

EL USO DE PIEZOELÉCTRICOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA SOSTENIBLE COMO PROYECTO PILOTO EN UN PERFIL VIAL DE BOGOTÁ.

Natalia Katherine Cardozo Gutiérrez, Diego Armando Tamayo Zapata
Programa de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia
Bogotá, Colombia
nkcardozo98@ucatolica.edu.co
datamayo76@ucatolica.edu.co

Resumen - La generación de energía sostenible, mediante la implementación de sistemas alternos y tecnológicos, se ha convertido en un tema de interés en la última década, puesto que son capaces de convertir sucesos cotidianos en herramientas funcionales para nuevos sistemas. Este artículo analiza las condiciones básicas necesarias para la implementación del sistema piezoeléctrico, en un perfil transversal piloto en la ciudad de Bogotá y con ello determinar la viabilidad de su instalación en la ciudad y el costo-beneficio que traería este sistema. También se analizaron y determinaron los posibles perfiles viales donde se puede implementar esta tecnología a lo largo de la ciudad de Bogotá.

Abstract - The generation of sustainable energy, through the implementation of alternative and technological systems, has become a topic of interest in the last decade, since they are able to turn everyday events into functional tools for new systems. This article analyzes the basic conditions necessary for the implementation of the piezoelectric system in a pilot cross-sectional profile in the city of Bogotá and with that to determine the feasibility of its installation in the city and the cost-benefit that would bring this system. We also analyzed and determined the possible road profiles where this technology can be implemented throughout the city of Bogotá.

Palabras claves - materiales piezoeléctricos, energía sostenible, vehículos, sección transversal.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente a nivel internacional se desarrollan diferentes proyectos que evalúan la producción de energías sostenibles, uno de estos es la implementación de sistemas piezoeléctricos en las vías, con lo cual se busca proteger el medio ambiente, conservando los recursos renovables como también los existentes y de esta manera mejorar la calidad de vida de los habitantes.

Para mitigar el impacto ambiental por el alto consumo energético se promueve la generación de energías limpias, sostenibles, al innovar y emplear sistemas tecnológicos, capaces de transformar el tránsito de la ciudad en un bien común, como lo es la producción de energía eléctrica que servirá tanto para iluminación, semaforización o como sistema de monitoreo de comportamiento de la vía.

Con este proyecto de investigación, se realizó el análisis de los elementos necesarios para la implementación del sistema piezoeléctrico en un perfil transversal vial en la ciudad de Bogotá, para ello se realizó la búsqueda de información del sistema y del proceso de instalación con su respectivo análisis característico, los impactos y beneficios en los aspectos ambientales, técnicos, y económicos, producto de la ejecución de los piezoeléctricos en experiencias internacionales.

Una vez analizado la información recolectada en las experiencias internacionales, se sacaron los datos relevantes que ayuden a determinar la zona en la cual se puede implementar este tipo de tecnologías en la ciudad, como paso a seguir se determinaron los tráficos promedios a los cuales están sometidos las intersecciones y a qué tipo de vehículos nos encontramos al transitar por estas.

Con la selección del perfil transversal vial piloto, se analizaron los impactos a los cuales se ve expuesta esta intersección antes de realizar la implementación de la tecnología piezoeléctrica, una vez se han determinado y analizado; se prosiguió a examinar los nuevos impactos producto de la implementación del sistema a los que se verá sometida esta intersección cuando empiece a producir energía para el alumbrado público de la zona de influencia del proyecto.

Posterior al análisis de los impactos del sistema, se determinaron las condiciones técnicas que debe cumplir el perfil transversal seleccionado, donde a partir de estas condiciones se establecieron los datos básicos del costo -

beneficio del sistema y los distintos lugares de la ciudad, en los cuales se podrá aplicar este tipo tecnologías que ayudaran a la disminución de los gases contaminantes y puede encaminar a la ciudad a una era de innovación y de progreso.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Antes de realizar la formulación del problema, debemos destacar el preocupante atraso en tecnología para la infraestructura vial y la falta de conciencia por cuidar el medio ambiente que tiene nuestro país, con respecto a los países desarrollados; por la ausencia de la implementación de nuevos sistemas capaces de mejorar los recursos existentes y generar nuevas fuentes de energía.

Bogotá es una de las ciudades que más personas alberga y también la que tiene mayor falencia con el tema de la innovación que permitan el sostenimiento ambiental en la ciudad en el futuro, en la actualidad Israel es uno de los países pioneros en investigación e implementación de nuevas tecnologías capaces de generar electricidad, con el paso de los vehículos mediante materiales piezoeléctricos y así generar energías renovables en pro del medio ambiente [1].

El artículo, tiene como fundamento aportar una alternativa ante la ausencia de uso de sistemas alternativos y tecnológicos futuros para las vías de Bogotá, que busquen la generación de energías limpias y sostenibles capaces de suplir las necesidades de iluminación de la misma vía y con esto contribuir a la protección del medio ambiente. Mediante el análisis de la viabilidad por medio de un perfil transversal vial.

III. ANÁLISIS DEL CONTEXTO

El escenario de los piezoeléctricos ha sido un tema recurrente en la búsqueda de la generación de energías sostenibles, lo cual ha venido siendo estudiado desde 1987 en adelante, en diferentes presentaciones de los cristales y con ellos varía su lugar de aplicación, donde sus aplicaciones son evaluadas mediante diferentes hipótesis siempre con el objetivo de recopilar y mejorar estudios anteriores, los cuales se convierten en una fuente esencial para la evaluación de puntos críticos de estos sistemas.

Es por esto, que haciendo un recorrido de los avances y desarrollos de esta tecnología se encuentra que su primera aplicación se da en los campo aeronáuticos, médicos, automovilísticos y posteriormente en el sector vial; avanzando en esta línea cronológica se encuentra que 13 años más tarde en base a esta tecnología se desarrolla un dispositivo capaz de abastecer de energía a radios y a diferentes equipos usados por expedicioncitas [2].

Fue en el 2006 cuando la empresa JR East empezó la primera fase y decidió emplear e instalar los piezoeléctricos en el piso de las registradoras de la estación Marunouchi del metro de Tokio, para el 2008 se llevó a cabo la segunda fase con la instalación del sistema en la estación de Yaesu de Tokio con la diferencia que en esta segunda fase se instalaron los dispositivos en las escaleras para obtener un mayor campo de acción [3].

