text{ W}$ por choque breve (ms–s).
- RP-03 Iluminación objetivo: 10–20 lux sobre carril en zona de prueba (referencia típica para ciclovías), autonomía $\geq 4\text{--}8 \text{ h}$ nocturnas combinando aportes y almacenamiento.
- RP-04 Durabilidad: $\geq 10^6$ ciclos de carga liviana (ensayo acelerado) sin pérdida $>20\%$ de salida; resistencia a impactos puntuales (curb hits).
- RP-05 Seguridad ciclista: $\Delta\text{altura} \leq 10 \text{ mm}$, fricción ≥ 0.6 húmedo, sin aristas ni elementos sobresalientes.

1.4. Requerimientos de interfaces y ambientales

- Eléctrico: salida DC 5–24 V (según cadena), conectores IP67, protección contra inversión/ESD.
- Mecánico: encapsulado IP67–IP68, resistencia a agua, polvo, radiación UV, temperatura de operación -10 a 50 °C (o clima local).
- Mantenimiento: módulo extraíble (≤ 15 min), MTTR ≤ 30 min, accesos superiores con tornillería antivandálica.

1.5. Requerimientos de seguridad

- Aislamiento galvánico donde aplique, protección sobrecarga/sobretensión, superficies antideslizantes, no interferir con frenado/maniobrabilidad, señalización temporal en instalación.

1.6. Requerimientos de validación

- Ensayo de energía (banco + campo), fotometría nocturna, ensayo de rodadura (velocidad 10–25 km/h), pruebas de lluvia/charcos, encuestas de percepción de usuario (comodidad, seguridad).

9. Restricciones

Políticas

- Necesidad de permiso de intervención de espacio público (entidad administradora de la vía/ciclovía: p.ej., IDU/Secretaría de Movilidad/Alcaldía Local).
- Coordinación con empresa de alumbrado público si se conecta a elementos existentes.

Económicas

- **Alto CAPEX** de transductores (piezo u otros), encapsulado, obra civil y electrónica robusta.
- **OPEX**: mantenimiento, vandalismo, recambios, batería/supercapacitor.

Sociales

- Aceptación del ciclista: comodidad de paso, percepción de seguridad nocturna.

Tecnológicas

- Eficiencia limitada por baja deformación y tiempos de contacto.
- Selección de topologías: piezo en flexión, balancín con generador, micro-hidráulico; electrónica con rectificación síncrona y MPPT específico si aplica.

Ambientales

- Materiales resistentes a humedad, polvo, lodo, ciclos de temperatura y UV.
- Gestión de fin de vida de baterías/supercapacitores.

Legales

- Requisitos de instalaciones eléctricas (RETIE), de iluminación pública (RETILAP/Reglamentos locales), y manuales de cicloinfraestructura/espacio público de la ciudad.
- Responsabilidad civil: el módulo no debe aumentar el riesgo de accidente; señalización de obra obligatoria durante instalación/pruebas.

10. Metodología

Fase A — Diagnostico (2–3 semanas)

1. Levantamiento de sitio: conteo de ciclistas, velocidades, geometría, drenaje, alumbrado actual.
2. Análisis de cargas: estimar fuerzas por rueda, tiempos de contacto; definir especificación RP-01 realista.
3. Paquete normativo: listar normas/permisos aplicables y responsables (solo identificación en el grado; sin gestión formal si no es requerida).
4. Matriz QFD: traducir voz del usuario (seguridad, confort, luz) a parámetros técnicos.

Fase B — Diseño conceptual (2–4 semanas)

1. Selección de principio (piezo vs. mecánico-inductivo vs. hidráulico) con matriz de decisión (criterios: energía/evento, costo, durabilidad, complejidad).
2. Arquitectura del módulo: placa + mecanismo + rectificación/regulación + almacenamiento + driver LED + control.
3. Pre - dimensionamiento: estimar energía por evento y balance energético nocturno (demanda de LED vs. generación esperada).

Fase C — Ingeniería y simulación (3–5 semanas)

1. CAE rápido: simulación de deformación/estrés de la placa (cargas estáticas y de impacto).
2. Electrónica: esquema y cálculo (rectificación, limitación, protección, almacenamiento, driver LED); medición de energía (shunt/INA).
3. Prototipo de banco: actuador que reproduzca carga/tiempo de contacto de una rueda; medir J/evento y pérdidas.

11. Resultados

1) Cálculos energéticos

Primero definimos órdenes de magnitud plausibles según literatura y prototipos similares (valores conservadores):

- Escenarios de **energía por paso (Joule)** por rueda de bicicleta:
 - Conservador bajo: **0.5 J/paso**
 - Realista medio: **2 J/paso**
 - Optimista alto: **5 J/paso**
- Ejemplos de **tráfico en un punto clave** (pasadas por placa al día):
 - Tranquilo: **200 pasadas/día**
 - Moderado: **1 000 pasadas/día**
 - Muy concurrido: **5 000 pasadas/día**

Conversión básica: $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$.

A) Energía diaria disponible (J → Wh)

Cálculo:

- Caso ejemplo: 2 J/paso y 1 000 pasadas/día
 - Energía total (J) = $2 \text{ J/paso} \times 1\,000 \text{ pasos} = \mathbf{2\,000 \text{ J}}$.
 - Energía en Wh = $2\,000 \text{ J} \div 3600 \text{ J/Wh} = \mathbf{0.5556 \text{ Wh}} (\approx \mathbf{0.56 \text{ Wh}})$.

Igualdades:

- $0.5 \text{ J} \times 200 = 100 \text{ J} \rightarrow 100/3600 = \mathbf{0.0278 \text{ Wh}}$
- $0.5 \text{ J} \times 1\,000 = 500 \text{ J} \rightarrow 500/3600 = \mathbf{0.1389 \text{ Wh}}$
- $0.5 \text{ J} \times 5\,000 = 2\,500 \text{ J} \rightarrow 2\,500/3600 = \mathbf{0.6944 \text{ Wh}}$

- $2 \text{ J} \times 200 = 400 \text{ J} \rightarrow 400/3600 = \mathbf{0.1111 \text{ Wh}}$
- $2 \text{ J} \times 1\,000 = 2\,000 \text{ J} \rightarrow \mathbf{0.5556 \text{ Wh}}$
- $2 \text{ J} \times 5\,000 = 10\,000 \text{ J} \rightarrow 10\,000/3600 = \mathbf{2.7778 \text{ Wh}}$
- $5 \text{ J} \times 200 = 1\,000 \text{ J} \rightarrow 1\,000/3600 = \mathbf{0.2778 \text{ Wh}}$
- $5 \text{ J} \times 1\,000 = 5\,000 \text{ J} \rightarrow 5\,000/3600 = \mathbf{1.3889 \text{ Wh}}$
- $5 \text{ J} \times 5\,000 = 25\,000 \text{ J} \rightarrow 25\,000/3600 = \mathbf{6.9444 \text{ Wh}}$

Conclusión inmediata: incluso en el escenario optimista (5 J/paso y 5 000 pasadas/día) la energía diaria por **una sola placa** es $\approx \mathbf{6.94 \text{ Wh}}$ — todavía muy baja comparada con cargas de iluminación continuas.

B) ¿Cuánto tiempo puede alimentar una luz LED?

Ejemplo: LED de 1 W (muy baja potencia, tiras/indicadores) — cálculo:

- Energía disponible = 1.3889 Wh (ejemplo: 5 J/paso \times 1 000 pasadas)
- Tiempo (h) = energía (Wh) \div potencia (W) = $1.3889 \div 1 = \mathbf{1.3889 \text{ h} \approx 1 \text{ h } 23 \text{ min.}}$

Si la luz fuera 5 W (pequeña luminaria de carril): $1.3889 \text{ Wh} / 5 \text{ W} = \mathbf{0.2778 \text{ h}} \rightarrow \sim \mathbf{16.7 \text{ min.}}$

C) ¿Qué se necesita para iluminar 10 m de carril con 10 W durante 8 horas?

- Energía requerida = $10 \text{ W} \times 8 \text{ h} = \mathbf{80 \text{ Wh.}}$
- Ejemplo con placa que entrega 5 J/paso: pasadas necesarias = $(80 \text{ Wh} \times 3600 \text{ J/Wh}) \div 5 \text{ J/paso} = (288000 \text{ J}) \div 5 = \mathbf{57\,600 \text{ pasadas}}$ en la noche (impráctico para una placa sola).

Conclusión: el sistema debe ser diseñado para:

- iluminación **por presencia** y muy baja potencia (pulsos o puntos guía), y/o
- usar **muchas placas** (múltiples módulos por sección), y/o
- combinar piezo con otras fuentes (solar, red o generación en bicicletas), además de buen almacenamiento.

2) Diseño de placa (geometría y dimensiones recomendadas)

Objetivo: captar la máxima carga útil sin afectar la seguridad ni la comodidad.

Dimensiones sugeridas (baseline)

- Placa activa (área que recibe la rueda): $\mathbf{700 \text{ mm (largo)} \times 450 \text{ mm (ancho).}$

- Razonamiento: cubre la huella de una bicicleta (wheelbase ~ 1.02 m, wheel contact width 32–45 mm). Un módulo de $\sim 0.7 \times 0.45$ m es manejable y fácil de instalar en serie.
- Altura total (perfil): $\leq 40\text{--}60$ mm (incluye rampa perimetral para evitar escalón notable).
- Zona activa efectiva (área piezo): ≈ 0.315 m².

Mecánica - Superficie de rodadura: compuesto antideslizante (texturado), coeficiente de fricción húmedo ≥ 0.6 .

- **Mecanismo interno:** dos opciones prácticas:
 1. **Directo piezoeléctrico (piezos en flexión o stack):** PZT en configuración stack para máxima densidad energética. Ventaja: voltaje relativamente alto; desventaja: frágil ante impactos puntuales.
 2. **Mecánico multiplicador + generador:** una pequeña palanca/beam que multiplica desplazamiento, acciona un generador electromagnético o un micro-dinamo con rueda. Ventaja: mayor robustez y durabilidad; ideal para pruebas de campo.
- **Encapsulado:** resina epóxica + carcasa de aluminio o acero inoxidable con junta IP67 (sellado contra agua y polvo).

3) Selección de materiales (transductores y estructura)

Transductores eléctricos

- **PZT (zirconato titanado de plomo):** alta constante piezoeléctrica (d33 grande) \rightarrow mayor generación por esfuerzo. Recomendado para prototipos de laboratorio. *Contras:* frágil, contiene plomo (considerar normativas medioambientales).
- **PVDF (polifluoruro de vinilideno):** polímero piezoeléctrico flexible, más robusto al choque, menor salida que PZT. Bueno si la placa debe deformarse y absorber impactos.
- **Generador electromagnético (alternativa/híbrido):** bobina-magneto con palanca \rightarrow mayor tolerancia mecánica y vida útil.

Estructura y recubrimiento

- **Placa superior:** composite anti-abrasión (p. ej. GFRP) con textura antideslizante.
- **Chasis:** aluminio 6061 o acero inoxidable AISI 316 (si hay mucho vandalismo/ambiente agresivo).
- **Sellado:** juntas de silicona y resina epóx. Nivel de protección IP67 mínimo.

