



Movilidad y piezoelectricidad: un estudio de la línea 2 del tren eléctrico de Guadalajara, México

Mobility and piezoelectricity: a study of line 2 of the fast train of Guadalajara, Mexico

Arturo Arizaga Barragán¹
Mario Guadalupe González Pérez²

Para citar: Arizaga, A., y González, M. (2018). Movilidad y piezoelectricidad: un estudio de la línea 2 del tren eléctrico de Guadalajara, México. *Redes de Ingeniería*, 9(2), 51-62, doi: <https://doi.org/10.14483/2248762X.14658>.

Recibido: 18-marzo-2019 / **Aprobado:** 9-mayo-2019

Resumen

El Tren eléctrico de Guadalajara aporta en las horas de mayor demanda una gran cantidad de materia y energía proveniente del peso de los usuarios. Esta energía puede ser reutilizada para alimentar parte de su movilidad cotidiana. El objetivo de este estudio consiste en comparar el ahorro económico que experimentaría la línea 2 del tren eléctrico utilizando piezoelectricidad. Para ello, se revisan las bases de datos proporcionadas por el Sistema de Tren Eléctrico Urbano y la Comisión Federal de Electricidad; asimismo, a través de información recopilada *in situ* y la implementación de una metodología experimental utilizada previamente por la Academia de Ciencias de Morelos en México, se obtiene que el uso de sistemas piezoeléctricos puede lograr autogeneración de energía proveniente del peso de usuarios. Este escenario implica no solo beneficios económicos para la empresa, sino la posibilidad de utilizar innovaciones tecnológicas que promueven alternativas de sustentabilidad energética.

Palabras clave: energía, movilidad, piezoelectricidad, sustentabilidad, tren eléctrico.

Abstract

The fast train of Guadalajara contributes in the rush hours with a great quantity of matter and energy coming from the weight of the users. This energy can be reused to feed part of the daily mobility. The aim of this study compares the economic savings that line 2 of the fast train would experience using piezoelectricity. In this sense, the databases provided by the Urban Electric Train System and the Federal Electricity Commission are reviewed. In addition, through the information collected *in situ* and the implementation of an experimental methodology previously used by the Academy of Sciences of Morelos in Mexico, it is obtained that the use of piezoelectric systems can achieve self-generation of energy from the weight of the users. This scenario implies not only savings for the company, but also the possibility of using technological innovations that promote energy sustainability alternatives.

Keywords: electric train, energy, mobility, piezoelectricity, sustainability.

1. Ingeniero en Energía, Universidad de Guadalajara, México. Correo electrónico: ar-tur28@hotmail.com

1. Doctor en Ciudad, Territorio y Sustentabilidad, Universidad de Guadalajara, México. Correo electrónico: inge_unied@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

En México solo tres ciudades cuentan con sistemas de transporte eléctrico-urbano: el Sistema de Transporte Colectivo Metro de la Ciudad de México y sus trenes ligeros, el Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey de la ciudad de Monterrey y el Sistema de Tren Eléctrico Urbano de Guadalajara (SITEUR). En 2018, el Metro transportó 1,647 millones 475 mil 013 usuarios diariamente, y se estima que consumió 786 millones 772 mil 431 kilowatts de energía al día [1]. Por su parte, mientras Metrorrey, a través de sus dos líneas transportaba un promedio diario de 309 mil 270 pasajeros en el cuarto trimestre de 2008 [2]; SITEUR servía a más de 240 mil pasajeros diariamente; es decir, un 17 % de la población de esa ciudad [3]. No obstante, dicha cifra ha ido incrementándose gradualmente hasta en un 10,7 % en estos últimos años, debido al crecimiento poblacional que sufre anualmente la metrópoli; tan solo en el 2017, según datos del Instituto de Información Estadística y Geografía del Estado de Jalisco (IIEG), la población llegó a más de 5 millones de habitantes [4].

Una particularidad del sistema eléctrico en Monterrey, respecto a los sistemas de la Ciudad de México y Guadalajara, tiene que ver con la forma de generar su energía. En 2006, Metrorrey convenía con la compañía Bioenergía-Nuevo León (BENLESA) el suministro y compra de energía eléctrica limpia, mediante biogás a partir de la descomposición controlada de residuos orgánicos confinados en rellenos sanitarios ubicados en las periferias de la metrópoli. Este plan evitaría la emisión del 68 m³/s de metano y dióxido de carbono a la atmósfera y un ahorro anual de más de 738 mil dólares americanos [5].

En el caso de Guadalajara, el tren eléctrico es uno de los medios de transporte público más utilizado por la población de la metrópoli; incluso, uno de los medios de transporte más sustentables ambientalmente. De hecho, parte de la energía utilizada

proviene de una fuente eólica ubicada en el municipio de Ojuelos, Jalisco; el parque cuenta con 28 aerogeneradores con capacidad de 1,8 MW cada uno, y producción total de 50,4 MW, dando un estimado anual de producción de energía eléctrica de 170 GWh [6]. El SITEUR se estructura por dos líneas: a) Línea 1 que corre de norte a sur con diecinueve estaciones y 15.5 km de longitud y b) Línea 2 que corre de oriente a poniente con diez estaciones y 8.5 km de longitud. Ambas líneas cuentan con un subsistema de generación de energía eléctrica que ayuda a hacer eficiente todo el sistema. Esta energía es generada por los vagones al momento del frenado y es inyectada nuevamente al sistema, para ser aprovechada por el siguiente tren [7]. En este sentido, las figuras 1 y 2 muestran la estructura y demanda en cada una de las estaciones de las dos líneas del SITEUR. En el año 2016 por ejemplo, la Línea 1 movilizaba un total de 115 mil 392 usuarios diarios, mientras que en la Línea 2 otorgaba servicio a una media de 83 mil 59 [8].