Sobre el 2007 dos arquitectos del Massachusetts Institute of Technology, desarrollaron el sistema a un nivel superior donde para el funcionamiento del mismo se involucró a los peatones, mediante la creación de una loseta compuesta por piezoeléctricos para generar energía mecánica partiendo del principio básico de esta tecnología el cual se fundamenta en la frecuencia y peso, este fue uno de los primeros acercamientos reconocidos a nivel mundial puesto que esta idea innovadora gano el concurso de construcciones sostenibles promovido por Holcim en suiza en este mismo y se convirtió en el modelo base para la implementación [4].

El mayor desarrollo de esta tecnología en el ámbito civil se dio en el 2010, cuando la empresa Innovattech decidió explorar en la parte vial, con un sistema integrado por piezoeléctricos capaz de generar energía eléctrica por medio de la vibración que es producida por el paso de los vehículos sobre la carpeta asfáltica [1].

El tema sobre los materiales piezoeléctricos no solo ha sido tratado en documentos científicos en búsqueda de su aplicación, este sistema es parte de un debate actual, pues Durante el Congreso Mundial de Ingeniería 2012 (World Congress on Engineering – WEC) [5], se lleva a cabo en el Imperial College en Londres, Reino Unido del 04 al 06 de julio del mismo año; donde se tratan todo tipo de temas de ingeniería e informática; durante el WEC de este año se evaluaron y expusieron tres documentos investigativos relacionados a la generación de energía sostenible a partir de la implementación de material piezoeléctricos, dentro de estos se encuentra el artículo realizado por Sutrisno W. Ibrahim, and Wahied G. Ali “Power Enhancement for Piezoelectric Energy Harvester” [6], documento en el que se habla de la recolección de la energía generada mediante los dispositivos medidos en tiempo real mediante el uso de LabVIEW y Matlab y así tener una idea del modelo a trabajar, a raíz de esta investigación Sutrisno W. Ibrahim, and Wahied G. Ali concluyen que generación de energía mediante los piezoeléctricos tiene una potencia limitada y es por esto que se deben modificar los dispositivos microelectrónicos para mejorar el rendimiento, como también concluyeron que la trasferencia de potencia es directamente proporcional con el material del piezoeléctrico y sus propiedades.

De los últimos acontecimientos que se tiene registro sobre la tecnología a nivel de Latinoamérica, se halla en el 2012 cuando en la ciudad de Medellín se hace la instalación de este sistema en un tramo vial cerca de un centro comercial [7], esta

ciudad es el icono de desarrollo de la tecnología más cercano a Bogotá, puesto que su última invención se dio en el 2014 cuando decidieron instalar piezoeléctricos en la suela de los zapatos [8].

Se puede observar que empresas como JR East e Innowattech, dentro de sus investigaciones lograron determinar la cantidad de kW que les puede suministrar esta tecnología, mientras que JR Easten entre su fase 1 y 2 tuvo un incremento del más del 100% de la producción de energía esperada puesto que paso de producir 10 kW por día en su fase inicial, a 500 kW por día en la segunda etapa puesta en marcha en la estación de Yaesu y estiman que esta energía es capaz de encender un bombillo de 10W por 80 min[3]. Por otra parte se tiene a Innowattech quien está catalogada como una de empresas pioneras en la invocación con respecto a la tecnología, dentro de sus pruebas piloto obtuvieron como resultado que en un tramo de 1km se generaban aproximadamente 200 kW por hora donde estimaron que era energía suficiente para iluminar el tramo, con el condicional que durante de la hora de aforo deben pasar más de 600 autobuses o camiones para aprovechar la presión que ejercerán dichos vehículos [9].

Al comparar la producción de cada empresa, la cual se basa en un sistema instalado y lugar de ubicación diferente, pero que comparten el mismo principio básico de los piezoeléctricos, es aquí donde se evidencia la magnitud del desarrollo de la tecnología y como su presentación se convierte en un factor directamente proporcional con la eficiencia en la producción de la energía eléctrica.

IV. ANÁLISIS DE IMPLEMENTACIÓN EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ

Al analizar las diferentes implementaciones presentadas en el título III, tanto en su forma como en los resultados obtenidos del uso de la tecnología piezoeléctrica a nivel mundial y centrándonos en aquellas que involucran los vehículos, como herramienta principal del sistema, se extrajo que existen factores determinantes para que el sistema llegue a la eficiencia esperada, los cuales serán retomados para la elección del perfil transversal piloto, dentro de los cuales se encontraron los siguientes:

- Volumen de tráfico vehicular constante, aproximado de 600 vehículos pesados por hora [9].
- Tránsito de vehículos pesado.
- Aforo de número de vehículos, para conocer el volumen máximo.
- Ancho de la vía mayor a 22m.
- Condiciones para instalación.
- Costo de implementación.

La tecnología de Innowattech plantea que en una vía de 1 km carril de carretera se pueden producir 250KWh, este valor

fue obtenido con base en generadores están incrustados a lo largo de la vía en dos filas. Con un tránsito aprox. a 600 vehículos pesados por hora. Esta tecnología que se dispone debajo de la superficie del pavimento, consistiendo en unas pastas de plástico con almohadillas de producción de energía de Innowattech [9], estos elementos son instalados en los guardarruedas del carril en el que se desea realizar dicha implementación. El costo para 1 km de instalación está en US\$650.250, el anterior valor cubre la implementación del sistema en cuanto a los sistemas de recolección, almacenamiento, distribución y obra civil.

V. SELECCIÓN Y EVALUACION DE PERFIL TRANSVERSAL PILOTO

Para el desarrollo de esta investigación se planteó la selección de un perfil transversal piloto, en una de las principales vías de la ciudad de Bogotá, el cual sea capaz de cumplir con los requisitos básicos que solicita este tipo de tecnología con respecto a los volúmenes vehiculares y al tipo de vehículos que transita en dicha intersección.