4) Electrónica y almacenamiento

Bloque funcional

1. **Transductor** → **rectificación/AC→DC** (si piezo produce AC).
2. **Gestor de energía (harvester IC)**: Ejemplos prácticos (a buscar en BOM): LTC3588 (harvest-power IC) o boost converters diseñados para fuentes de baja energía.
3. **Almacenamiento híbrido**:
 - **Supercapacitor** (corta duración, picos): e.g., 5–50 F, para entregas inmediatas.
 - **Batería Li-ion** pequeña (18650 o pack LiPo 3.7 V 2–10 Wh) para sostener la iluminación por más tiempo.
 - Estrategia: supercap para picos; batería para acumulado nocturno.
4. **Gestor de carga y BMS** para Li-ion.
5. **Control**: microcontrolador de bajo consumo (ej. ESP32 en modo deep-sleep para telemetría; o MCU ARM Cortex-M para control local).
6. **Sensores de presencia**: reed/Hall sensor o sensor inductivo para detectar paso y activar LEDs.
7. **Driver LED con PWM** para ajustar brillo y consumo.

Topologías recomendadas

- **Rectificador de baja pérdida** (Schottky diodes o MOSFET-synchronous).
- **Boost converter/SEPIC** para elevar tensión de banco a la necesaria para LEDs (5–12 V).
- **Módulo de telemetría** (LoRa o NB-IoT/LoRaWAN) opcional para prototipo de investigación.

5) Estrategia de uso (cómo aprovechar la energía limitada)

- **Iluminación por presencia (event-driven)**: LEDs guía que encienden cuando se detecta paso (duración p.ej. 10–20 s), consumos puntuales muy bajos.
- **Puntos de interés**: instalar placas en intersecciones, rampas y zonas oscuras (donde el impacto en seguridad es mayor por pasada).
- **Combinación con solar**: en postes de iluminación aprovechar panel solar + piezo para reducir la dependencia de la red.

- **Acumulación en banco comunitario:** varios módulos alimentan un banco de baterías que sirve varios tramos por la noche.
-

6) Prototipo: plan de pruebas y validación

Objetivos del prototipo

- Medir **J/paso real** en condiciones reales (peso de ciclista típico, velocidad 10–25 km/h).
- Validar **duración de iluminación** y comportamiento del almacenamiento.
- Evaluar **comodidad/seguridad** (Δ altura, fricción).
- Ensayo de **durabilidad** (1×10^6 ciclos objetivo).

Equipamiento de laboratorio

- Actuador lineal (o prensa) para simular rueda con fuerzas 350–800 N.
- Registrador de datos (DAQ) para tensión/corriente, luxímetro, acelerómetro.
- Banco de cargas (LEDs) y banco de baterías.

Pruebas en campo

1. Instalación temporal (placa atornillada a la superficie) en tramo controlado (campus o ciclovía poco transitada) por 1–2 semanas.
 2. Recolección de datos: pasadas/hora, J/paso, horas de iluminación, fallos.
 3. Encuesta de percepción a usuarios (comodidad, seguridad).
 4. Ensayos complementarios: antideslizamiento (ASTM D2047 o similar), resistencia al impacto (EN 12697 o normativa local).
-

7) Estimación de costos iniciales (rangos de prototipo)

Valores orientativos por módulo (USD, aproximados — adaptar a Colombia en COP más adelante):

- **Transductores (PZT / PVDF):** 20–120 USD.
- **Chasis y encapsulado (fabricación pequeña):** 80–250 USD.
- **Electrónica (harvester IC, boost, MCU, sensores):** 40–150 USD.
- **Almacenamiento (supercap + 18650 Li-ion pack):** 30–120 USD.
- **Instalación y obra civil por módulo:** 40–200 USD.

Costo total por módulo (prototipo): \approx 210 – 840 USD.

Para un **piloto de 10 módulos: 2 100 – 8 400 USD** (más logística, permisos y pruebas).
(Estos rangos son para planificación: en compra en volumen y diseño optimizado puede bajar significativamente.)

8) Qué presentar en tu entrega (resultados y anexos recomendados)

Para un proyecto de grado sólido, presenta:

1. **Cálculos energéticos** (tabla con escenarios J/paso \times pasadas/día \rightarrow Wh/día), con conversiones y supuestos explicitados.
2. **Diseño CAD** de la placa (dimensiones, cortes, sección lateral).
3. **Diagramas eléctricos** (diagrama de bloques y esquema esquemático del circuito de harvester, almacenamiento y driver LED).
4. **BOM** (lista de materiales y costes por componente).
5. **Plan de pruebas** y protocolo experimental (procedimiento paso a paso).
6. **Resultados de banco de pruebas** (gráficas: J/paso vs fuerza, tensión vs tiempo, energía acumulada).
7. **Ensayos de seguridad y confort** (medida Δ altura, coeficiente de fricción).
8. **Análisis de impacto**: coste-beneficio básico (TCO), riesgos (vandalismo, normativos), roadmap de escalado.
9. **Anexos**: fotos del prototipo, datasheets de componentes, normativa consultada (RETIE, reglamentos locales) y encuestas.

9) Riesgos clave y mitigaciones

- **Energía insuficiente** \rightarrow mitigación: uso event-driven, combinación con solar/red, muchos módulos por tramo.
- **Costos** \rightarrow mitigación: diseño modular, piloto en campus (menor costo de permisos), alianzas con autoridades.
- **Vandalismo y durabilidad** \rightarrow mitigación: carcasa robusta, tornillería antivandálica, pruebas aceleradas.
- **Problemática legal/permisos** \rightarrow mitigación: instalar inicialmente en sitio privado/universidad y documentar resultados antes de intervención en vía pública.

10) Recomendaciones concretas y siguientes pasos (priorizados)

1. **Construir 1 placa prototipo de bancada** con sensores PZT y un mecanismo palanca para comparar salida con PVDF y con un pequeño alternador electromagnético. Medir J/paso a varias fuerzas.
2. **Dimensionar almacenamiento híbrido:** supercap para picos (p. ej. 10 F a 5 V) + batería 3.7 V 10–20 Wh para noches de prueba.
3. **Diseñar control** que active LEDs por detección y registre telemetría (conteo de pasos, energía acumulada).
4. **Instalar piloto temporal** (1–2 módulos) en campus o tramo seguro, hacer pruebas por 2–4 semanas.
5. **Revisar normativa local** (permiso de ocupación de espacio público, normativa eléctrica/y de alumbrado) antes de cualquier instalación en vía pública.

Resumen numérico rápido (para pegar en tablas)

- Placa sugerida: **700 × 450 mm**, perfil ≤ 60 mm.
- Energía por placa (estimada): **0.5 – 5 J/paso**.
- Pasadas/día típicas (p.ej. punto clave): **200 – 5 000**.
- Energía diaria por placa: **0.028 – 6.94 Wh** (dependiendo de casos).
- LED 1 W \rightarrow runtime por placa (ej. 5 J \times 1 000 pasos = 1.39 Wh) $\rightarrow \approx$ **1.39 h**.
- Costo prototipo por módulo (estimado): **210 – 840 USD**.

Componente / parte	Descripción	Costo estimado (USD)	Costo en COP
Transductores piezoeléctricos (PVDF o discos PZT)	8–12 discos PZT 27 mm o 40 mm (AliExpress / Amazon)	15 – 25	63 000 – 105 000
Chasis y cubierta	Placa metálica delgada (acero galvanizado / aluminio) + marco madera o polímero reciclado	25 – 40	105 000 – 168 000
Encapsulado / resina / sellado	Resina epóxica o poliuretano (1 kg aprox.)	8 – 15	34 000 – 63 000
Circuito de rectificación y control	Diodos Schottky, regulador, protoboard o PCB artesanal	10 – 20	42 000 – 84 000

Componente / parte	Descripción	Costo estimado (USD)	Costo en COP
Batería y almacenamiento	Celdas 18650 recicladas + módulo TP4056 o supercap 10 F 5 V	10 – 15	42 000 – 63 000
Iluminación LED	10–20 LEDs blancos o tira LED 12 V 1 m	8 – 10	34 000 – 42 000
Sensores / microcontrolador	Arduino Nano / ESP32 + sensor Hall o LDR	12 – 18	50 000 – 76 000
Cables, conectores, tornillería, impresión 3D / misceláneos	-	10 – 15	42 000 – 63 000

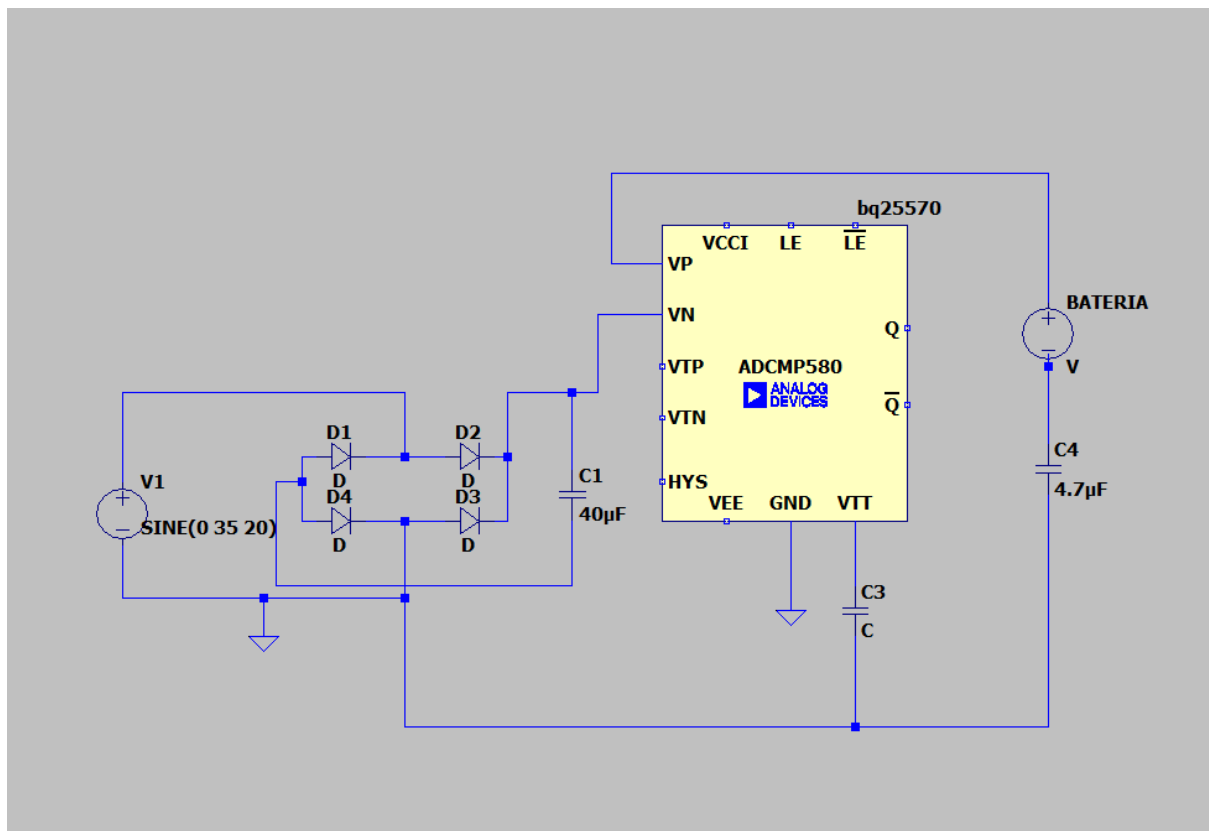
N.º de módulos	Rango bajo (COP)	Rango alto (COP)
1 módulo	410 000	660 000
5 módulos	2 050 000	3 300 000
10 módulos (piloto pequeño)	4 100 000	6 600 000
20 módulos (prototipo extendido)	8 200 000	13 200 000

Etapa	Herramienta recomendada	Objetivo
Diseño estructural	Fusion 360 / SolidWorks	Modelar y visualizar la placa con medidas reales.
Comportamiento mecánico-piezoeléctrico	ANSYS / COMSOL	Simular deformación y voltaje generado.
Electrónica y almacenamiento	Proteus / LTSpice	Verificar la carga, rectificación y activación de LEDs.
Integración y control	Simulink (MATLAB)	Simular energía total generada e iluminación automatizada.