Ciertamente, algunos sistemas de electrificación para trenes eléctricos de corriente continua (CC) están implementados en los puntos de alimentación dentro de las subestaciones. Igualmente, aquí se ubican el equipo rectificador necesario, así como en algunos transformadores o reductores. Las tensiones reglamentarias para su uso en corriente continua o directa para sistemas de transporte eléctrico ferroviario van desde los 0,75 kV; la cual es utilizada principalmente en tranvías, trenes eléctricos o metros; 1,5 kV y 3,0 kV. Este último normalmente es utilizado en trenes de mayor dimensión [11].

La capacidad para generar energía piezoeléctrica se remonta hacia finales del siglo XIX, a través de los experimentos de los hermanos Curie [12]. Paulatinamente, estos avances y desarrollos tecnológicos encuentran sus primeras aplicaciones en los campos de la aeronáutica, medicina, automovilismo y sector vial [13]. Asimismo, la

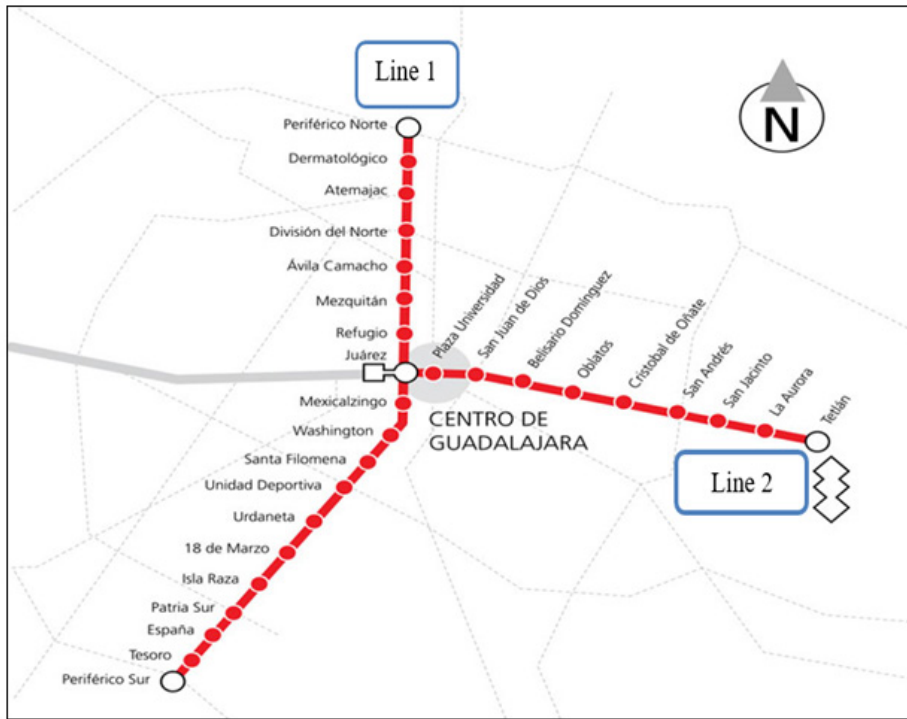


Figura 1. Localización de las líneas 1 y 2 del tren eléctrico.

Fuente: [9].

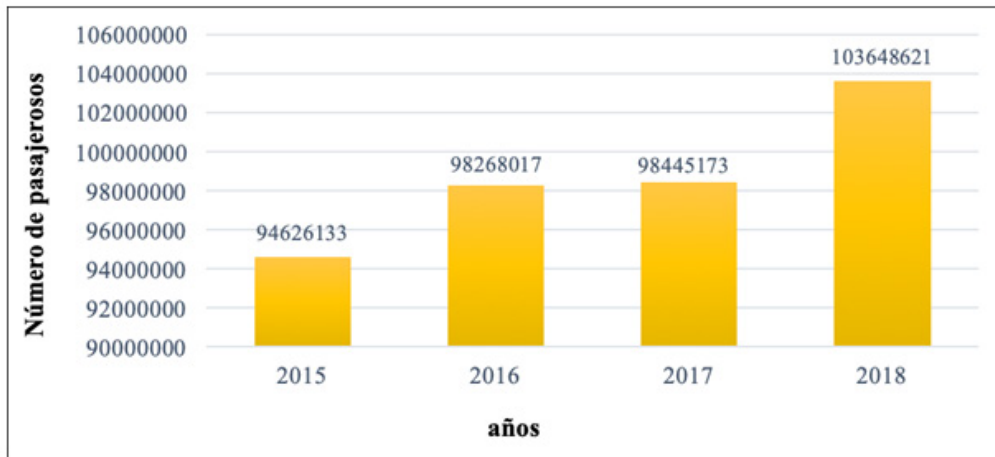


Figura 2. Pasajeros transportados por SITEUR 2015-2018.