Partiendo de esta necesidad, se inició la búsqueda de la información base de cada una de las arterias viales de la ciudad, por lo cual se tomó como base de información la Cartilla de Monitoreo Tránsito y Transporte Urbano del año 2014 del Secretaria de Movilidad [10], donde se encuentran analizados los datos tomados en campo sobre los parámetros de tránsito y transporte, mediante el uso de estudios de tránsito, donde se presenta el aforo de 36 estaciones aforadas durante las 24 horas del día, con la finalidad de poder determinar la variación del tránsito presente en cada uno de estos perfiles transversales.

Evaluando las posibles vías para la elección del perfil, partiendo de la información de tránsitos hallada en Cartilla de Monitoreo Tránsito y Transporte Urbano del año 2014, donde en asesoría externa del Ingeniero Pedro Sosa, especialista en Diseño de Vías urbanas, Tránsito y Transporte, se inició un proceso de análisis de las tablas resumen de las 36 estaciones de cada uno de los trimestres analizados en determinar la viabilidad de las 3 posibles vías mencionadas inicialmente o determinar la nueva vía según la información encontrada.

La intersección que se selecciono fue Avenida Carrera (AK) 72 con(X) Avenida calle(AC) 17, aunque no tiene el volumen mixto total mayor de las 4 estaciones se tomó criterio principal para la selección de este perfil el mayor porcentaje de camiones (%CAM), al comparar los valores registrados en la tabla 2, se observó que esta estación tiene valores superiores en el %CAM, con respecto a las demás intersecciones evaluadas; adicionalmente la intersección AK_72_X_AC_17, cumple con el criterio de vehículos livianos mayor al 44% (valores resaltados en color azul) del total de vehículos y siendo evaluada en cuanto al ancho del perfil vial es mayor al mínimo requerido por un perfil vial V4.



Fig. 1 Imagen de ubicación satelital del perfil transversal (mapa), escalada indeterminada. (Imagen extraída de: Google Maps) [11].

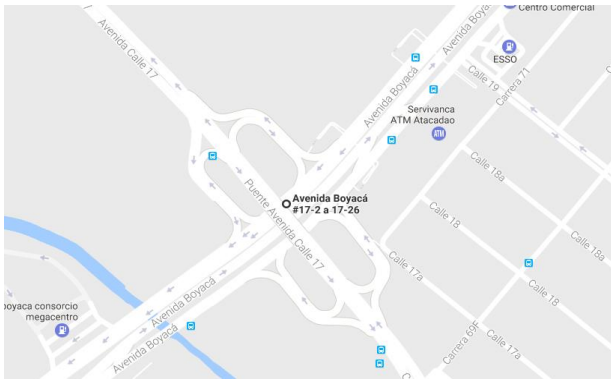


Fig. 2 Imagen de ubicación satelital de la intersección (tierra) escalada indeterminada. (Imagen extraída de: Google Maps) [12].

Este perfil cuenta con 4 accesos en diferentes sentidos (norte, sur, occidente y oriente), los cuales a su vez fueron clasificados en calzadas lentas y rápidas o de Transmilenio, donde estas últimas se identificaron con una B, según el código de accesos usado.

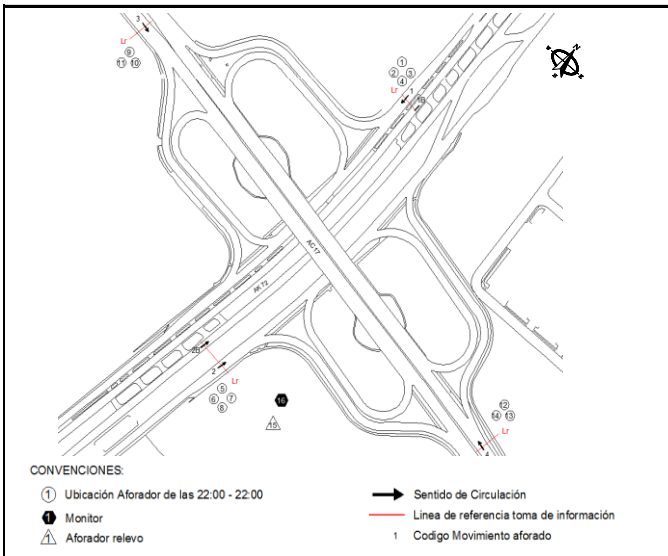


Fig. 3 Esquema de localización y movimientos. (Tomado de: Cartilla de Monitoreo Tránsito y Transporte Urbano del año 2014) [13].

Este perfil consta de una intersección entre la avenida carrera 72 conocida como la Av. Boyacá y con la Av. calle 17, ubicada en la zona sur occidental como lo muestra la figura 23 mapa de localización de estaciones; donde la Av. Boyacá permite tráfico vehicular mixto con dos calzada por cada uno de los sentidos (norte - sur), donde cada calzada está compuesta por dos carriles, identificados en la fig. 3 como movimientos de aforo 1, 1B, 2 y 2B usadas para tráfico mixto.

Por otra parte la Av. calle 17, consta de una calzada por cada uno de los sentidos (oriente - occidente), donde cada calzada está compuesta por dos carriles, y sirve para el tráfico vehicular mixto; los movimientos fueron identificados 3 y 4, como se observan en la fig. 3.



Fig. 4 Fotografía del acceso norte (Extraída por el autor del informe base de Cartilla de Monitoreo Tránsito y Transporte Urbano).



Fig. 5 Fotografía del acceso sur (Extraída por el autor del informe base de Cartilla de Monitoreo Tránsito y Transporte Urbano).

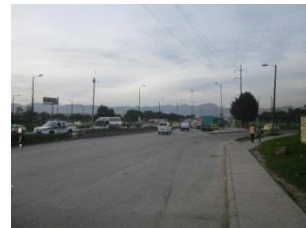


Fig. 6 Fotografía del acceso occidente (Extraída por el autor del informe base de Cartilla de Monitoreo Tránsito y Transporte Urbano).



Fig. 7 Fotografía del acceso oriente (Extraída por el autor del informe base de Cartilla de Monitoreo Tránsito y Transporte Urbano).

Se tomó como información base, el aforo ejecutado por la Unión Temporal Movilidad para la Cartilla de Monitoreo Tránsito y Transporte Urbano [10], realizado el día sábado 30 de agosto de 2014, el cual reflejó un volumen mixto total aforado de 273.010 vehículos, dicho volumen se compone por los aforos realizados en cada uno de sus 4 accesos, medidos con un intervalo de conteo de 15 minutos.