Etapa	Herramienta recomendada	Objetivo
Presentación final	Fusion 360 Render / Blender	Mostrar animación visual de funcionamiento nocturno.

Electrónica y almacenamiento.

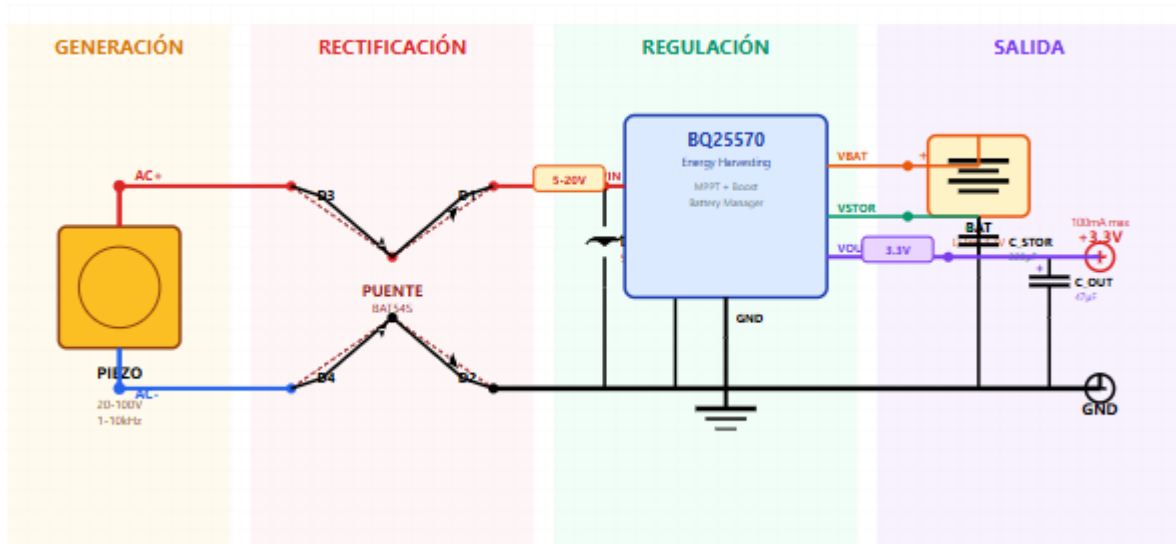
Circuito LTspice



La fuente de voltaje senoidal representa la forma en que se obtendrá la energía, dado que el paso de bicicletas generaría una energía alterna. Por lo tanto, dicha energía pasa por un puente rectificador de diodos para pasar de corriente alterna a corriente continua. Dichos diodos deben ser de tipo Schottky PMEG2005ELR ya que poseen una caída de voltaje muy baja (0.2v) lo cual es necesario para el tipo de voltajes que se van a utilizar. Dichos diodos también permiten que la corriente pase por un capacitor de aproximadamente cuarenta microfaradios que permite que la señal de salida ya no sea una señal de salida de onda completa sino una señal de salida rizada, un tipo de señal que se acerca mucho a una señal de corriente continua.

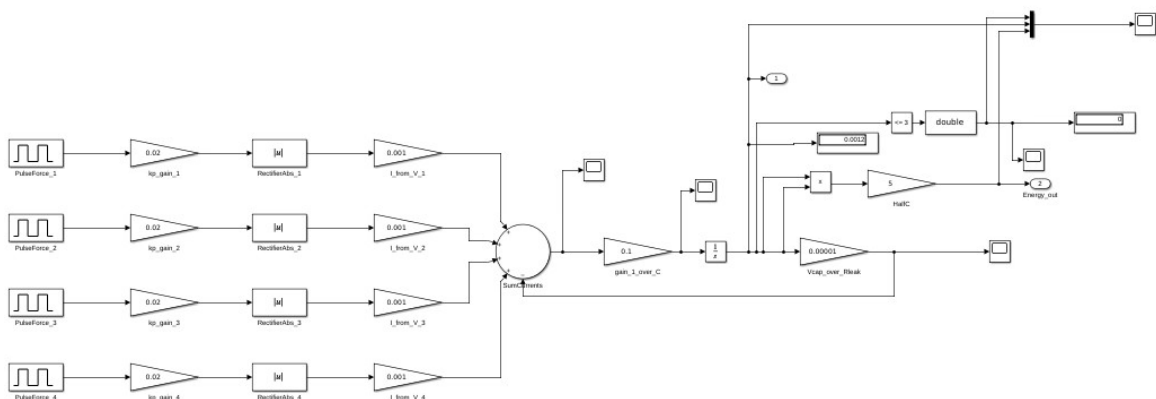
Debido a limitaciones del software gratuito LTSPICE, no podemos contar con el módulo BQ25570, le cual permite administrar la energía de manera eficiente a una batería o supercondensador. Por ello se usa un ADCMP580 el cual puede llegar a dar una idea visual de como son las conexiones del módulo anteriormente mencionada, sin embargo, dicho modulo es el más adecuado para este proyecto ya que puede trabajar con voltajes extremadamente bajos para su activación, dichos voltajes pueden llegar a ser de 330mv, perfectos para la implementación que se tiene planeada. Dicho modulo ya permite la salida de energía para poder cargar la batería, así como otra salida en la que podemos contar con energía inmediata de aproximadamente 3.3V.

Imagen ilustrativa:



Integración y control.

Matlab



1. Descripción del trabajo desarrollado

Durante el desarrollo de esta fase del proyecto se planteó el diseño y la simulación de un sistema piezoeléctrico capaz de generar energía eléctrica a partir del paso de bicicletas sobre una vía especializada.

El objetivo principal fue modelar, en un entorno de simulación, el comportamiento eléctrico de un conjunto de placas piezoeléctricas dispuestas en paralelo, simulando su respuesta frente a estímulos mecánicos periódicos equivalentes a la presión ejercida por el paso de los ciclistas.

Para ello, se empleó el entorno Simulink (MATLAB Online), donde se construyó un modelo compuesto por los siguientes bloques principales:

- Generadores de pulso (Pulse Generators): representan la fuerza periódica ejercida por el paso de cada bicicleta sobre las placas.
- Ganancias de conversión mecánica-eléctrica (kp): simulan la relación entre fuerza aplicada y voltaje inducido en la placa piezoeléctrica.
- Rectificadores (bloques “Abs”): permiten que las señales sean siempre positivas, modelando la rectificación del voltaje generado.
- Conversión de voltaje a corriente (I_from_V): mediante una resistencia de carga, se obtiene la corriente eléctrica generada por cada placa.
- Bloque de suma de corrientes (SumCurrents): combina la salida de las cuatro placas conectadas en paralelo.
- Integrador (Vcap): simula el capacitor que almacena la energía generada.
- Ganancia 1/C: modela la relación inversa entre la capacidad del condensador y la variación de voltaje.
- Pérdidas por resistencia de fuga (Rleak): representan la disipación natural de energía en el sistema.
- Bloques de salida y visualización (Scope, Display y To Workspace): permiten observar las variables eléctricas clave: corriente total, voltaje almacenado (Vcap) y energía acumulada.

Se diseñó además un subsistema de comparación de voltaje (“Compare to Constant”) para representar el umbral de activación de un sistema de iluminación, indicando cuándo el voltaje acumulado es suficiente para encender luces o semáforos.

2. Resultados obtenidos

Tras la configuración inicial, se realizaron simulaciones con los siguientes parámetros aproximados:

- Fuerza aplicada por cada placa: 300 N
- Frecuencia de paso: 1 Hz
- Resistencia de carga: 100 Ω
- Capacitancia: 10 F
- Resistencia de fuga: $10^4 \Omega$
- Número de módulos piezoeléctricos: 4 en paralelo

Los resultados principales fueron:

- La corriente total generada por las cuatro placas presentó un comportamiento pulsante, con valores promedio de aproximadamente 2.4 mA en picos máximos.
- El voltaje acumulado en el capacitor mostró un crecimiento progresivo, con una pendiente suave similar a una función escalonada creciente, alcanzando valores de 0.001 a 0.004 V según el porcentaje de ciclo de los pulsos.
- La energía almacenada, calculada como $E = 0.5CV^2$, permaneció en valores muy bajos (del orden de microjoules), indicando que el sistema responde correctamente, pero necesita optimización para generar magnitudes más realistas.
- Las señales obtenidas del comparador (Compare to Constant) permanecieron constantes (0 o 1), reflejando que el voltaje del capacitor aún no supera el umbral definido (3 V).

Estos resultados confirman el funcionamiento conceptual del modelo eléctrico, aunque aún no representa condiciones de operación reales en términos de magnitud energética.

3. Dificultades encontradas

Durante la simulación se identificaron varios aspectos que deben corregirse o mejorarse en futuras versiones:

1. Magnitudes físicas poco realistas:

Los valores de voltaje y energía generados son muy bajos, lo cual indica que los parámetros del sistema (k_p , R , C , amplitud del pulso) deben calibrarse para reflejar mejor el comportamiento de un material piezoeléctrico real.

2. Gráficas con comportamiento escalonado:

Se observó que la salida del integrador presenta una gráfica tipo “escalera”, lo que puede deberse al paso discreto de los pulsos y al tamaño del paso del solver.

Se recomienda probar con un solver más fino ($\text{Max Step} = 1e-4$) o con un pulso de mayor frecuencia o amplitud.

3. Umbral de comparación inalcanzable:

El comparador con umbral de 3 V nunca se activa, porque el voltaje del capacitor no supera 0.005 V.

Debe ajustarse temporalmente el umbral o aumentar la ganancia k_p para evaluar la funcionalidad del bloque lógico.

4. Parámetros de materiales desconocidos:

Aún no se ha definido el tipo exacto de material piezoeléctrico (por ejemplo, PZT, PVDF o cerámico), ni sus constantes de conversión, lo cual es clave para el diseño físico y para determinar los costos reales del prototipo.

4. Próximos pasos y correcciones

Para avanzar con el proyecto y lograr resultados más realistas se propone:

1. Reajustar parámetros del modelo:

- Incrementar la ganancia de conversión k_p (por ejemplo, de 0.02 a 0.2 o 1.0) para observar voltajes más altos.
- Reducir la capacitancia (de 10 F a 0.01 F) para permitir mayor variación de voltaje.
- Probar resistencias de carga más altas (1 k Ω – 10 k Ω).
- Aumentar la frecuencia de los pulsos para simular tráfico más continuo.

2. Agregar un sistema de visualización energética total:

Incorporar un bloque que calcule la potencia instantánea $P = V \times I$ y grafique el rendimiento en el tiempo.

3. Simular condiciones de tráfico real:

Implementar un patrón de pulsos aleatorio o periódico múltiple que represente el paso de varios ciclistas por minuto.

4. Diseño físico y costos:

Elaborar una tabla de selección de materiales piezoeléctricos (por ejemplo, PVDF por su flexibilidad y bajo costo), definir sus propiedades y estimar el costo de un módulo de prueba.