Fuente: [10].

implementación y funcionamiento de estos sistemas a gran escala es posible identificarla en el Metro de Japón, donde han sido instalados por la empresa *Fast Japan Railway* en torniquetes, puertas de entrada al Metro y escaleras, dando un total de 25 m² y generando tan solo con la presión

de las pisadas de los usuarios un aproximado de 1400 kW por día [14]. No obstante, desde la década de los noventa diversos autores han venido proponiendo prototipos piezolétricos. Umeda, Nakamura y Ueha por ejemplo, desarrollaron un modelo piezoeléctrico que permitía transformar

la energía originada por el impacto mecánico en energía eléctrica [15]; Kymissis, Kendall, Paradiso y Gershenfeld examinaron las propiedades de la cerámica para proporcionar energía [16]. De igual forma, Nazar, Thanakodi, Miskon, Ishak, Nor e Isa, realizaron un modelado de un sistema piezoeléctrico en una estación de tren. Según estos autores, cuando el área de la placa piezoeléctrica se reduce e incrementa su espesor de mayor voltaje y se produce salida de corriente [17]. Por otro lado, Jedol Dayou, Man-Sang, Dalimin y Wang han discutido el uso de material piezoeléctrico para generar electricidad que pueda ser almacenada en una batería recargable para usos posteriores [18].

En el caso de México, el Centro Universitario México de la Academia de Ciencia de Morelos, A.C. (AcMor), realizó un proyecto experimental de una plataforma con discos piezoeléctricos, donde en un área de 0,012 m², se logró generar un aproximado de entre 10 a 16 V con una corriente de 100 μ A (microamperios). Estos datos se obtienen de la presión que ejerce una persona de un peso de 70 kg sobre los discos piezoeléctricos. De tal forma, que si en un día, 300 personas con ese pesaje pasaran sobre esa plataforma, se podría llegar a producir un voltaje de aproximadamente 3000 V y 0,3 dA (deciamperio) [19].

MÉTODOS

Se revisaron datos proporcionados por SITEUR y la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Asimismo, se realizó un estudio de campo, a través de un conteo manual in situ y obtener una cantidad promedio de usuarios que entran en un carro del tren eléctrico durante las horas de mayor demanda; es decir, se consideró el peso promedio total de personas dentro de un carro de tren ligero, que abordaron la línea 2 en estos horarios, y desde la estación Juárez (poniente) a la estación Tetlán (oriente), tal y como se muestra en la Figura 3. Este conteo permitió comparar el máximo peso de los usuarios respecto al consumo de energía eléctrica al momento de mover las unidades.

En este contexto, se utilizaron datos del consumo eléctrico durante el año 2017, mediante la revisión de la cantidad de energía diaria, semanal y mensual que consume el tren eléctrico en el momento de la tracción, los precios de las tarifas de alta tensión operados por la CFE y la demanda energética regional, sobre la distribución eléctrica que alimenta las líneas del tren eléctrico. Para ello, se consideró la cantidad máxima de personas por carro que hacen uso del sistema desde a las 6:30 horas hasta las 20:20 horas en la Línea 2 del SITEUR; es decir, 235 usuarios.

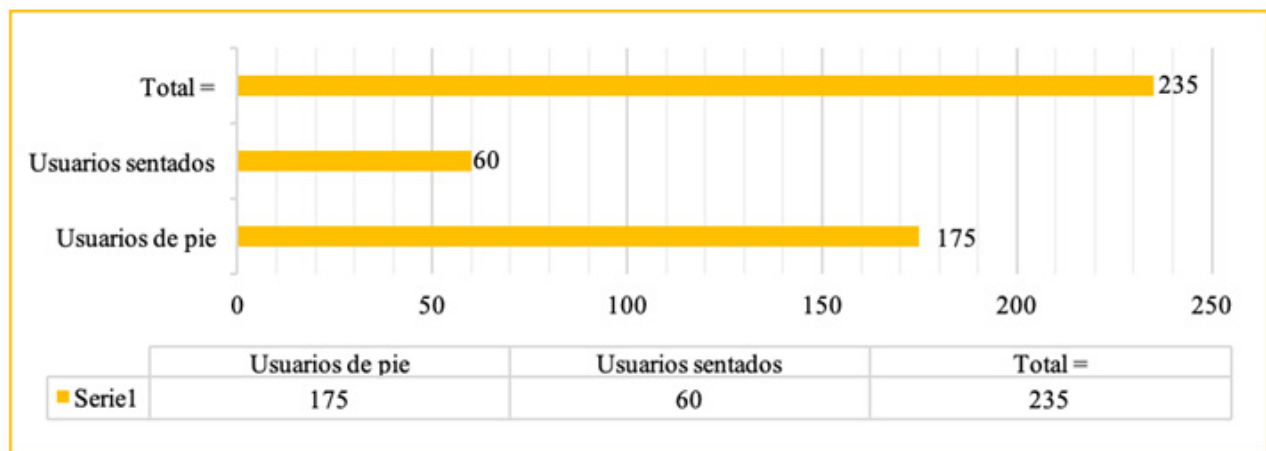


Figura 3. Usuarios dentro de un carro de modelo TEG-90 en horas de mayor demanda.

Fuente: elaboración propia.

