

# MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EDIFICACIONES.

---

TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO  
DE ARQUITECTO PRESENTA:

Miriam Castañeda Vázquez

Comité tutorial:

Tutor principal: Dra. Adriana Lira Oliver

Asesores:

M. en Ing. Sean Rodolfo S. Vilchis Martínez

M. en C. Naoki Enrique Solano García.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
LABORATORIO DE ENTORNOS SOSTENIBLES (LES)  
FACULTAD DE ARQUITECTURA, CIUDAD UNIVERSITARIA,  
CDMX, OCTUBRE DEL 2020.





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# ÍNDICE

1	Introducción	6
2	Marco teórico	8
2   1	Fenómeno de piezoelectricidad	9
2   1.1	Carga eléctrica	9
2   1.2	Campo eléctrico	9
2   1.3	Corriente eléctrica y diferencia de potencial	9
2   1.4	Piezoelectricidad	10
2   2	Ruido y sonido	10
2   2.1	Características del sonido	10
2   2.2	Fuentes sonoras	12
2   3	Circuitos eléctricos	12
2   3.1	Circuitos en serie, en paralelo y mixto	12
2   3.2	Capacitancia, resistencia e impedancia	13
2   3.3	Sistemas de rectificación, amplificación y regulación de la corriente eléctrica	15
2   3.4	Corriente directa y corriente alterna	16
3	Análisis del estado de arte	17
3   1.1	Antecedentes	17
3   1.2	Tipos de materiales piezoeléctricos	19
3   1.3	Aplicaciones de piezoeléctricos	20
3   1.4	Materiales piezoeléctricos en el mercado	25
3   1.5	Casos de estudio	33
4	Planteamiento del problema, hipótesis, justificación y objetivos	41
5	Metodología	43
5   1.1	Revisión de literatura	43
5   1.2	Características del piezoeléctrico utilizado	44
5   1.3	Modelo electromecánico del piezoeléctrico	44
5   1.4	Caso de estudio: Iluminación	45
5   1.5	Diseño de la fachada	51
5   1.6	Diseño eléctrico y simulación con MultiSIM	52
6	Resultados y discusión	55
7	Conclusiones	59
	Apéndice: Modelos simulados	61
	Referencias	64

## Agradecimientos.

A mi mamá por siempre apoyarme en las decisiones que he tomado en mi vida, como el haber estudiado arquitectura. Quiero compartir con ella, el terminar la carrera y que sepa que es un logro de las dos.

A botas por siempre estar conmigo, y demostrarme mientras estudiaba que puedo contar con él, desvelandose a mi lado cuando era necesario.

A Marquito, por estar siempre presente en los momentos mas importantes de mi vida.

Agradezco a mi tutora de tesis; la doctora Adriana Lira Oliver por motivarme y dirigirme hacia el campo de la investigación en cuanto a la arquitectura sostenible y medio ambiente, por apoyar y defender mi tema de tesis, así como al maestro Sean Rodolfo Sebastián Vilchis Martínez, por compartir conmigo su experiencia y porque gracias a sus conocimientos en el área de ingeniería ésta investigación fué posible, al maestro Naoki Enrique Solano García, por sumarse a mi equipo de tutores aportando conocimientos con su experiencia.

Este proyecto de investigación fué elaborado gracias al proyecto CONACYT SENER 260155, y al laboratorio de Entornos Sostenibles.

Por último, agradezco a mis amigos por estar desde el día 1 en donde decidí la carrera de arquitectura como el desarrollo profesional de mi vida, como a mis mejores amigas Mafer y Fer.

A los amigos y todas las personas que conocí dentro de la Facultad de Arquitectura y que han estado conmigo en todo momento, como Danilu, Jhonathan y Charlie.

## Resumen.

Se diseñó y simuló una fachada piezoeléctrica que aprovecha las vibraciones del ruido urbano que incide sobre los edificios en zonas de alta intensidad de contaminación auditiva para generar electricidad mediante el efecto piezoeléctrico. Para evaluar el sistema propuesto, se diseñó una instalación de iluminación con base en lámparas LED.

Este estudio tuvo como fin analizar la factibilidad de la implementación de un sistema alternativo de generación de electricidad cuyo principio de operación aproveche la contaminación auditiva urbana mediante el efecto piezoeléctrico.

Al evaluar el sistema eléctrico de la fachada con el programa computacional MultiSIM se encontró que, a partir de presiones sonoras de 100 dB, el sistema era capaz de mantener funcionando la instalación de iluminación del espacio, independientemente de la frecuencia del ruido urbano.

La anterior indicó que a presiones sonoras mayores que 100 dB se podría obtener la energía necesaria para poner a funcionar constantemente la instalación de iluminación del espacio.

Como trabajo futuro se propone llevar a cabo un estudio experimental a nivel físico como validación del estudio.

Además, deberá estudiarse una configuración eléctrica más simple que permita la utilización completa de la fachada, implementando piezoeléctricos, y reduciendo la electrónica implementada.

## Abstract.

A piezoelectric façade was designed and simulated to take advantage of the vibrations of urban noise that hits buildings in areas of high intensity of noise pollution to generate electricity through the piezoelectric effect. To evaluate the proposed system, a lighting installation based on LED lamps was designed.

The purpose of this study was to analyze the feasibility of the implementation of an alternative electricity generation system whose operating principle takes advantage of urban noise pollution through the piezoelectric effect.

When evaluating the electrical system of the façade with the MultiSIM computer program, it was found that, based on sound pressures of 100 dB, the system was able to keep the space lighting installation running, regardless of the frequency of urban noise.