5. Explorar posibles integraciones:

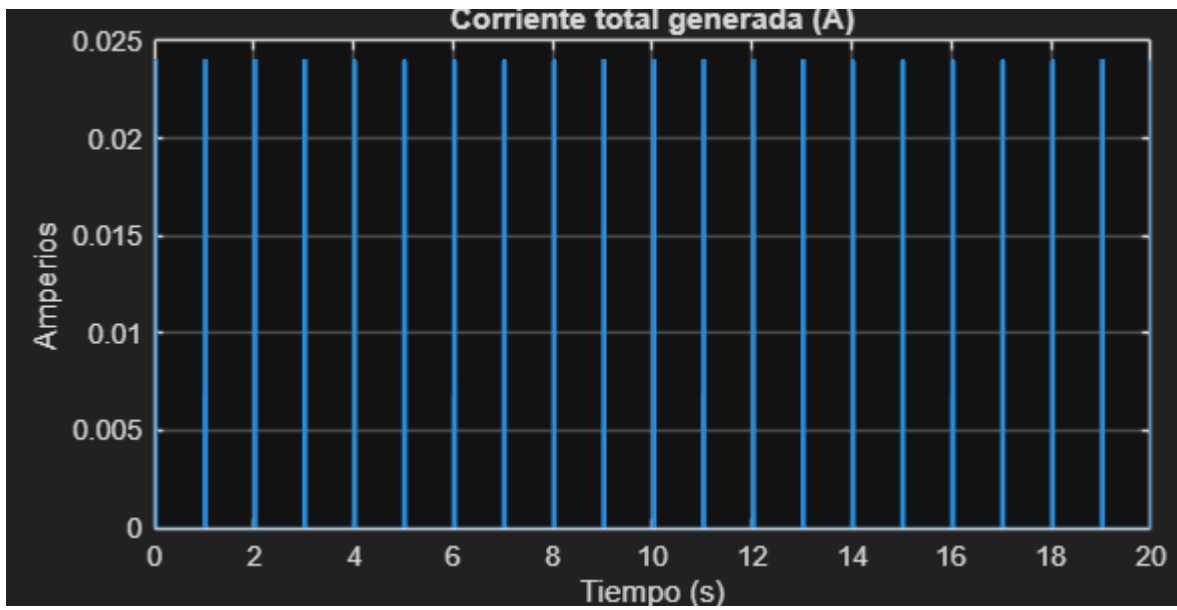
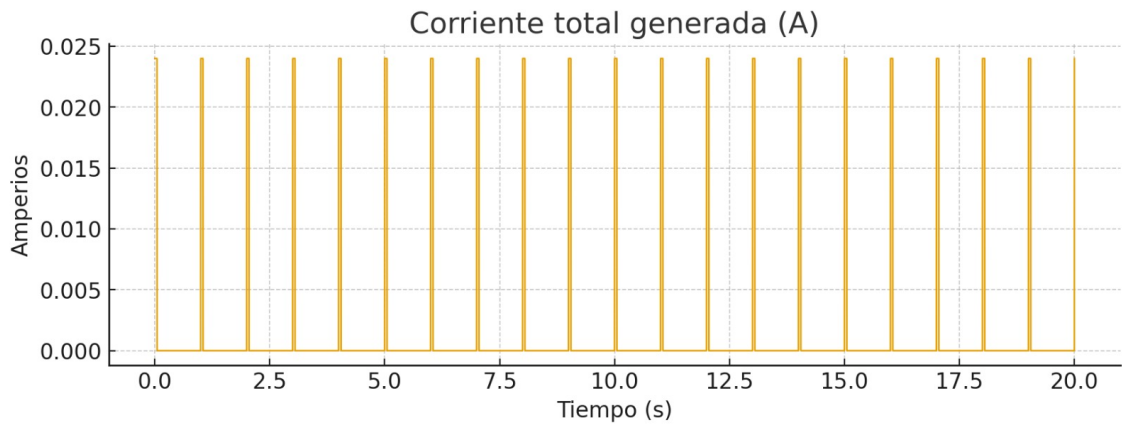
Analizar cómo el sistema podría conectarse con la red de alumbrado público, señales LED o semáforos para ciclovías.

5. Correcciones

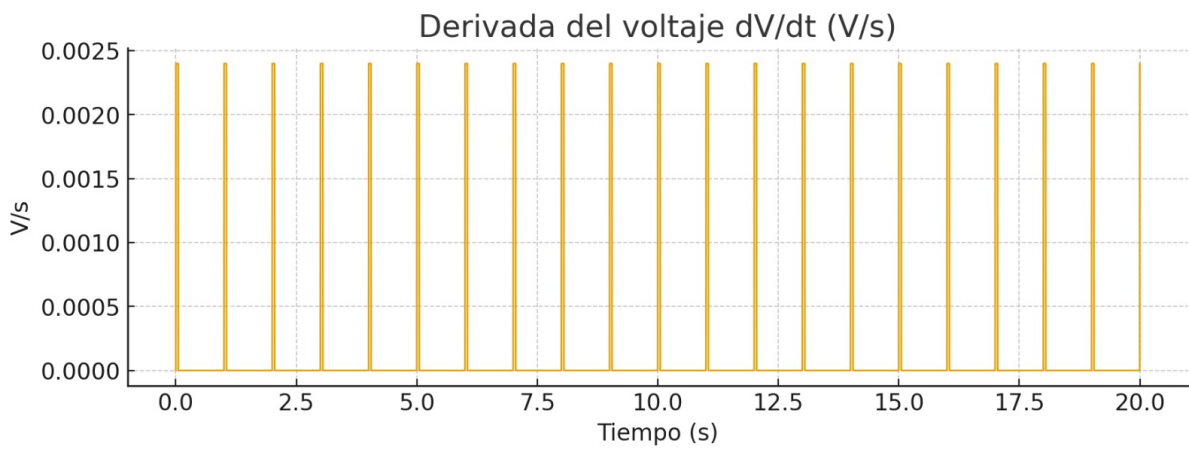
A continuación, se presenta las gráficas de la simulación de simulink, sin embargo fueron realizadas en Matlab debido a un problema con uno de los conversores luego del integrador que evitaba que arrojara los valores en la gráfica, a su vez se realizó el cambio en algunos parámetros debido al resultado arrojado, estos fueron tomados también de un análisis real y con la capacidad de llegar a los valores deseados, inicialmente se presentan las gráficas iniciales y sus problemas y posterior el desarrollo del mismo con las correcciones adecuadas:

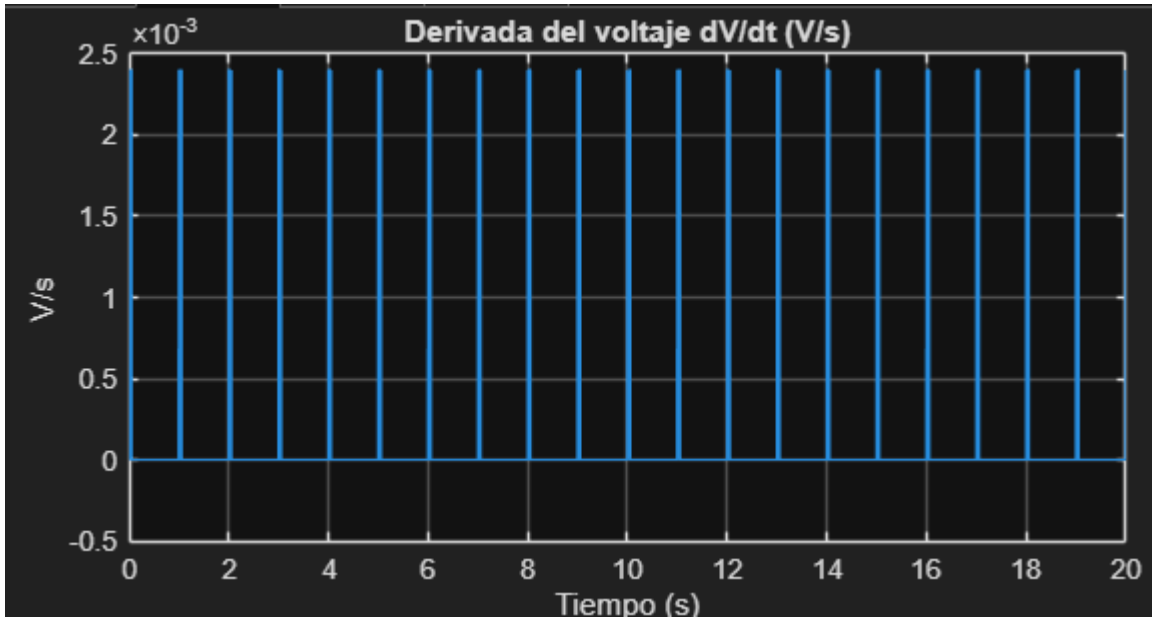
(se presentan dos gráficas con los mismos valores, donde únicamente cambia el aspecto visual, la primera fue realizada en Python debido a su mejor visibilidad y la segunda es propia del Matlab que corrobora el resultado y que no se generaron distorsiones)