La intersección ya identificada como AK_72_X_AC_17, en el cual se evidencia el sentido evaluado (1, 1B, 2, 2B, 3 y 4) (Fig. 3), los 18 tipos de vehículos posibles que pueden pasar por la intersección, el cálculo de su factor de equivalencia y la observaciones relevantes que se presentaron en horas determinadas; la clasificación que se manejó para la identificación vehicular y los coeficientes de equivalencia están dados en la tabla I.

TABLA I
TIPOLOGÍA VEHICULAR Y FACTORES DE EQUIVALENCIA POR TIPO DE VEHÍCULO (ADAPTACIÓN DEL AUTOR)

Tipología Vehicular	Abreviación	Factor de equivalencia (FE)
Livianos	L	1
Colectivo (Pequeño y grande)	C	2
Buseta/ Busetón	BT	2
Buses (Corto y largo)	B	2
Alimentador	AL	2
Articulado	AT	2,5
Biarticulados	BA	2,5
Especial	ESP	2
Intermunicipal	INT	2
Camiones de dos ejes pequeños	C2P	2,5
Camiones de dos ejes grandes	C2G	2,5
Camiones de tres y cuatro ejes	C3-C4	2,5
Camiones de 5 ejes	C5	2,5
Camiones de más de 5 ejes	>C5	2,5
Motos	M	0,5
Bicicletas	BIC	0,3

TABLA II
VOLÚMENES HORARIOS DE MÁXIMA DEMANDA Y COMPOSICIÓN VEHICULAR POR GRUPO DE VEHÍCULOS PARA EL ACCESO OCCIDENTE EN LA CALZADA LENTA - 3, EXTRAÍDO DEL ANEXO 10 DIGITAL. (ADAPTACIÓN DEL AUTOR)

	L	TPC	TPM	ESP	INT	CAM	M	BIC	MIXTOS
TOTAL PERIODO DE TOMA	34.223	2.521	17	337	3.063	5.811	9.253	753	55.978
	61%	5%	0%	1%	5%	10%	17%	1%	100%
VHMD PERIODO 1	2.407	164	0	21	188	359	821	82	4.042
07:30-08:30	60%	4%	0%	1%	5%	9%	20%	2%	100%
VHMD PERIODO 2	1.928	123	1	35	183	374	610	56	3.310
12:30-13:30	58%	4%	0%	1%	6%	11%	18%	2%	100%
VHMD PERIODO 3	1.905	151	1	7	169	250	519	24	3.026
16:00-17:00	63%	5%	0%	0%	6%	8%	17%	1%	100%

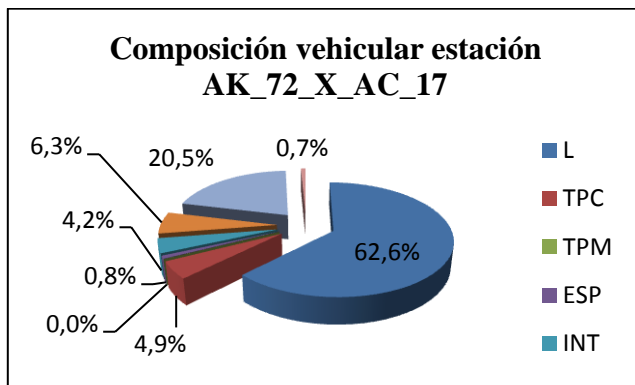


Fig. 8 Composición vehicular estación AK_72_X_AC_17. (Del autor)

A partir de la figura 8, se determinó que el 62,6% corresponde a vehículos livianos, el 20,5% a motos, el 9,9% a transporte público donde no se registró presencia de articulados y/o biarticulados, el 6,3% corresponde a camiones y el 0,7% a bicicletas. Adicionalmente se halló que las horas de mayor demanda están comprendidas entre las 7:30-08:30, 12:30-13:30 y 16:00-17:00 horas.

Para determinar cuál de sus 4 accesos, es más representativo para el perfil transversal en el total del volumen aforado, se realizó un análisis independiente de cada acceso a partir del aforo total, donde se compararon las horas de mayor demanda de cada uno.

De este análisis se logró inferir que el acceso occidente en la calzada lenta - 3 correspondiente a la Av. calle 17, es el más representativo de la intersección AK_72_X_AC_17, debido a que tuvo un volumen vehicular superior a los 3 accesos restantes, con un valor de 55.978 en un día de aforamiento, dicho acceso maneja el mayor porcentaje en vehículos pesados (camiones - CA) por un valor del 10% del total del volumen de la intersección, siendo este criterio un elemento fundamental para el desempeño del sistema, como se evidencia en la tabla II.

Sin embargo, no se debe desconocer ni olvidar el sentido Norte - Sur, donde el acceso sur en la calzada rápida - 2B, tiene el mayor porcentaje de vehículos livianos de toda la intersección en todos los sentidos por un valor de 69% equivalente a 34.895 vehículos del total afora en dicho acceso el cual fue 50.587 vehículos mixtos.

Como ya se había mencionado se identificaron 3 rangos de horas de mayor demanda donde cada una corresponde a un rango de tiempo aproximando donde aumenta el nivel de actividad que se presenta en la ciudad de Bogotá, estos picos de horarios que representan una mayor tráfico son fundamentales para sacar el máximo provecho de la tecnología piezoeléctrica.

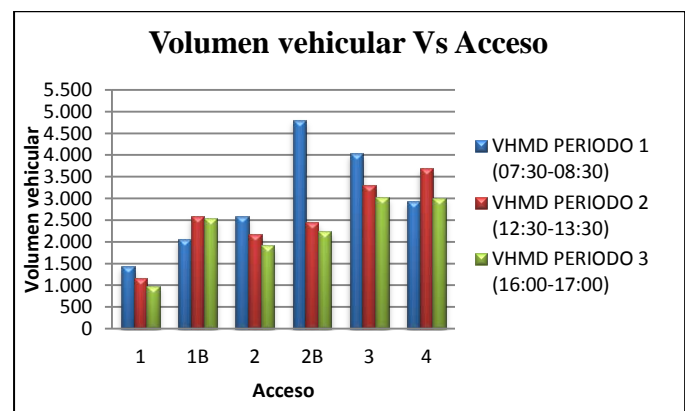


Fig. 9 Volumen vehicular Vs Acceso (Del autor)

En la fig. 9, se estableció que cada periodo tiene un acceso en donde presenta un mayor volumen vehicular, para este caso se identificó que es así:

- Período 1 - acceso 2B
- Período 2 - acceso 4
- Período 3 - acceso 3

Adicionalmente, se observó que el período de mayor tráfico vehicular mixto, corresponde al período 1 con un rango de tiempo entre las 07:30-08:30, donde se obtuvo un volumen de 17.865 vehículos mixtos en tan solo esa hora de aforamiento, de los cuales el 59% corresponde a vehículos livianos, el 25% a motos, el 6% a camiones, el 9% a transporte público y el 1% a bicicletas.