La masa promedio (peso) considerada es de 75 kg. Esta cifra se basa en el estudio realizado a finales de 2010 y mediados de 2011 en México denominado ¿Cuánto mide México? El tamaño sí importa, realizado por la Cámara Nacional de la Industria del Vestido (CANAVE); la cual aplicó un muestro validado por el INEGI a 17 mil 364 personas mayores de 18 años y subdivididas en cuatro zonas geográficas: a) Zona norte: Monterrey, Chihuahua y Tijuana; b) Zona centro: Ciudad de México-Estado de México, Puebla y Toluca; c) Zona del Bajío: Guadalajara, León y San Luis Potosí, y d) Zona Sureste: Mérida, Veracruz, Acapulco, Tuxtla Gutiérrez y Cancún. Los resultados indicaron que el peso promedio de las mujeres mexicanas oscila en los 68,7 kg y el de los hombres en 74,8 kg [20]. De esta manera, contabilizada esta cantidad máxima de usuarios dentro de un carro del tren y considerando una masa estándar por persona de 75 kg; el carro, entonces, cargaría un total de 17,625.00 kg de pasaje en un solo recorrido; es decir, 17,63 toneladas (ton). Sin embargo, esto implica que, si una unidad de tren se compone de dos carros, y este cargara la misma cantidad de usuarios en las mismas condiciones de masa corporal, entonces se tendría un total de 35,25 por recorrido, tal y como se muestra en la Tabla 1.

En este contexto, de acuerdo con [11], el servicio de transporte urbano puede manejarse según su capacidad y tomando en cuenta: i) la distancia entre las paradas consecutivas (d_{pc}); ii) la velocidad máxima ($v_{m\acute{a}x}$); iii) el intervalo de duración entre parada y parada (I), y iv) la aceleración máxima ($a_{m\acute{a}x}$). De esta manera, según el autor:

$$\begin{aligned} \text{S\acute{ı:}} \quad & d_{pc} \leq 1000 \text{ m} \\ & a_{m\acute{a}x} \pm 1 \text{ a } 1.3 - 1.4 \text{ m/s}^2 \\ & v_{m\acute{a}x} \leq 100 \text{ km/h} \\ \text{Entonces } & I \text{ es de 2 a 3 min} \end{aligned}$$

En funci3n de lo anterior, se observ3 la frecuencia de paso de los trenes en las horas de mayor demanda; encontrando una frecuencia de paso para la L\nea 2 de poco m\as de 3 minutos. Por otro lado, en el horario previo a las 6 de la tarde se encontr3 una considerable disminuci3n de la cantidad de usuarios que pretend\an abordar el tren. La frecuencia de paso de trenes en estas horas de menor demanda se mantuvo entre los 6 y 7,15 minutos. El punto de partida se ubic3 en la estaci3n Ju\arez; una de las m\as importante del SITEUR. Esta estaci3n se ubica en la zona centro de la ciudad de Guadalajara, y en horas de mayor demanda (a partir de las 6 de la tarde) arroj3 un gran cantidad de viajes (27 viajes) desde las 16:30 hasta las 20:16 horas, tal y como se muestra en la Tabla 2.

Por otro lado, para el c\alculo del voltaje real que se puede producir con un sistema piezoel\ctrico fueron considerados los est\andares utilizados por [19] y [21], a trav\es de las ecuaciones (1), (2) y (3):

$$V = -g_{33} hT \tag{1}$$

Donde:

- V= Voltaje
- g_{33} = Constante de voltaje piezoel\ctrica (Vm/N)
- h = Altura (grosor) del cer\amico (m)
- T = Presi3n ejercida sobre el elemento (N/m²)

Tabla 1. Masa promedio y total de usuarios en los carros del tren el\ctrico de Guadalajara.

Carros	Usuarios	Masa promedio por persona (kg)	Masa total (ton)
1	235	75	17,63
2	470	75	35,25

Fuente: elaboraci3n propia.

Tabla 2. Estimación de la frecuencia de paso en la Línea 2 del tren eléctrico.

No.	Tiempo en hora		Tiempo de espera en el	
	Llegada	Salida	abordaje del pasaje	Carro
1	18:30	18:31	1 minuto	1
2	18:33	18:34	1 minuto	1
3	18:37	18:38	1 minuto	2
4	18:40	18:42	2 minutos	2
5	18:47	18:49	3 minutos	2
6	18:51	18:52	1 minuto	2
7	18:55	18:56	1 minuto	1
8	18:58	19:00	2 minutos	2
9	19:02	19:03	1 minuto	2
10	19:04	19:05	1 minuto	1
11	19:09	19:10	1 minuto	1
12	19:12	19:13	1 minuto	2
13	19:17	19:18	1 minuto	2
14	19:20	19:22	2 minutos	2
15	19:26	19:27	1 minuto	2
16	19:31	19:32	1 minuto	1
17	19:34	19:35	1 minuto	2
18	19:39	19:40	1 minuto	2
19	19:41	19:42	1 minuto	1
20	19:45	19:46	1 minuto	1
21	19:49	19:50	1 minuto	2
22	19:54	19:55	1 minuto	2
23	19:58	19:59	1 minuto	1
24	20:02	20:03	1 minuto	2
25	20:08	20:09	1 minuto	1
26	20:12	20:14	2 minutos	2
27	20:15	20:16	1 minuto	2

Fuente: elaboración propia.

$$F = m g \quad (2) \quad \text{RESULTADOS}$$

Donde:

F = Fuerza (kg m/s²)

m = Masa (kg)

g = Aceleración de la gravedad (m/s²)

$$P = \frac{F}{A} \quad (3)$$

Donde:

P= Presión (N/m²)F = Fuerza (kg m/s²)A = Área (m²)