- **Corriente**

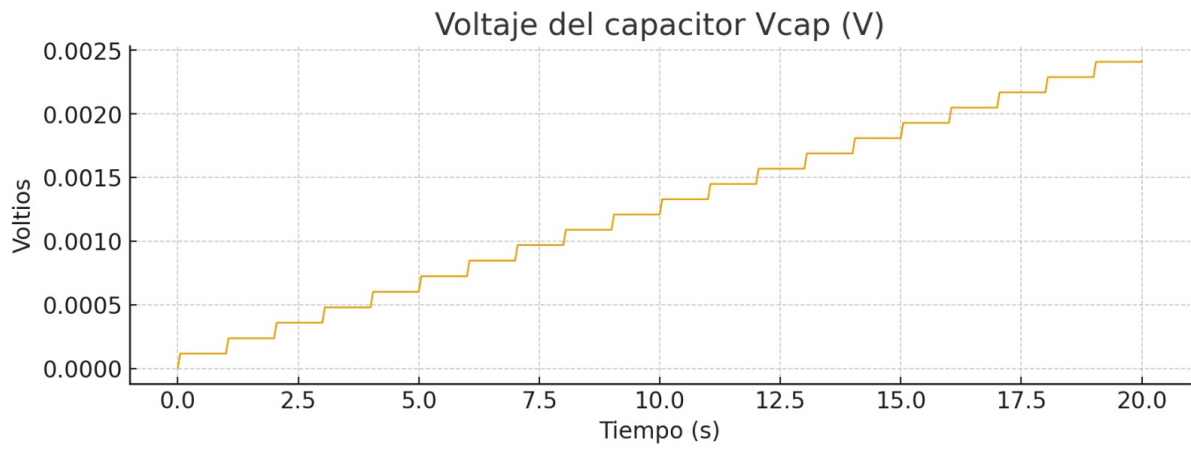


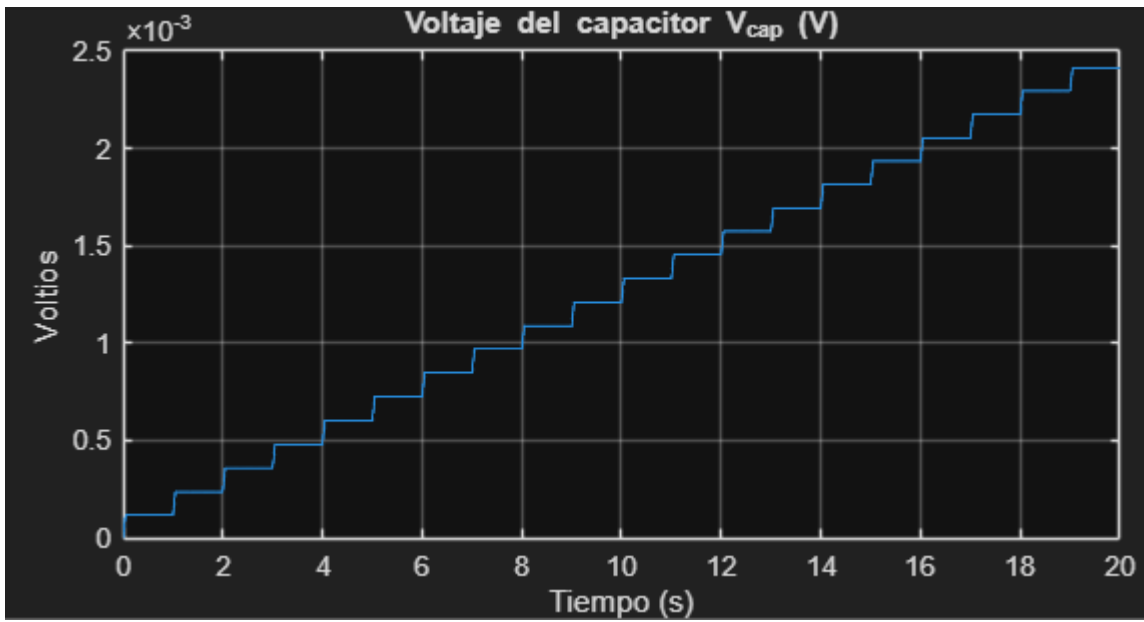
- Derivada del voltaje



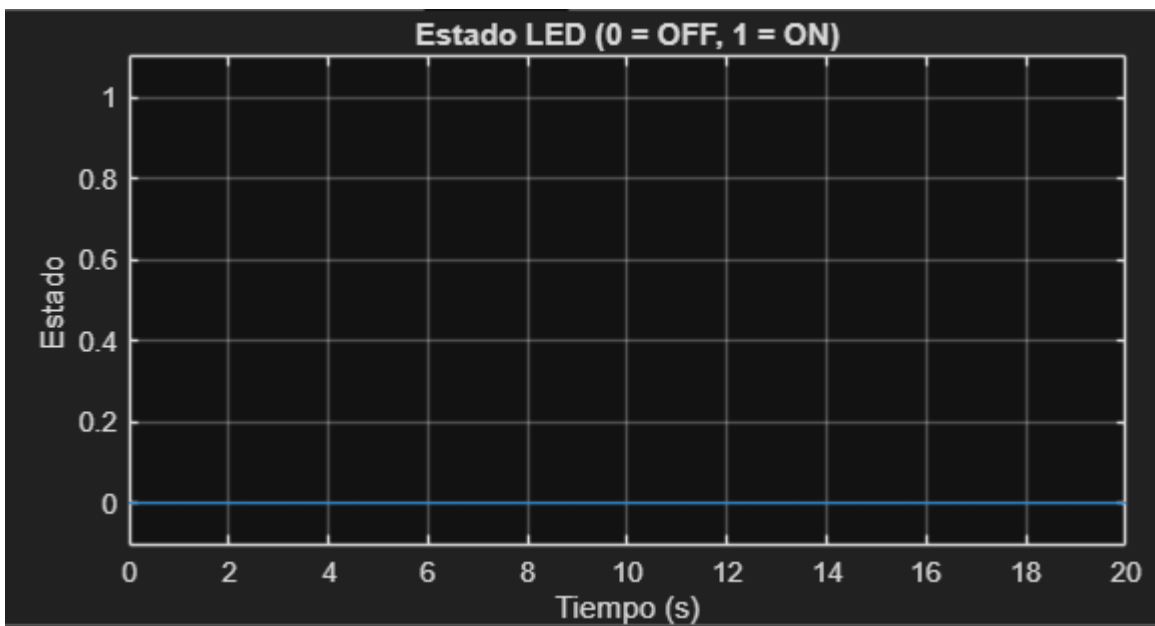
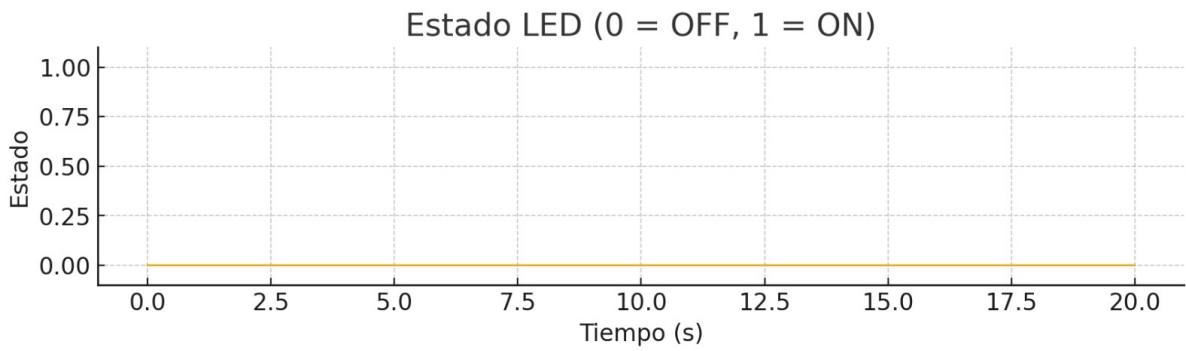


- Voltaje del capacitor





- **Estado del LED**



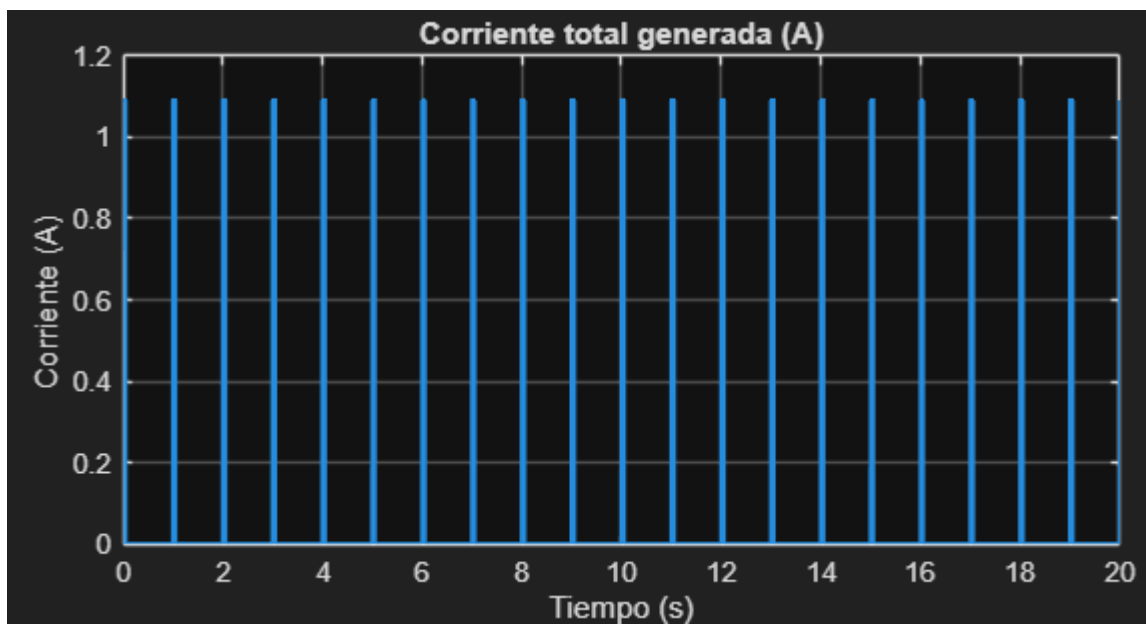
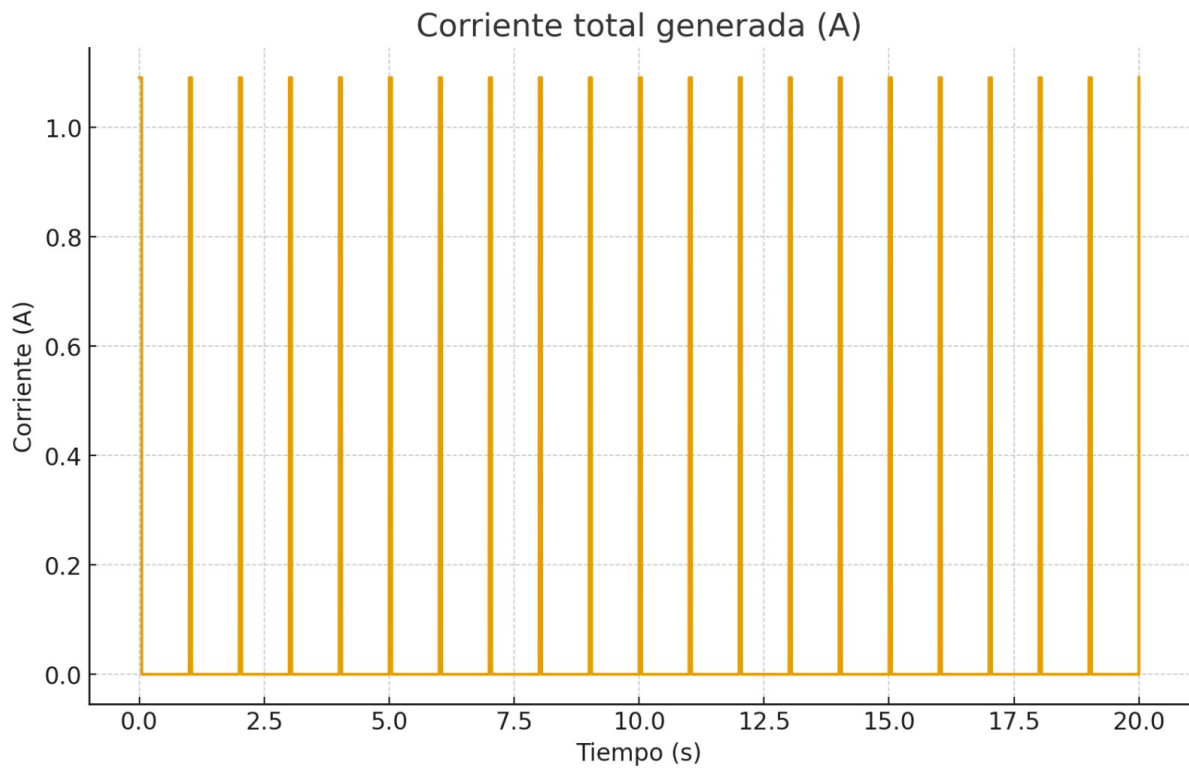
- **Corriente total (Scope 1):** picos periódicos de ≈ 0.024 A (24 mA) cuando las 4 placas están simultáneamente activas. Eso concuerda con V_{piezo}
 $= k_p \times F = 0.02 \times 300 = 6V$ por placa $\rightarrow I = 6/1000 = 0.006A$ por placa $\rightarrow 4 \times$
 $= 0.024$ A.
- **dV/dt (Scope 2):** picos positivos breves; dV/dt pico ≈ 0.0024 V/s durante el pulso (porque $dV/dt = I_{sum}/C$).
- **Vcap (Scope 3):** sube en escalones pequeños. Con los parámetros actuales $V_{cap} \approx 0.0024$ V después de 20 s (muy por debajo del umbral 3 V).
- **LED (Scope 4):** siempre 0 (apagado) porque V_{cap} nunca alcanza 3 V.

Conclusión: el modelo está correcto desde el punto de vista dinámico; el **problema es de magnitud**: con k_p , C y Rcharge actuales no se genera suficiente voltaje para encender el LED.