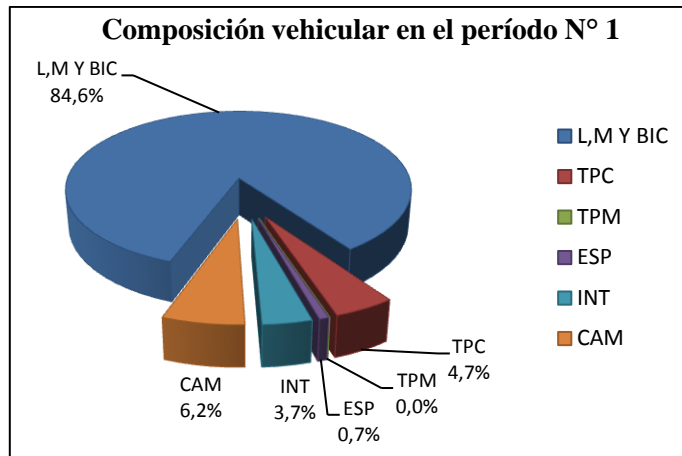


Fig. 10 Gráfica composición vehicular - Período 1. (Adaptación del autor)

VI. BENEFICIOS DE LA IMPLEMENTACIÓN

Colombia ha presentado grandes atrasos a nivel mundial en cuanto a la innovación e investigación de nuevas fuentes de energía, por ello que en la ciudad de Bogotá el gobierno distrital mediante el plan de desarrollo 2016 – 2020 adopto como eje de trabajo la sostenibilidad ambiental basada en el eficiencia energética. El anterior eje de trabajo está orientado a diseñar una ciudad compacta y con bajos consumos de energía, estas acciones están encaminadas a la recuperación de la calidad del ambiente y a la reducción de las emisiones de CO2.

Con la implementación de los sensores piezoeléctricos en la intersección de la Av. Boyacá con Av. calle 17 se busca obtener una reducción del consumo de energía en el alumbrado de la zona, sin disminuir el confort y la seguridad vial. Con este perfil de prueba Bogotá podrá entrar en un ciclo de innovación el cual ayudara a dar cumplimiento al plan de desarrollo propuesto por el gobierno distrital.

En estos momentos Bogotá está trabajando por mejorar la calidad y ampliar la cobertura del alumbrado público, mediante la modernización de la estructura actual con la aplicación de nuevas tecnologías hacia establecer el uso de las energías renovables en el alumbrado público distrital.

El abastecimiento de energía eléctrica por medio de los sensores piezoeléctricos no solamente reduce el consumo, si no el costo del alumbrado público de manera gradual, es decir entre más alta sea la tasa de innovación en energías renovables

se podrían generar grandes ahorros a los presupuestos destinados para este tipo de servicios públicos.

Durante épocas de apagones por fallas naturales o humanas esta alternativa basada en la implementación de piezoeléctricos puede constituir un sistema auto sostenible, el cual proporcionara fluido eléctrico gracias al almacenamiento que se realiza por medio de las baterías que realizan la recolección de la energía producida en esta caso por la vibración generada por los vehículos en las áreas aferentes en las cuales se encuentren instalados los sensores piezoeléctricos.

VII. COSTO DE IMPLEMENTACIÓN Y PROYECCIÓN EN BOGOTÁ

En la intersección de la Av. Boyacá con Av. Calle 17 se realizara la instalación de los elementos piezoeléctricos a lo largo de 10 metros en cada carril, los cuales contarán con su sistema de almacenamiento y distribución al alumbrado público de la zona de injerencia, a continuación se encuentran los detalles de instalaciones en cada uno de las calzadas de la Avenida Calle 17 y de la Avenida Boyacá respectivamente.

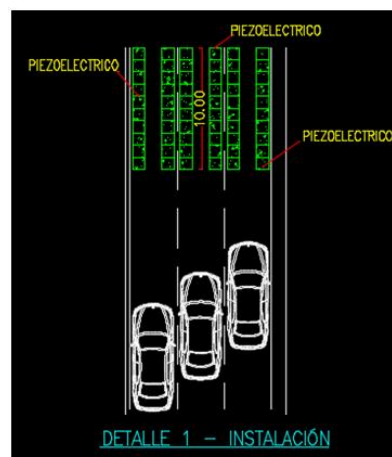


Fig. 11 Detalle de instalación Avenida Calle 17 por calzada. (Del autor)

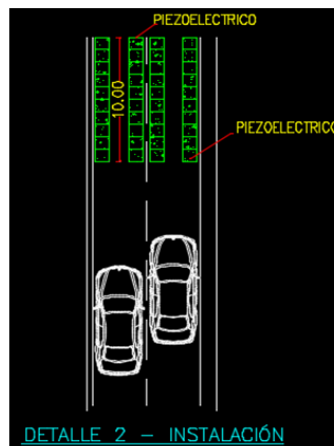


Fig. 12 Detalle de instalación Avenida Boyacá por calzada (Del autor)

La tecnología de Innowattech plantea que en una vía de un (1) km carril de carretera se pueden producir 250KWh, este valor fue obtenido con base en generadores están incrustados a lo largo de la vía en dos filas. Con un tránsito aproximado a 600 vehículos pesados por hora. Esta tecnología que se dispone debajo de la superficie del pavimento, consiste en unos elementos llamados pastas de plástico con almohadillas de producción de energía de Innowattech [9].