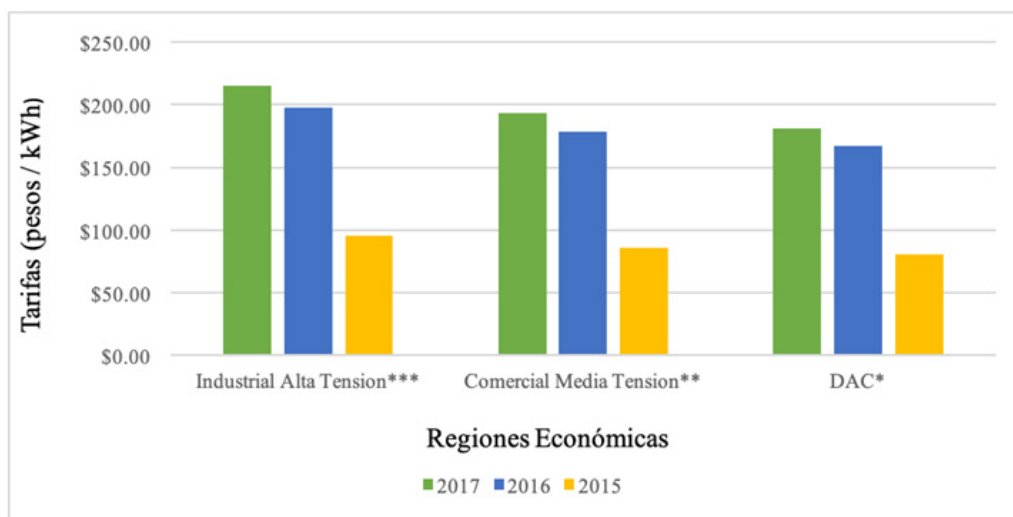
Con el propósito de obtener los costos diarios del sistema en la Línea 2 del tren eléctrico durante el año 2017, se tomó la cantidad de días de cada mes desde enero hasta noviembre de ese año, a fin de desglosar los costos por hora que llegaría a tener la Línea 2 mensualmente. En este sentido, tal y como se muestra en la Tabla 3, se consideraron dieciocho horas diarias de operación, que son las que presta normalmente el SITEUR; es decir, desde las 5:00 horas hasta las 23:00 horas.

Tabla 3. Costos por jornada de operación en la Línea 2 del tren ligero de Guadalajara.

Mes	Costo mensual en pesos mexicanos	Costos por jornada de operación (dieciocho horas/día) en pesos mexicanos	Costos por jornada de operación (dieciocho horas/día) en dólares americanos*
January	30.999,09	1722,17	86,11
February	20.064,61	1114,70	55,74
March	20.083,38	1115,74	55,79
April	40.303,07	2239,05	111,95
March	26.067,50	1448,19	72,41
June	39.531,61	2196,20	109,81
July	17.254,90	958,60	47,93
August	41.783,59	2321,31	116,07
September	25.824,41	1434,68	71,73
October	28.763,60	1597,97	79,90
November	29.550,72	1638,92	81,95

* Considerando una equivalencia de \$20,00 mexicanos por US\$ 1 dólar americano.

Fuente: elaboración propia.



***Nivel subtransmisión, Región Central, Tarifa HSL

**Región central

*Doméstica de alto consumo

Figura 4. Tarifas por región económica en México.

Fuente: elaboración propia., con información reportada por [23].

Por otro lado, para obtener el promedio aproximado de kW que consume la Línea 2 del tren eléctrico, se revisaron las tarifas de Comisión Federal de Electricidad (CFE), tal y como se muestran en la Figura 4, y se consideraron los esquemas promedio utilizados en enero de 2017 y publicados

por el diario *El Economista*, con base en base el costo que tiene la tarifa de Alta tensión [22]. Asimismo, en la Tabla 4 se indican los kW/h consumidos cada hora, día y mes, durante las dieciocho horas de servicio prestado, los promedios y totales correspondientes.

Tabla 4. kW en horas, días y semanas de servicio prestado enero-noviembre.

Mes	1 hora	18 horas	1 semana	1 mes
January	8,01	144,18	1009,26	31.287,10
February	5,18	93,24	652,68	18.275,00
March	5,19	93,42	653,94	20.272,10
April	10,41	187,38	1311,66	39.349,80
May	6,73	121,14	847,98	26.287,40
June	10,21	183,78	1286,46	38.593,80
July	4,46	80,28	561,96	17.420,80
August	10,80	194,40	1360,80	41.184,80
September	6,67	120,06	840,42	25.212,60
October	7,43	133,74	936,18	29.021,60
November	7,62	137,16	960,12	28.803,60

Fuente: elaboración propia.

Bajo la consideración de 75 kg de peso promedio y conocida la constante de aceleración de la gravedad; sustituimos en la ecuación (2), para obtener la fuerza de presión; es decir:

$$F = mg$$

$$F = (75\text{kg}) (9,81 \text{ m/s}^2)$$

$$F = 735,75 \text{ N}$$

Por tanto, con el valor de F obtenido anteriormente y utilizando la ecuación (3), se tiene la presión sobre el área de los cristales piezoeléctricos subordinada a la fuerza de presión. En este caso el área es de 0,012 m².

$$P = \frac{F}{A} \quad \therefore \quad P = \frac{735,75 \text{ N}}{0,012 \text{ m}^2} \rightarrow P = 61.312,5 \text{ N/m}^2$$