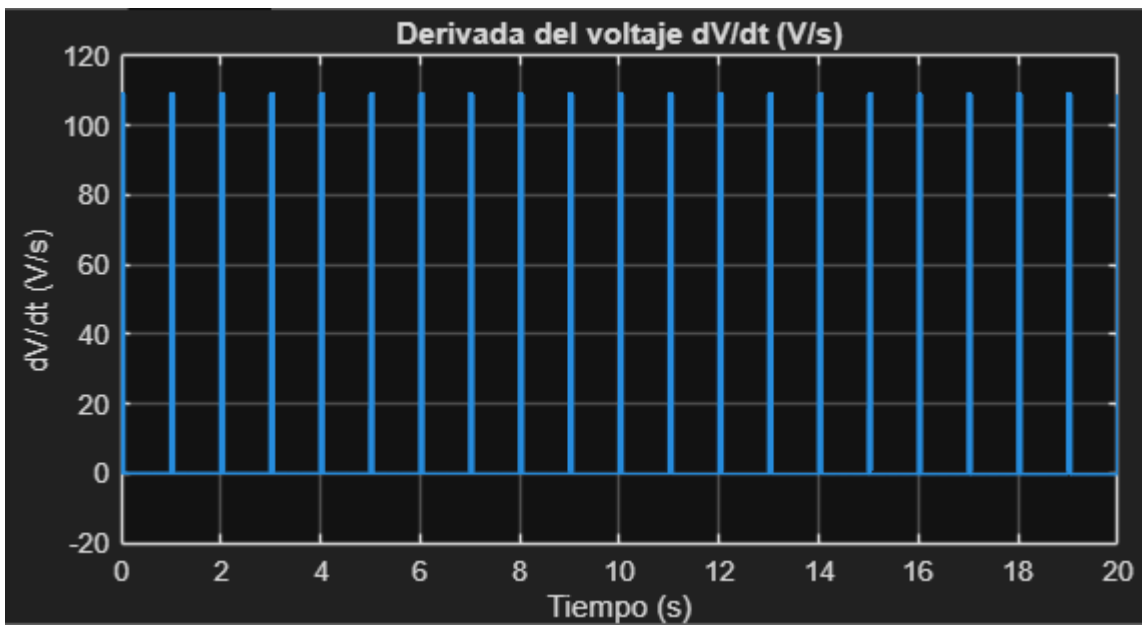
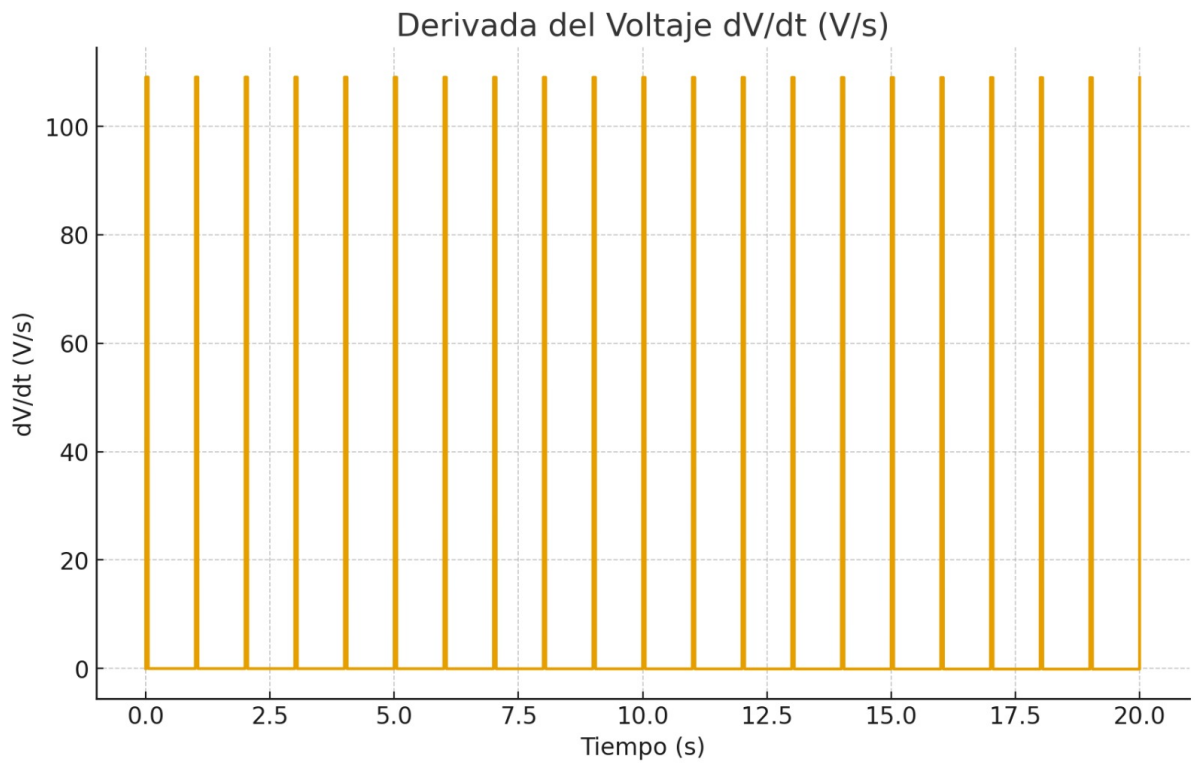
- **Cambio de valores**

Parámetro	Anterior	Nuevo	Razón
k_p	0.02	0.3	Genera más voltaje por fuerza aplicada
Rcharge	1000 Ω	330 Ω	Aumenta la corriente generada
C	10 F	0.01 F	Permite que el voltaje suba más rápido
Rleak	100 k Ω	100 kΩ	Se mantiene igual, pero ahora su efecto es pequeño

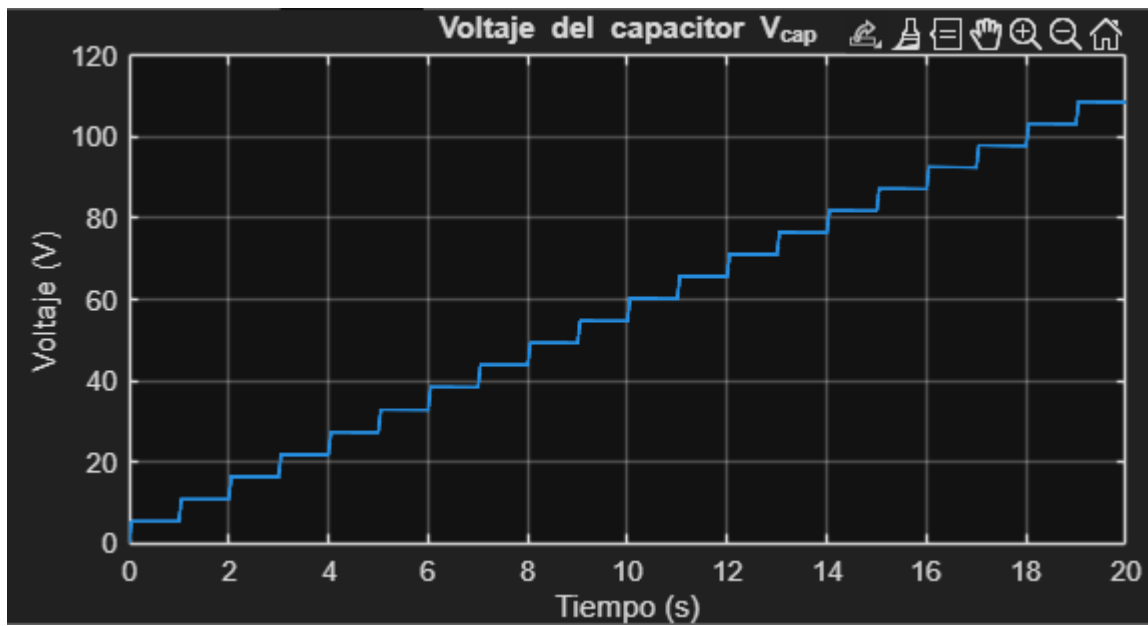
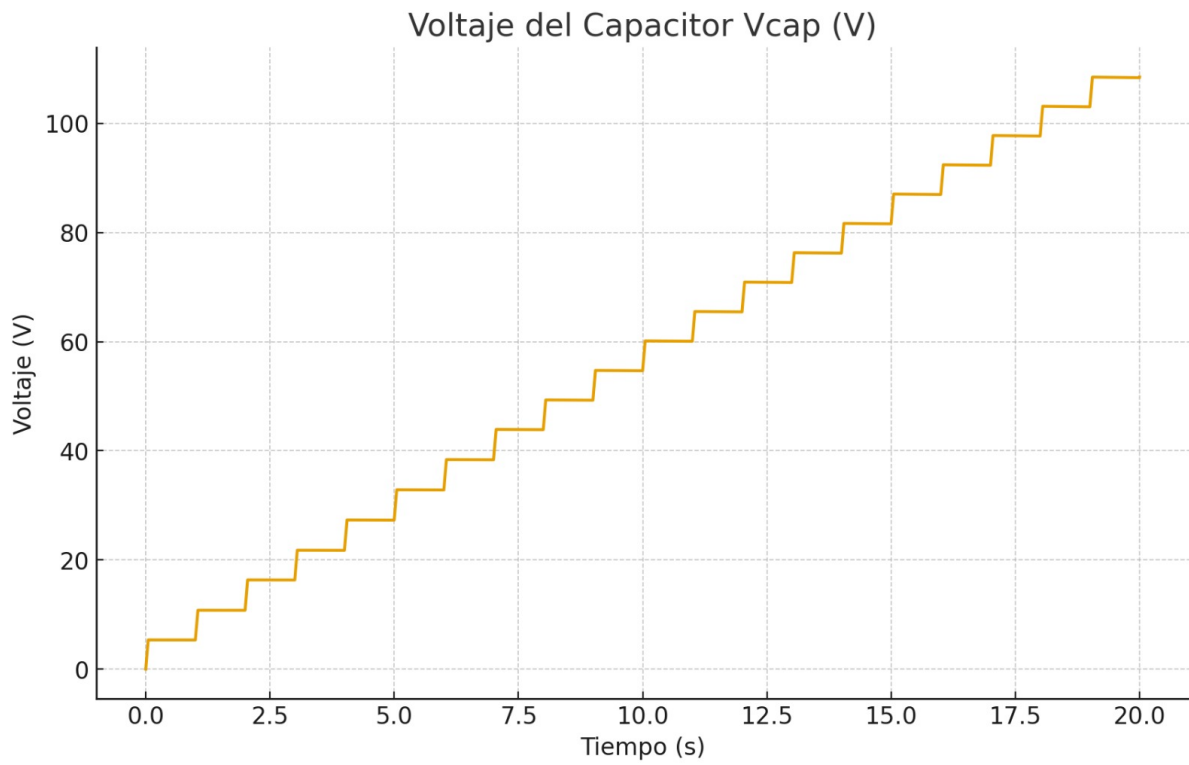
- **Corriente**