Por lo tanto deducimos que si para 1 km (mil metros) tendremos una generación de 250 kWh, para 10 m (diez metros) obtendremos una generación de 2.5kWh.

$$1000 m \rightarrow 250 kWh$$

$$10m \rightarrow 2500 Wh$$

Este proyecto generará 2,5 kWh por carril de aplicación, es por ello que a lo largo de la sección transversal de la Avenida Boyacá y la Avenida Calle 17 contaremos con una generación de 60 kW día por carril.

$$2.5 kWh \rightarrow 1 hora$$

$$60 kWh \rightarrow 24 hora$$

En los perfiles seleccionados contamos con 6 carriles en la sección transversal de la Avenida Calle 17 y en la Avenida Boyacá contamos con 8 carriles para un total de 14 carriles y una generación de 840 kW por día.

$$60 kW día \rightarrow 1 Carril$$

$$840 kW día \rightarrow 14 Carriles$$

Durante la investigación realizada se encontró que la aplicación en 1 km tiene un valor de US\$650.250 (seiscientos cincuenta mil doscientos cincuenta dólares), por lo tanto para una longitud de 10 metros el costo de implementación por carril será de US\$6.502,50 (seis mil quinientos dos con cincuenta) por carril.

$$1000 m \rightarrow US\$ 650.250$$

$$10m \rightarrow US\$6.502,50$$

Para los 14 carriles el proyecto tendrá un costo de US\$91.035 (noventa y un mil treinta y cinco dólares), este costo solo involucra la implementación de la tecnología con sus respectivos puntos de recolección, almacenamiento y distribución a los postes de alumbrado público.

El presupuesto de la obra civil se encuentra a continuación y los precios bases fueron obtenidos por el listado de precios IDU [13].

TABLA III
ANÁLISIS EN UNIDAD DE m², OBRA CIVIL. (DEL AUTOR)

Cód.	Nombre	Unid	Precio Unitario	Cant	Precio Total
3007	Replanteo general	m ²	\$531	1,00	\$531
3811	Corte de pavimento	m	\$1.477	4,00	\$5.908
3754	Fresado pavimento asfáltico - Profundidad de Fresado 0 - 18 cm. (Incluye Cargue)	m ³	\$51.315	0,18	\$9.237
3017	Transporte y disposición final de escombros en sitio autorizado (distancia de transporte 21 Km). A distancia mayor del acarreo libre (90 m) en sitio autorizado por la entidad Ambiental competente.	m ³	\$20.306	0,23	\$4.569
4197	Riego de liga con emulsión modificada con polímeros CRR-1m (Suministro, Barrido Superficie y Riego)	m ²	\$1.870	2,00	\$3.740
4198	Riego de liga con emulsión modificada con polímeros CRR-2m (Suministro, Barrido Superficie y Riego)	m ²	\$2.070	2,00	\$4.140
4200	Mezcla asfáltica en caliente tipo denso md20 asfalto convencional (Suministro, Extendido, Nivelación y Compactación)	m ³	\$476.432	0,08	\$38.115
4203	Mezcla asfáltica en caliente tipo denso md10 asfalto convencional (Suministro, Extendido, Nivelación y Compactación)	m ³	\$491.096	0,10	\$49.110
Ejecución por m²					\$115.349

Ejecutar la obra civil para la implementación del sistema piezoeléctrico en el perfil piloto seleccionado tiene un valor de \$115.349 (Ciento quince mil trescientos cuarenta y nueve pesos m/cte.) por m².

TABLA IV
VALOR OBRA CIVIL EN EL PERFIL VIAL PILOTO. (DEL AUTOR)

Análisis m ² Avenida Calle 17			
Longitud	Ancho	Valor por m ²	Valor Total
10	26,4	\$115.349	\$30.452.059,44
Análisis m ² Avenida Boyacá			
Longitud	Ancho	Valor por m ²	Valor Total
10	26,8	\$115.349	\$30.913.454,28
Valor total obra civil			\$61.365.513,72

El valor de la obra civil para la implementación del sistema piezoeléctrico en el perfil piloto que comprende la intersección de la Avenida Boyacá y la Avenida Calle 17 tendrá un costo de \$61.365.513,72 (Sesenta y un millones trescientos sesenta y cinco mil quinientos trece pesos m/cte.).

TABLA V

VALOR DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PIEZOELÉCTRICA EN EL PERFIL VIAL PILOTO. (DEL AUTOR)

Valor total obra civil	\$61.365.513,72	
Valor total sistema piezoeléctrico	\$261.452.520,00	\$US 91.035
Valor total implementación del sistema	\$322.818.033,72	

Realizar la implementación del sistema piezoeléctrico en el perfil piloto tendrá un valor de \$322.818.033,72 (Trescientos veinte dos millones ochocientos diez ocho mil treinta y tres pesos m/cte.).

TABLA VI

VALOR POR M² DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PIEZOELÉCTRICA EN EL PERFIL VIAL PILOTO. (DEL AUTOR)

Valor total implementación del sistema por m²	\$606.800,82
---	---------------------

Realizar la implementación del sistema piezoeléctrico en el perfil piloto tendrá un valor de \$606.800 (seiscientos seis mil ochocientos pesos m/cte.) por m².

TABLA VII

VALOR ENERGÍA PRODUCIDA POR LA TECNOLOGÍA. (DEL AUTOR)

Valor energía producida por la tecnología		
Energía Generada por día	Valor kW (Alumbrado público)	Valor de la energía producida
840 kW	\$228,00 [14]	\$191.520,00

El sistema a instalar en el perfil piloto en la ciudad de Bogotá tendrá la capacidad de generar alrededor de 840 kW, los cuales representan un valor de \$191.520 (ciento noventa y un mil quinientos veinte pesos) por día.

TABLA VIII

RETORNO DE LA INVERSIÓN. (DEL AUTOR)

Valor total implementación del sistema	\$322.818.033,72
Valor energía producida por la tecnología	\$191.520,00
Retorno de la inversión	1686 días

Una vez el sistema piezoeléctrico entre en funcionamiento y su producción diaria este alrededor de 840 kW día, el proyecto respecto a un cálculo inicial básico no financiero, tendría un tiempo de retorno de la inversión realizada en 1686 días, los cuales equivalen a 4 años, 8 meses y 16 días.