Sobre la base de lo anterior, y tomando en cuenta la altura (grosor) del cerámico utilizado por Ac-Mor para sus discos piezoeléctricos para obtener el cálculo pertinente del voltaje real (Vr), se tiene la constante piezoeléctrica (g₃₃) en Vm/N; h = 0,14 mm, o 0,00014 m; P en N/m² y equivalente a T. Entonces, el voltaje real que se obtendría por el material piezoeléctrico resultaría:

$$235 \text{ (Usuarios de 75kg c/u) -----}$$

$$4034,30 \text{ V} \rightarrow 4,03 \text{ kV}$$

Dentro de dos carros (unidad completa del tren ligero), suponiendo la misma cantidad de usuarios o pasajeros con los mismos sistemas piezoeléctricos, se tiene:

$$470 \text{ (Usuarios de 75kg c/u) -----}$$

$$8068,7 \text{ V} \rightarrow 8,06 \text{ kV}$$

Lo anterior, es suficiente para alimentar las tensiones reglamentarias, que van desde los 0,75 kV, 1,0 kV y 3,0 kV mencionadas anteriormente. En este sentido, se sabe que "Una persona de 68 kg con un porcentaje de grasa corporal del 15% equivale a una energía química acumulada de 348 MJ" [24]. En resumen, si se considera que una persona de 68 kg con una frecuencia de 2 pasos/seg puede llegar a generar un promedio de 67 Watts en energía eléctrica [15]; entonces, se asume que:

$$235 \text{ (Usuarios) -----} \quad 15.745 \text{ W} \rightarrow$$

$$15,7 \text{ kW}$$

$$470 \text{ (Usuarios) -----} \quad 31.490 \text{ W} \rightarrow$$

$$31,4 \text{ kW}$$

En función de lo anterior, considerando que el servicio del tren eléctrico con sus 27 viajes contabilizados durante las horas de mayor demanda (18:30 – 20:15 hrs) hace su recorrido con los 470 pasajeros, el tren tendría una capacidad de generación de energía de 850,23 kW.

Comparado el resultado obtenido de los 27 viajes con el promedio semanal de consumo energético obtenido anteriormente; es decir, 947,41 kW, se encuentra relativamente cerca. Esto demuestra un ahorro en los costos energéticos del SITEUR, en comparación solo con el promedio semanal obtenido de los costos energéticos de 2017, proporcionados por la dirección general del SITEUR, tal y como se indica en la Tabla 5.

Tabla 5. Comparativa entre energía consumida y generada.

Promedio de consumo de kW semanal	947,41 kW
Generación energética de kW durante una hora pico al día (18:30 – 20:20 hrs)	850,23 kW

Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, en la Figura 5 se muestra el ahorro en kW mensual en una hora de mayor demanda y contabilizando los 27 viajes de las unidades del tren eléctrico.

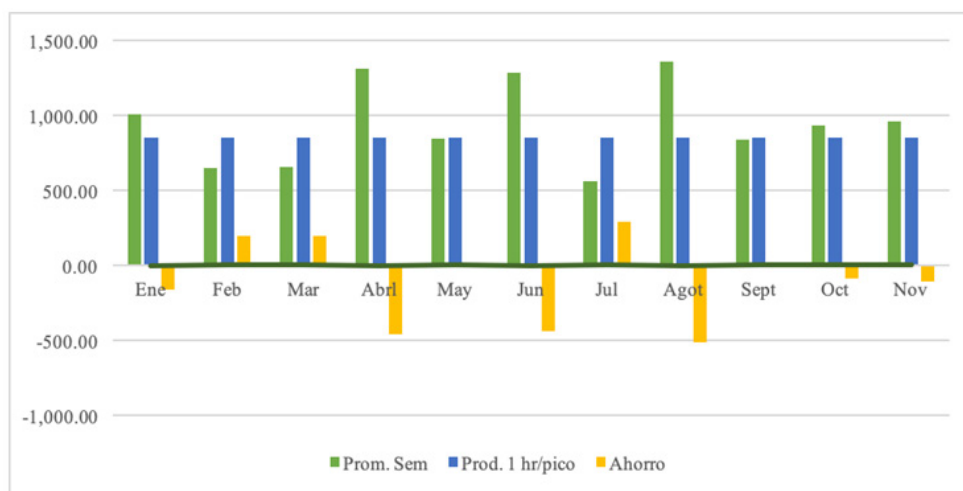


Figura 5. Ahorro en el consumo semanal de kW enero-noviembre 2017

Fuente: elaboración propia.

DISCUSIÓN

Uno de los temas todavía germinal en diversas urbes de México está relacionado con la movilidad sustentable [25]. Sobre este paradigma, los modelos TEG-90, TEG-88 y TEG-15, que dan servicio a las Líneas 1 y 2 del SITEUR en Guadalajara, utilizan una electrificación con 750 V en CC para su operación. En este sentido, una de las principales propuestas de esta investigación es la posibilidad de utilizar sistemas piezoeléctricos, los cuales ayudarían a conseguir una eficiencia sistemática, mitigando el impacto ambiental por el suministro y alto consumo energético para el servicio y operación de las líneas de tren ligero. Así, una alternativa que promueva la generación de energía limpia y sostenible a través de la innovación tecnológica capaz de transformar la conglomeración del pasaje en horas de mayor demanda, utilizando piezoelectricidad, ya sea dentro de los carros de las unidades del tren, en las vías o incluso dentro de las estaciones representa un beneficio para el sistema.