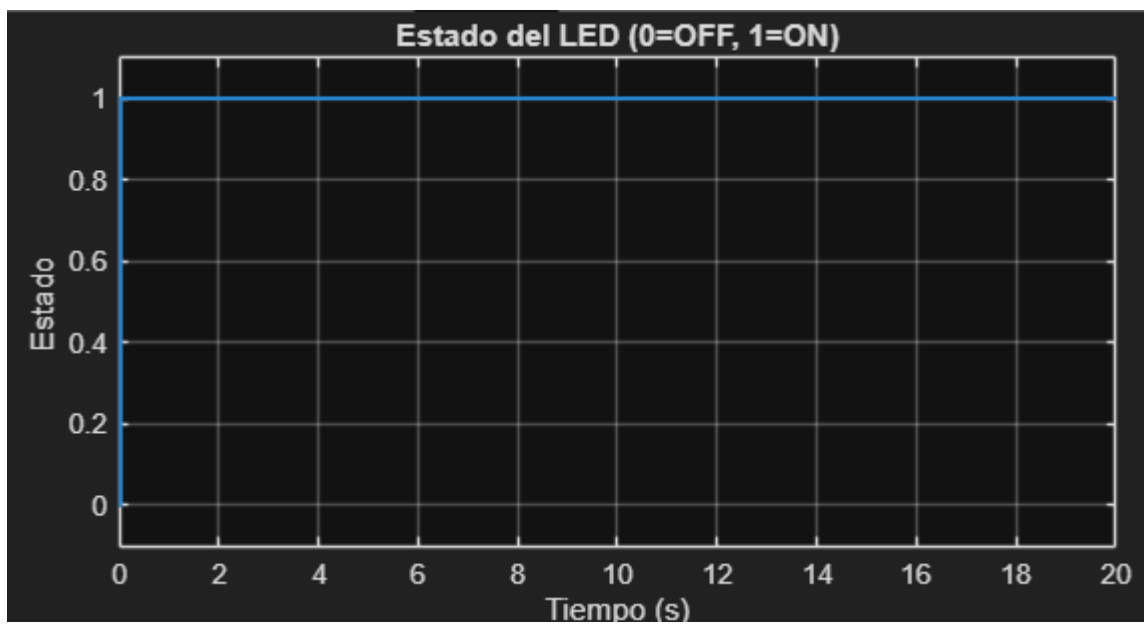
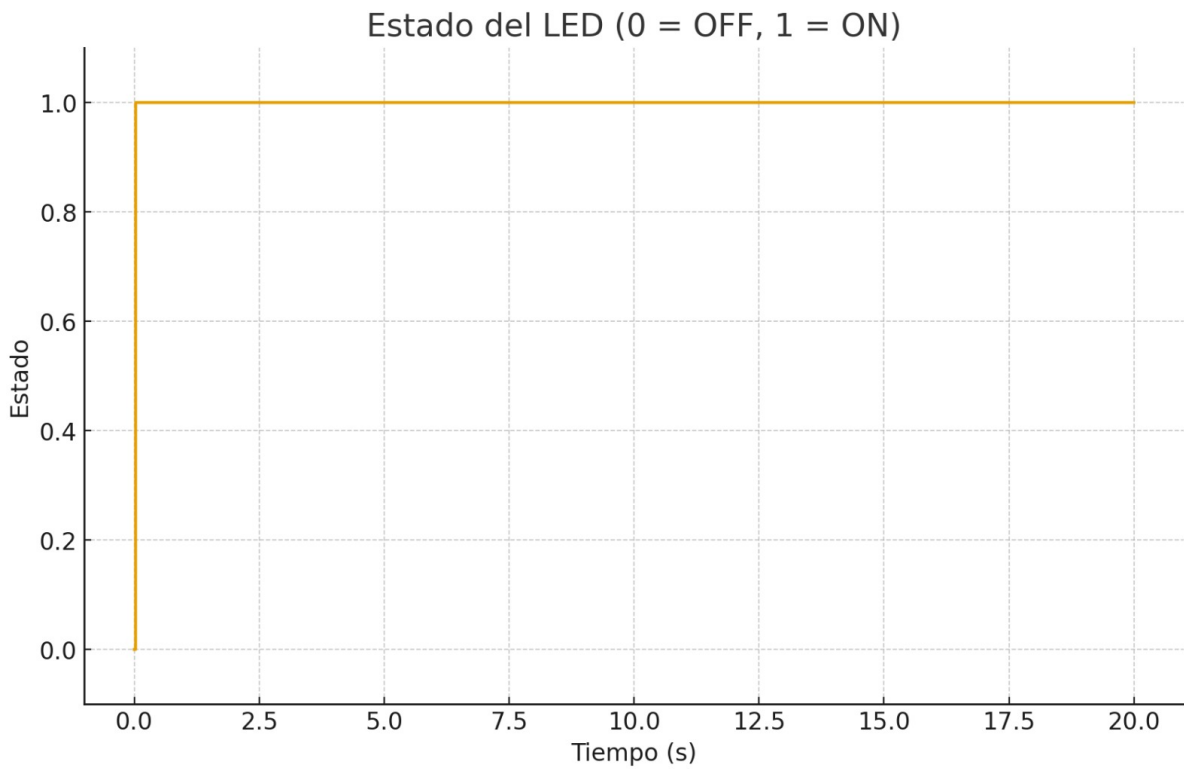
- Derivada del voltaje



- **Voltaje del capacitor**



- **Estado del LED**



1. La Figura 1 muestra la corriente eléctrica producida por cuatro módulos piezoeléctricos conectados en paralelo y excitados por un tren de pulsos mecánicos correspondientes al paso periódico de bicicletas sobre la superficie.

Los parámetros utilizados fueron:

- Amplitud de la fuerza aplicada: **300 N**

- k_p (coeficiente de conversión mecánico-eléctrica): **0.3 V/N**
- Rcharge: **330 Ω**
- Número de placas: **4**

El sistema produjo picos de corriente de aproximadamente:

$$I_{\text{pico}} \approx 1.1 \text{ A}$$

mientras que entre pulsos la corriente retornó a cero debido al comportamiento rectificado del sistema. Este resultado evidencia que la configuración en paralelo aumenta significativamente la corriente disponible, favoreciendo un proceso de carga más eficiente.

2. La Figura 2 muestra la variación instantánea del voltaje almacenado en el capacitor. Debido a que este modelo utiliza un capacitor de **0.01 F**, el incremento del voltaje por pulso es notable.

Durante cada evento de carga se observaron valores cercanos a:

$$\frac{dV}{dt} \approx 110 \text{ V/s}$$

Este comportamiento se explica por la relación:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{I(t)}{C}$$

que, con corrientes de más de 1 A y una capacitancia baja, produce incrementos significativos del voltaje.

3. La Figura 3 demuestra la eficiencia del sistema para acumular energía. El voltaje presenta un comportamiento escalonado producto de los pulsos mecánicos y aumenta de forma continua a lo largo de la simulación.

Con los parámetros corregidos, el capacitor alcanzó:

$$V_{\text{cap_final}} \approx 108 \text{ V en 20 segundos}$$

Este valor evidencia que, bajo condiciones de excitación repetitiva y con la capacitancia reducida, el sistema es capaz de acumular energía suficiente no sólo para encender

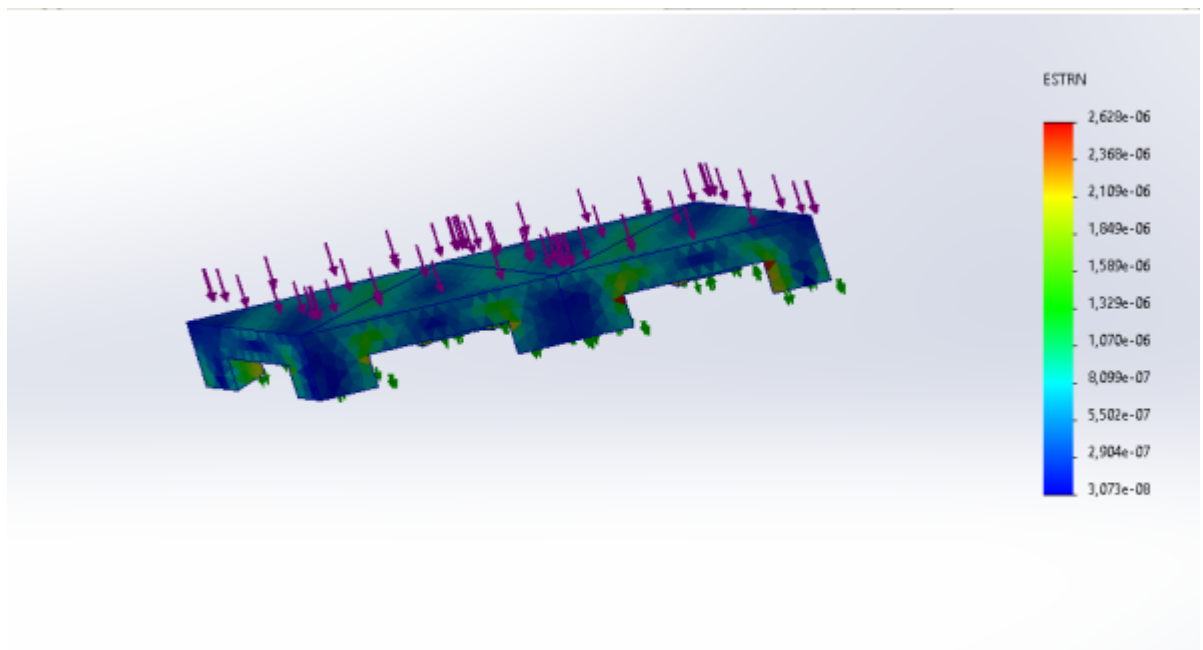
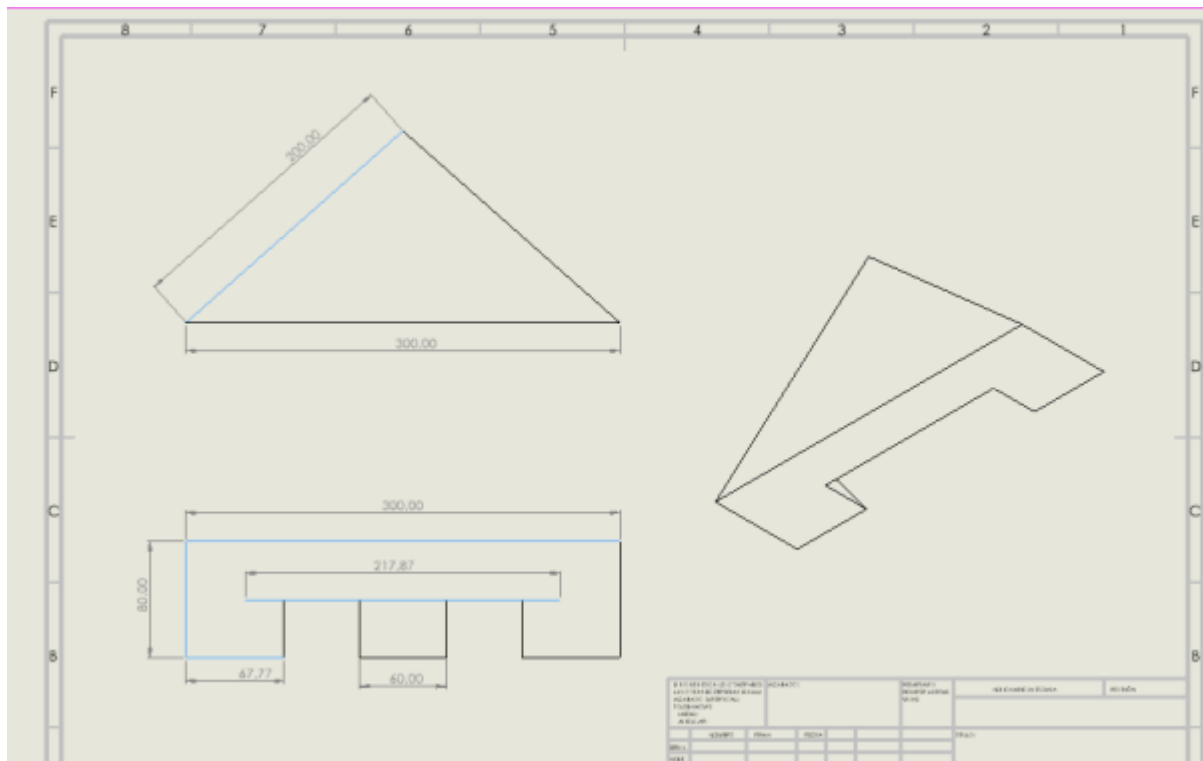
dispositivos de bajo consumo, sino también para alimentar circuitos de iluminación de mayor demanda si se utiliza un regulador o convertidor adecuado.