Con la determinación de las características del perfil vial y el valor de la aplicación de la tecnología, se determinó que esta tecnología se puede aplicar en 3 perfiles viales en la ciudad de Bogotá, tomando como criterio el ancho y con una longitud constante de 10m, medida usada para el perfil transversal piloto; para la estimación aproximada de los costos

de los perfiles de la proyección, como se presenta en la tabla IX.

TABLA IX

VALOR DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PIEZOELÉCTRICA EN PERFILES DE LA PROYECCION

Nodo y zona	Intersección	Ancho (m)	Análisis m ²	Valor Total
26213 - Z 2	AK_68_X_AC_26	34,12	Avenida Calle 26	\$207.040.438,17
		35,68	Avenida Carrera 68	\$216.506.530,89
32883 - Z 4	AK_68_X_AC_9	26	Avenida de las Américas	\$157.768.211,97
		22,4	Avenida Carrera 68	\$135.923.382,62
75264 - Z 4	AK_30_X_AC_53	14,2	Avenida Calle 53	\$86.165.715,77
		35,06	Avenida NQS	\$212.744.365,83

VIII. IMPACTO AMBIENTAL

Durante el tiempo destinado se generaran impactos sobre el tráfico diario en esta zona de la ciudad ya que se deben realizar intervenciones sobre la carpeta existente y que actualmente se encuentra en funcionamiento, una vez efectuada esta intervención se realizara la implementación de los paneles piezoeléctricos.

Finalizada la instalación del sistema piezoeléctrico se ejecutara la instalación del sistema de almacenamiento y distribución el cual permitirá la conexión con los elementos funcionaran con la energía producida por la tecnología.

Con la energía piezoeléctrica se inicia un nuevo ciclo de generación el cual aprovechara una energía hasta ahora desperdiciada, este sistema no utilizara ningún espacio público adicional, ya que se integra a la infraestructura reduciendo la posibilidad de robos o daños en el sistema implementado. El sistema convierte la energía mecánica a eléctrica la puede después de ser almacenada, debido a lo anterior se genera electricidad siendo esta una solución energética para el país.

Al realizar una comparación de la tecnología que involucra los piezoeléctricos con las demás tecnologías de producción de energía renovable como la solar y la eólica, la de los piezoeléctricos sobresale, ya que se estima que los costos de implementación y la recuperación de la inversión son menores, otra de las grandes ventajas con la que cuenta esta tecnología es que se puede implementar en cualquier zona siempre esta cumpla con unos requisitos mínimos de tráfico de vehículos, sin que sea limitada por el clima o la zona geográfica como si lo hacen las demás tecnologías como la solar y la eólica.

En cuanto a la estabilidad de la estructura del pavimento esta no se verá afectada ya que el sistema no influye sobre la calidad y la estabilidad de la estructura granular, es decir que

cada vez que se realice el mantenimiento periódico de la estructura se realizaran por temas de desgaste o por fallas localizadas, en cuanto al mantenimiento del sistema se realizara cada 30 años ya que esta es la vida útil proyectada por el fabricante de los paneles.

La energía producida por el sistema piezoeléctrico en la avenida Boyacá no cuenta con ningún componente biológico en su proceso de obtención, es gracias a esto que se puede contribuir con la reducción de CO2 y otros gases en la atmosfera, y de esta manera ayudar a reducir el cambio climático. A diferencia de las energías convencionales las cuales agotables ya que su captación se realiza por medio de los recursos naturales, las energías producidas por este sistema son de carácter inagotable siendo esta una ventaja y una ayuda a preservar los recursos naturales.

El anterior análisis se desarrolló mediante la identificación de los impactos socioeconómicos, los cuales hacen parte de las necesidades básicas sociales de los habitantes de la zona de injerencia del proyecto, con lo anterior se determinó el impacto territorial y socioeconómico, determinando que el proyecto tendrá un impacto positivo gracias a la contribución al medio ambiente y a la generación de energías renovables.

IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se estableció que los sistemas piezoeléctricos son un sistema eficiente y amigable con el ambiente y el entorno donde sea instalado, siendo fuentes de energías alternativas y sostenibles, con una múltiple opción en su forma e instalación. Evaluando los posibles impactos de la implementación de este sistema en la ciudad de Bogotá, se estableció que no genera daño para la zona de su implementación, pero si beneficios como la reducción del consumo de energía en el alumbrado de la zona, garantizando un mejor servicio tanto para los peatones como para el tránsito vehicular; este sistema también puede ser usado como un dispositivo de monitorio de la vía en tiempo real.

Con base a los estudios realizados por diferentes empresas a nivel mundial, se logró determinar que dentro de los factores esenciales para el buen funcionamiento de la tecnología, se encuentra el alto tráfico de vehículos pesado complementado con un volumen mixto vehicular, capaz de garantizar un paso constante por el punto donde se han sido instalado los piezoeléctricos y con ello la generación de la energía mecánica que posteriormente será energía eléctrica. Otro de los factores determinantes es el ancho de la vía donde se instalara el sistema, manteniendo una relación directamente proporcional donde a mayor ancho disponible, mayor paso vehicular y por ende mayor generación de energía eléctrica.

A través del análisis realizado a los posibles puntos de ubicación del perfil transversal piloto, se seleccionó la intersección identificada como AK_72_X_AC_17, ubicada

entre la Av. Boyacá y la Av. calle 17, tomando como criterio principal el porcentaje de camiones (%CAM) que pasan por esta intersección según el aforo realizado por la Secretaria de Movilidad en el año 2014, donde se halló que de 4 posibles estaciones evaluadas por sus altos volúmenes mixtos de vehículos, esta intersección es superior en los valores registrados para el paso de vehículos pesados (camiones), componente vital en el éxito de sistema piezoeléctrico.

De este perfil transversal piloto, se comparó y analizo los datos de aforo realizados el día 30 de agosto de 2014 por Secretaria de Movilidad, para sus 4 accesos, categorizando los vehículos según su tipología lo cual abarco desde vehículos liviano hasta las bicicletas que transitaron por cada acceso, de este estudio se concluyó que dicha intersección presenta 3 periodos de máxima demanda los cuales son: periodo 1 (07:30-08:30), periodo 2 (12:30-13:30) y periodo 3 (16:00-17:00), donde el periodo 1 es el más representativo presentando un volumen mixto vehicular total de 17.865 como se observa en las tablas 10 y 11.