En este contexto, los sistemas piezoeléctricos prospectan ahorros económicos y energéticos que llegaría a tener un sistema de tren si estos fueran utilizados. Una vez conocidos los datos de oferta y demanda energética en la Línea 2 del tren

eléctrico de Guadalajara durante el horario de mayor demanda, se procedió con el cálculo del peso aproximado del pasaje y la cantidad de energía que puede producir un sistema de generación piezoeléctrica por persona; toda vez que, dentro de la unidad, solo fue contabilizado el usuario que estaba de pie.

En función de lo anterior, el SITEUR puede convertirse no solo en un sistema de transporte destinado a la movilidad, sino también un sistema sustentable, con la autogeneración de parte de la energía utilizada. Como ejemplo de implementación de esta tecnología y con eficiencia se encuentra el Centro Espacial Kennedy en Orlando, Florida EE. UU.; el cual tienen instaladas baldosas o sistemas piezoeléctricos en la entrada de sus instalaciones, que se encienden cuando son pisadas por los turistas y cumple dos funciones principales: a) mostrar a los turistas que están generando energía con sus movimientos, y b) aprovechar este beneficio para las instalaciones del Centro Espacial [26]. Asimismo, recientemente la empresa Londinense PAVEGEN, lanzó al mercado “The Pavegen V3”, una baldosa piezoeléctrica comercial, fabricada de metal, aluminio reciclado y materiales compuestos, la cual tiene un voltaje de 48V (con un rango de 12V-48V), y potencia de 5 Watts continuos por las fuerzas de los pasos, las cuales también están certificada por EMC Compliant, CE Marked, UL Compliant [27].

Los resultados obtenidos en la investigación muestran que los sistemas piezoeléctricos pueden contribuir significativamente con la generación de energía en los sistemas masivos de transporte público. En otros términos, la operación de trenes o cualquier otro sistema alimentado por electricidad tendería a una emisión menor de gases a la atmósfera. Es por ello, que en este estudio se comparó el consumo en kW desde enero a noviembre del año 2017. La producción de energía a través del sistema excedió el consumo de la Línea 2; esto conlleva a que la energía puede ser almacenada o redireccionada al Sistema Eléctrico Nacional.

CONCLUSIONES

El presente estudio pretendió reflexionar en torno a las actuales fuentes de energía utilizada; en la idea de considerar nuevas fuentes de energía que contribuyan con el mejoramiento del Sistema de Tren Eléctrico Urbano (SITEUR) dentro de un marco de innovación para la generación de energía eléctrica de manera sustentable; toda vez que, durante las horas de mayor demanda, es posible aprovechar la conglomeración y afluencia de los usuarios para alimentar el servicio. Esta acción contribuye de alguna manera con el medio ambiente; un tema que hoy en día genera preocupación a nivel global.

De acuerdo con los datos obtenidos, es posible proporcionar el voltaje requerido por el sistema. En el caso de la línea 2 del SITEUR, la gran afluencia de usuarios (83.059 usuarios promedio), que diariamente hacen uso del tren pueden contribuir con generar un ahorro energético y, por tanto, económico para la empresa. En suma, es posible llegar a generar energía eléctrica utilizando sistemas piezoeléctricos y aprovechar la problemática de conglomeración y afluencia de usuarios, ya que con 27 viajes de servicio que se hacen en una hora de mayor demanda, la energía generada puede ser inyectada en la líneas de la red eléctrica para uso inmediato, y posibilitar la tracción y funcionamiento.

REFERENCIAS

- [1] Metro, “Cifras de Operación en el STC. Cifras de operación”, 2018, [En línea], Disponible en: <https://www.metro.cdmx.gob.mx/operacion/cifras-de-operacion>. <https://doi.org/10.17163/ings.n12.2014.02>
- [2] Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, “Principales características del Sistema Colectivo de Monterrey”, 2009, [En línea], Disponible en: <http://dgcnesyp.inegi.gob.mx/cgi-win/bdieintsi.exe/NIVG100368#ARBOL>