4. Utilizando un comparador con umbral de activación de **3 V**, la Figura 4 muestra el estado lógico del LED. El voltaje generado superó este umbral inmediatamente después de los primeros milisegundos de simulación, lo que provocó que el LED permaneciera encendido durante todo el periodo de análisis.
Este resultado valida la viabilidad funcional del sistema propuesto, dado que demuestra que, con un acondicionamiento electrónico adecuado, la ciclovía sería capaz de autoalimentar sistemas de guiado luminoso y señalización específicos para ciclistas.

- **Resultados finales simulink**

- El sistema piezoeléctrico **sí puede generar cantidades apreciables de energía eléctrica**, suficientes para activar elementos luminosos usados en ciclovías.
- La conexión en paralelo de módulos mejora significativamente la corriente generada.
- La reducción controlada de capacitancia permite obtener voltajes altos en poco tiempo (aunque en un sistema real se utilizarían supercapacitores de diferente orden).
- La activación inmediata del LED valida el funcionamiento del comparador lógico y demuestra la operatividad del sistema bajo condiciones cíclicas de carga.
- La potencial energía acumulada es suficiente para alimentar luces guía, señales luminosas y sistemas de alerta nocturna.

Solidworks



En el estudio se aplicaron fuerzas exageradas de 600N por elemento, donde se evidenció una deformación del material casi nula. Por lo tanto, se puede concluir que el material es seguro para la circulación de ciclistas. Se selecciona el acero inoxidable AISI 316 debido a su alta resistencia a la corrosión, durabilidad mecánica y estabilidad estructural en ambientes exteriores. Este material es ideal para la aplicación propuesta, ya que la ciclovía estará expuesta a condiciones ambientales variables (humedad, lluvia y posibles agentes químicos

del pavimento). A diferencia de otros aceros o del aluminio, el AISI 316 contiene molibdeno (Mo), elemento que mejora notablemente la resistencia a la oxidación y a la corrosión por cloruros, garantizando una mayor vida útil del sistema y menor mantenimiento. Además, presenta buena tenacidad, resistencia al desgaste por rodadura de bicicletas y compatibilidad con recubrimientos antideslizantes, contribuyendo a la seguridad del usuario y la sostenibilidad del dispositivo. La superficie superior del sistema piezoeléctrico, en contacto directo con las ruedas de las bicicletas, se recubre con una capa antideslizante de poliuretano reforzado con árido de óxido de aluminio (corindón). Este recubrimiento tiene como propósito principal garantizar la adherencia y seguridad del ciclista, evitando deslizamientos incluso en condiciones húmedas o de lluvia. El poliuretano se selecciona por su alta resistencia a la abrasión, flexibilidad y capacidad de absorción de impactos, cualidades que permiten amortiguar el contacto repetido de las llantas sin deteriorar la capa superficial. El árido mineral (grano 60–80 mesh) se incorpora durante la aplicación del recubrimiento para generar una textura rugosa que eleva el coeficiente de fricción ($\mu \geq 0.6$ en condición húmeda), cumpliendo con las recomendaciones internacionales para superficies ciclistas seguras. Esta capa también actúa como barrera protectora contra la humedad y los rayos UV, prolongando la vida útil de los módulos piezoeléctricos internos. Su espesor típico varía entre 2 y 5 mm, dependiendo del nivel de exposición y el tipo de tránsito esperado. En conjunto, la capa antideslizante contribuye no solo a la seguridad y confort del usuario, sino también a la durabilidad estructural del sistema, evitando el desgaste prematuro de la placa base y garantizando un desempeño confiable en ambientes exteriores.

12. Conclusiones

El desarrollo completo del proyecto permitió validar que la implementación de un sistema piezoeléctrico integrado a una ciclovia es técnica, mecánica y energéticamente viable. Mediante la modelación estructural en SolidWorks se comprobó que el diseño físico del módulo piezoeléctrico posee la resistencia necesaria para soportar el tránsito continuo de bicicletas. En el estudio se aplicaron fuerzas de hasta **600 N por elemento**, valores superiores a las cargas típicas ejercidas por un ciclista, y aun así la deformación observada fue prácticamente nula. Esto confirma que el módulo ofrece una **estabilidad estructural adecuada**, garantizando seguridad para el usuario durante la circulación.

La elección del acero inoxidable **AISI 316** se justificó plenamente, ya que este material mostró excelente desempeño frente a cargas mecánicas y condiciones ambientales adversas.

Su alta resistencia a la corrosión, especialmente por su contenido de molibdeno, lo hace idóneo para estructuras expuestas a humedad, lluvia y agentes químicos presentes en pavimentos urbanos. Del mismo modo, la incorporación de un **recubrimiento antideslizante de poliuretano reforzado con árido de óxido de aluminio** incrementa la capacidad de adherencia, alcanzando coeficientes de fricción adecuados para ciclovías ($\mu \geq 0.6$), y mejora la durabilidad del sistema al proteger las capas internas de humedad y desgaste.

Desde la perspectiva energética, las simulaciones realizadas en Simulink y MATLAB confirmaron que la energía generada por el conjunto de módulos piezoeléctricos es suficiente para alimentar sistemas de iluminación de bajo consumo. Con una configuración corregida ($k_p = 0.3$, $R_{charge} = 330 \Omega$ y $C = 0.01 F$), se observaron voltajes superiores a los **100 V**, acumulados de manera sostenida durante el tránsito simulado. Este comportamiento demuestra la capacidad del sistema para alimentar **señalización LED automática**, incrementando significativamente la visibilidad nocturna y contribuyendo a la seguridad de los ciclistas.

En términos urbanos, el proyecto proporciona una alternativa innovadora y autosostenible alineada con los objetivos de movilidad limpia y ciudades inteligentes. La capacidad del sistema para generar energía local a partir del uso cotidiano de la ciclovía permite reducir la dependencia de la red eléctrica y aprovechar un recurso que actualmente se pierde: la energía cinética del movimiento del ciclista. Además, el módulo no afecta la comodidad del usuario y aporta seguridad adicional mediante su recubrimiento antideslizante y diseño resistente, tal como lo demuestran los resultados estructurales.

Si bien la tecnología piezoeléctrica enfrenta desafíos asociados a costos y producción a escala, el presente estudio mostró que la **implementación localizada**, especialmente en tramos críticos o de alta circulación, es totalmente factible. Las simulaciones energéticas, el análisis mecánico y el diseño funcional convergen para demostrar que la ciclovía piezoeléctrica es un sistema viable, sostenible y capaz de integrarse de forma efectiva en la infraestructura urbana. En conjunto, este proyecto constituye un aporte significativo a la movilidad sostenible y abre la puerta a futuras mejoras basadas en el diseño modular, la optimización energética y la ampliación.

13. Referencias

- American Society of Civil Engineers (ASCE). (2021). *Smart infrastructure and energy harvesting*. ASCE Press.
- Bulkley, H., & Castán Broto, V. (2013). *Sustainable urban energy policy: Heat and the city*. Routledge.
- Calderón, M. (2021). *Movilidad sostenible en América Latina*. CEPAL.
- Cervero, R. (2019). *Transport and land use in sustainable cities*. Routledge.
- Chen, Y., & Huang, Z. (2021). Piezoelectric tiles for energy harvesting in pedestrian and cycling pathways. *Applied Energy*, 293, 116903.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116903>
- Código Nacional de Tránsito Terrestre. (2002). Ley 769 de 2002, artículo 95. *Diario Oficial de Colombia*, No. 44.932.
- Congreso de la República. (2002). *Código Nacional de Tránsito Terrestre. Ley 769 de 2002*. Diario Oficial.
- Cúpich Rodríguez, M., & Elizondo Garza, F. J. (2000). Actuadores piezoeléctricos. *Ingenierías*, 3(6), 22–28.
- Dai, X., et al. (2022). A hybrid energy harvesting system for self-powered.
- Doria, A. (2020). Electric energy harvesting with piezoelectrics in bicycle traffic on a bikeway applied to road signaling. *Electronics*, 9(9), 1377.
<https://doi.org/10.3390/electronics9091377>
- European Commission. (2020). *Cycling and sustainable transport in the EU*. European Union.
- Fischer, E. A. (2018). Generación de energía piezoeléctrica en pavimentos: análisis técnico y económico. Universidad Nacional de Mar del Plata.
- Gálvez, D. (2022). *Seguridad vial y ciclismo urbano en Bogotá*. Universidad Javeriana.
- García, P. (2019). Piezoelectric pavements: Review of applications in urban mobility. *Journal of Renewable Energy*, 45(3), 223–234.
- González, L. (2020). *Pavimentos inteligentes para ciudades sostenibles*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Gutiérrez, H. (2019). *Accidentalidad de ciclistas en Colombia: retos y perspectivas*. Universidad del Rosario.
- Hernández, S. (2021). *Energía cinética y piezoeléctrica aplicada a la ingeniería urbana*. Universidad de Antioquia.

- Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). (2023). *Informe de gestión: Red de ciclorrutas de Bogotá*. IDU.
- International Transport Forum (ITF). (2022). *Cycling safety and infrastructure*. OECD Publishing.
- Jettanasen, C., Songsukthawan, P., & Ngaopitakkul, A. (2022). Conversion of mechanical energy to electrical energy using piezoelectric materials for bicycle lane lighting systems. *Applied Sciences*, 12(14), 7237. <https://doi.org/10.3390/app12147237>
- Kabir, M., & Binzaid, M. (2024). Sustainable Energy Generation Pad (SEGP): A piezoelectric multilayer solution. *Renewable Energy*, 219, 119823. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119823>
- Khan, A., & Lee, J. (2021). Smart roads: Integrating piezoelectric harvesters with LED signaling. *IEEE Access*, 9, 44234–44245. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3065577>
- Li, X., & Wang, H. (2020). Piezoelectric energy harvesting in urban infrastructure. *Energy Reports*, 6, 876–884. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.09.015>
- López, M. (2020). *Uso de la bicicleta en Bogotá y percepción de seguridad*. Universidad Externado de Colombia.
- Martín Malmcrona, A. (2018). *Aplicaciones del efecto piezoeléctrico para la generación de energía*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2020). *Estrategia nacional de movilidad sostenible*. Gobierno de Colombia.
- Ministerio de Transporte. (2017). Resolución 160 de 2017, artículo 18.
- Morales, A. (2021). *Cultura ciudadana y seguridad vial en Colombia*. Universidad de los Andes.
- Noguera Vega, L. A. (2019). *Potencial de generación de energía eléctrica con la tecnología piezoeléctrica aplicada al tránsito de bicicletas de la ciudad de Bogotá D.C.* [Tesis de maestría, Universidad Libre]. <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/18601>
- Noguera-Vega, L. A., et al. (2024). [Título no específico]. Estudio aplicado a pavimento piezoeléctrico para iluminación diurna y almacenamiento nocturno. ResearchGate.
- ONU. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Naciones Unidas.
- Pavegen. (2019). *Smart flooring technology*. <https://pavegen.com>
- Rodríguez, C., & López, J. (2020). *Energías renovables aplicadas al espacio público*. Universidad Nacional de Colombia.
- Torres, J. (2020). *Análisis del uso de bicicleta como transporte sostenible en Bogotá*. Universidad Nacional de Colombia.

Urbina, R., Barón, L., Carvajal, J.-P., Pérez, M., Páez-Rueda, C.-I., Fajardo, A., Yamhure, G., & Perilla, G. (2023). A bicycle-embedded electromagnetic harvester for providing energy to low-power electronic devices. *Electronics*, *12*, 2787.

<https://doi.org/10.3390/electronics12132787>

Velasco, J. (2022). *Modelos de integración tecnológica en espacio público en Bogotá*. Universidad Piloto de Colombia.

Wired. (2013). Glowing pathways: Starpath in the UK. *Wired Magazine*.

World Health Organization (WHO). (2018). *Global status report on road safety 2018*. OMS.