De acuerdo a los volúmenes encontrados esta intersección en un día de observación tiene un volumen total 273.010 vehículos mixtos de los cuales el 6% corresponde a camiones, equivalente 17.152 vehículos y el 63% corresponde a vehículos livianos, equivalente a 170.869 vehículos; con base a estas cifras se evidencio la importancia no solo de los vehículos pesado, sino también de un alto tráfico de vehículos livianos capaces de contribuir a la eficiencia del sistema piezoeléctrico, el cual se rige primordialmente por una alta demanda vehicular en la zona donde sea instalado.

La composición vehicular de cada acceso, fue analizada y evaluada dando como resultado que el acceso occidental en su calzada lenta identificado en esta investigación con el número 3, aporta el mayor volumen vehicular a la intersección con el paso de 55.978 vehículos mixtos, en las 24 horas de conteo (aforo).

Del anterior estudio, se realizó la clasificación de los perfiles, mediante una diagramación aproximada de sus dimensiones, arrojando como resultado que tanto la Av. Boyacá como la Av. calle 17 son perfiles con un ancho total superior al exigido por un perfil V-4, por tanto el perfil vial de la Av. Calle 17 fue clasificado como un V-3A o V-3B por tener un ancho total mayor a 31 m, y el Perfil vial Av. Boyacá fue clasificado como un tipo V-1A o V-1B por tener un ancho total mayor a 60 m. Es importante resaltar que esta clasificación se basa en el ancho total del perfil y se realizó con el objetivo de evaluar el área disponible para la instalación del sistema piezoeléctrico.

En la búsqueda de dar respuesta al objetivo de este documento, se determinó que este perfil transversal piloto si es viable para implementación del sistema piezoeléctrico en la ciudad de Bogotá, esto con base a los datos obtenidos de los aforos realizados al perfil seleccionado, debido a que cumple

con los requisitos analizados de las implementaciones ya hechas a nivel mundial; es de aclarar que este concepto se hace en referencia a los volúmenes determinados en el año 2014, por ello se recomienda para su fase de implementación hacer una actualización de los aforos, donde seguramente los volúmenes serán mayor a los analizados en este documentos corroborando el viabilidad de la instalación de este sistema alternativo para la generación de energías sostenibles.

Por otra parte, se recomienda realizar planes de manejo de tráfico adecuados para la intervención civil a la cual se verán expuestos los perfiles en los que se desea realizar la implementación de la tecnología piezoeléctrica, como también realizar una adecuada señalización que ayude a prevenir accidentes de tránsito que involucren los trabajos realizados.

Para el proceso de instalación se aconseja que los paneles piezoeléctricos se instalen por debajo de la carpeta asfáltica, su ubicación se debe realizar en los guardas ruedas, es decir que los paneles se deben realizar a las esquinas de carril para garantizar que el paso de los vehículos generen vibraciones en los paneles instalados, con la finalidad de preservar el material piezoeléctrico el mayor tiempo posible; teniendo en cuenta que su vida útil es de 30 años durante este tiempo no necesitan ningún tipo de mantenimiento, se recomienda realizar un mantenimiento preventivo a la estructura del pavimento para conservar la integridad de los elementos instalados.

La implementación del sistema piezoeléctrico incluyendo la obra civil tiene un costo de valor de \$606.800 (seiscientos seis mil ochocientos pesos) por m², con este valor se realizó la proyección en tres intersecciones viales en la ciudad las cuales cumplen con las condiciones mínimas para la implementación de este sistema. Los valores que se tomaron para realizar la proyección del valor por m² están actualizados al año 2016, por lo tanto se deben ejecutar las proyecciones necesarias que reflejen el valor real a los años posteriores a la redacción de este documento.

REFERENCIAS

- [1] Innowattech. (27 de 10 de 2016). *Innowattech*. Obtenido de www.innowattech.co.il
- [2] Electric, S. (28 de 10 de 2016). *Scheider Electric*. Obtenido de Scheider Electric:http://www.controlservices.com/documents/andover_continuum_catalogue.pdf
- [3] East, J. (4 de 11 de 2016). *JR East*. Obtenido de JR East: <http://www.jreast.co.jp/e/development/press/20080111.pdf>
- [4] Graham, T. J. (3 de 11 de 2016). *Documents*. Obtenido de Documents.mx: <http://documents.mx/documents/footstep-electricity-ppt.html>
- [5] International Association of Engineer. (04 - 06 de 07 de 2012). *IAENG*. Obtenido de <http://www.iaeng.org/publication/WCE2012/>
- [6] Sutrisno W. Ibrahim, a. W. (2012). *Power Enhancement for Piezoelectric Energy Harvester*. London, U.K: Proceedings of the World Congress on Engineering 2012 Vol II.
- [7] Medellín, R. N. (27 de 10 de 2016). *RutaN Medellín*. Obtenido de RutaN Medellín: <http://rutanmedellin.org/es/actualidad/item/treevolt-sensores-que-generan-energia>
- [8] Orozco, E. S. (2014). *Diseño de un Colector de Energía Piezoeléctrico (Energy Harvesting) Mediante Optimización Topológica que Maximice la Transformación de Energía Mecánica en Eléctrica Generada por un Ser Humano al Caminar*. Medellín, Colombia. Obtenido de <http://www.bdigital.unal.edu.co/47308/1/1128267719.2015.pdf>
- [9] Dr. Lucy, E. (2010). *Innowattech: Harvesting Energy and Data*. Obtenido de https://www.iroads.co.il/sites/default/files/mtsgt_1_innowattech_presentation_lucy_edery-azulay.pdf
- [10] Secretaria de Movilidad. (2004). *Cartilla de monitoreo tránsito y transporte urbano*. Bogotá
- [11] Google Maps. (s.f.). *Google Maps*. Obtenido de <https://www.google.com.co/maps/@4.6489938,-74.1263217,759m/data=!3m1!1e3>
- [12] Google Maps. (s.f.). *Google Maps*. Obtenido de <https://www.google.com.co/maps/@4.6489938,-74.1263217,759m/data=!3m1!1e3>
- [13] IDU, I. D. (12 de 04 de 2016). IDU. Obtenido de <http://app.idu.gov.co/geodata/IntenasMain/referencia.html>
- [14] Energía, M. d. (2007). *Alumbrado Público Exterior*. Bogotá: UPME