- [3] ISA Corporativo, "Presentación de datos estadísticos de afluencia en Metrorrey", 2016, [En línea], Disponible en: isa.com.mx / Presentación Metrorrey.
- [4] Instituto de Investigación Estadística y Geográfica del Estado de Jalisco, "Estudio de Población y Sociedad. Información Sociodemográfica Urbana", 2017, [En línea], Disponible en: <https://www.iieg.gob.mx/general.php?id=4&idg=45>
- [5] Metrorrey, "Sistema de Transporte colectivo Metrorrey. Pasado, presente y futuro. AMF desayuno informativo", 2014, mayo, [En línea], Disponible en: <https://www.amf.org.mx/pdfs/premetrorey.pdf>
- [6] Secretaría de Energía, "Evaluación rápida de uso de Energía", Guadalajara, Jalisco, México, 2016, [En línea], Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/171261/13_Guadalajara.pdf. <https://doi.org/10.17533/udea.rfnsp.v34n3a02>
- [7] SITEUR, "Innovación y Tecnología de los Trenes", 2014, [En línea], Disponible en: <http://www.siteur.gob.mx/noticias/item/innovacion-y-tecnologia-de-los-trenes-de-la-linia-3.html>. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.2005.v41.i2.194>
- [8] ISA Corporativo, "Presentación de datos estadísticos de afluencia en SITEUR", 2016, [En línea], Disponible en: isa.com.mx/Presentación SITEUR
- [9] SITEUR, "Ubicación de estaciones", 2018, [En línea], Disponible en: <http://www.siteur.gob.mx/estaciones-tren-ligero>
- [10] Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco, "Estadísticas de Transporte Urbano de Pasajeros (ETUP) 2015-2018", 2019, [En línea], Disponible en: https://iieg.gob.mx/contenido/SociedadGobierno/Presentacion_Estadistica_Transporte_Urbano_Pasajeros_2015-20202018.pdf. <https://doi.org/10.4995/thesis/10251/99567>
- [11] D. Vázquez, "Sistemas de Tracción Eléctrica Aplicados al Transporte Urbano", 2008, Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México. México. [En línea], Disponible en: http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.10/https://doi.org/10.22201/fac-med.20075057e.2019.29.18104_0/10124/Tesis_Completa.pdf?sequence=1
- [12] A., Arnau, *Piezoelectric Transducers and Applications*, Germany: Springer Science & Business Media. 2004.
- [13] N. Cardozo, N. Y D. Tamayo, "El uso de piezoeléctricos para la generación de energía sostenible como proyecto piloto en un perfil vial de Bogotá", Tesis, Universidad Católica de Colombia, 2017, [En línea], Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/>. <https://doi.org/10.19083/tesis/623982>
- [14] M. Almudena, "Sensores Piezoeléctricos, una nueva forma de energía renovable", TWENERGY, Iniciativa de Endesa por la eficiencia y sostenibilidad, 2014, [En línea], Disponible en: <https://twenergy.com/a/sensores-piezoelctricos-una-nueva-forma-de-energia-renovable-1545>. <https://doi.org/10.19083/tesis/623982>
- [15] M. Umeda, K. Nakamura y S. Ueha, "Analysis of Transformation of Mechanical Impact Energy to Electrical Energy Using a Piezoelectric Vibrator", *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 1, 5B, 1996. [En línea], Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1143/JJAP.35.3267/pdf>. <https://doi.org/10.1143/jjap.35.3267>
- [16] J. Kymissis, C. Kendall, J. Paradiso y N. Gershenfeld, *Parasitic Power Harvesting in Shoes. Second IEEE International Conference on Wearable Computing*, Pittsburgh, PA, USA, 1998, [En línea], Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/729539>. <https://doi.org/10.1109/iswc.1998.729539>
- [17] N.S.M. Nazar, S. Thanakodi, A. Miskon, M.T. Ishak, N.M. Nor y M.Z.M, "Isa Modelling Piezoelectric System for Powering the Fans in Railway

- Stations World”, *Applied Sciences Journal*, vol. 34, N°3, 2016, [En línea], Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/305323235_Modelling_Piezoelectric_System_for_Powering_the_Fans_in_Railway_Stations
- [18] Jedol Dayou, C. Man-Sang, M.N. Dalimin y S. Wang, “Generating electricity using piezoelectric material”, *Borneo Science*, vol. 24, 2009, March. [En línea], Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/235987254_Generating_electricity_using_piezoelectric_material
- [19] Academia de Ciencias de Morelos, “Pisando y Generando. Piezoelectricidad”, Morelos, México, 2010, [En línea], Disponible en: <http://acmor.org.mx/cuamweb/reportescongreso/2010/fisico-mate/110-%20CUM%20Pisando%20y%20Generando.pdf>
- [20] A. Mulato, *¿Eres el mexicano promedio?*, 2016 [En línea], Disponible en: https://verne.elpais.com/verne/2016/01/21/mexico/1453392216_878680.html
- [21] A. Gómez, “Diseño de un Sistema de energy harvesting basado en piezoeléctricos”, 2018, Trabajo de fin de Grado. Universidad de Alcalá. [En línea], Disponible en: https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/33621/TFG_Gomez_Molina_2018.pdf?sequence=1. <https://doi.org/10.23857/dom.cien.pocaip.2017.3.4.oct.264-283>
- [22] K. García, “Industria pagará por más Electricidad”, *Periódico El Economista*, 2017, enero, [En línea], Disponible en: <https://www.economista.com.mx/empresas/Industria-pagaramaspor-electricidad-20170101-0064.html>. <https://doi.org/10.6036/8449>
- [23] Comisión Federal de Electricidad, *Tarifas. Esquemas Tarifarios*, 2017, [En línea], Disponible en: https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/Tarifas_negocio.asp. <https://doi.org/10.1787/888933545709>
- [24] T. Starner y J. Paradiso, “Human Generated Power for Mobile Electronics”, En *Low Power Electron 1990*, 2003, [En línea], Disponible en: <https://www.cc.gatech.edu/~thad/p/books/human-generated-power-for-mobile-electronics.pdf>. <https://doi.org/10.1201/9781420039559.ch45>
- [25] F. García, M. González y. Asprilla, “Determinación de los componentes entrópicos de la accidentalidad: el trinomio vehículo/usuario/camino en la metrópoli de Guadalajara, México”, *Tecnura*, vol. 22, N°, 55, 2018. <https://doi.org/10.14483/22487638.13245>
- [26] Diario Las Américas, “Turistas generan electricidad solo por caminar en baldosas piezoeléctricas”, *Diario Las Américas*, 2017, mayo, [En línea], Disponible en: <https://www.diariolasamericas.com/florida/turistas-generan-electricidad-solo-caminar-baldosas-piezoelectricas-n4122095>
- [27] PAVEGEN, “The Pavegen V3”, Productos Pavegen de Londres, 2017, [En línea], Disponible en: <http://www.pavegen.com/product>