The previous one indicated that at sound pressures greater than 100 dB, the necessary energy could be obtained to constantly operate the space lighting installation.

As future work it is proposed to carry out an experimental study at the physical level as validation of the study.

In addition, a simpler electrical configuration should be studied that allows full use of the façade, implementing piezoelectrics, and reducing the electronics implemented.

En este trabajo se presenta una propuesta no convencional relacionada a las energías alternativas para la generación de energía eléctrica. La generación de energía eléctrica ha sido una de las mayores fuentes de contaminación ambiental.

Hoy en día existen muchos otros tipos de contaminaciones como por ejemplo, la contaminación del suelo, del agua, del aire, sonora, entre otras que afectan no solamente física, sino también emocionalmente a las personas.

Para mitigar el cambio climático hay alternativas sustentables en cuanto el aprovechamiento de recursos renovables para la generación de energía eléctrica como por ejemplo: energía solar, eólica, hidráulica y biomasa, aunque también existen formas no convencionales de generación energía eléctrica como los materiales inteligentes.

Los materiales inteligentes, son materiales que tienen una o más propiedades que pueden ser modificadas, ya sea mediante un estímulo externo como la temperatura, campos eléctricos o magnéticos, etc, o también pueden ser modificadas de manera reversible. Estos materiales se han utilizado de diferentes maneras en los campos como medicina o para el desarrollo de nuevos dispositivos en cuanto a tecnología, y pueden ser utilizados para la arquitectura y la construcción, utilizando materiales compuestos, los cuales

se refieren a utilizar un material inteligente con un material convencional y así lograr mayor resistencia e incluso reducir las emisiones que emiten los materiales convencionales.

También existen materiales termo-crómicos que cambian sus propiedades ópticas en respuesta al flujo de calor o energía térmica, materiales foto-crómicos que cambian sus propiedades ópticas en respuesta a la radiación visible y ultravioleta que reciben y así reducir el uso de sistemas mecánicos de acondicionamiento térmico (sistemas de HVAC) e incluso sistemas lumínicos en edificaciones y como los materiales cambio de fase que cambian de estado gracias a la temperatura, y en edificios funcionan como amortiguadores térmicos, esto solo por mencionar algunos y sus propiedades.

La Ciudad de México es una de las urbes más grandes en el mundo, por lo que también es una de las principales ciudades más contaminadas.

El tema que sobresale en esta investigación es la contaminación auditiva, la cual genera diferentes problemas en la salud de las personas, así como también la sobre población de esta ciudad que trae consigo la construcción de más viviendas y por lo tanto de mayor consumo energético.

Es por eso que en esta investigación se busca demostrar si la contaminación del ruido puede generar energía eléctrica y busca una alternativa a ésta utilizando materiales inteligentes que son llamados Piezoeléctricos.

Ésta investigación se lleva a cabo en dos partes, la parte teórica y la parte experimental estudiando diferentes conceptos de física como la electricidad y el sonido, así como el diseño de circuitos eléctricos en un software llamado MultiSIM.

El objetivo principal de esta investigación es diseñar una fachada con piezoeléctricos para evaluar la factibilidad de la utilización de las vibraciones del ruido en la ciudad de México y así generar energía eléctrica utilizable para iluminar espacios considerando un espacio de oficinas simple como caso de estudio.

Se diseñó un edificio de oficinas, tomando en cuenta la ubicación, ya que necesita estar en una avenida con ruido elevado, de 90 a 120 dB, que es el promedio de niveles de sonido que se genera en las ciudades más grandes del mundo.

Se calculó mediante el método de la cavidad el número de lámparas y watts requeridos para un espacio de estas oficinas, y con esto se diseñó en MultiSIM, el modelo electromecánico del piezoeléctrico, y después la conexión de los piezoeléctricos para generar una salida de voltaje y corriente que encendiera los led's propuestos. Después se diseñó una fachada la cual será la que albergará los piezoeléctricos.

Esta investigación, deja como conclusión, que los materiales piezoeléctricos son factibles para la generación de energía eléctrica en edificios, mediante la utilización de la contaminación auditiva con las ondas del ruido en las ciudades, logrando una propuesta de energía renovable no convencional que puede ser utilizada en cualquier parte del mundo.

## MARCO TEÓRICO

En esta sección se presentan aspectos fundamentales para entender el fenómeno de piezoelectricidad, así como conceptos de la electricidad, como: carga eléctrica, campo eléctrico, corriente eléctrica y diferencia de potencial y se describe el fenómeno de piezoelectricidad.

También aspectos fundamentales de la física del sonido como las características de éste y se describe que son las fuentes sonoras.

Igualmente otros conceptos importantes para establecer las bases del desempeño y análisis del circuito eléctrico empleado en esta investigación como: circuitos eléctricos (en serie y en paralelo), características específicas de los piezoeléctricos; capacitancia, resistencia e impedancia, sistemas de rectificación y amplificación y regulación de la corriente eléctrica.

## 2 | 1

# FENÓMENO DE PIEZOELECTRICIDAD

### 2 | 1.1

## CARGA ELÉCTRICA

La materia está constituida por elementos fundamentales, llamados átomos, dentro de estos átomos existen partículas llamadas protones, electrones y neutrones; los protones son cargas positivas, los electrones son cargas negativas y los neutrones no tienen carga.

El núcleo de los átomos está conformado por protones y neutrones, mientras que los electrones, están al rededor de éste, tal como se muestra en la figura 1.

La carga eléctrica es una consecuencia de la interacción de cargas eléctricas, como los protones y electrones, que pueden estar diferenciados en polaridad o no. Además, la interacción de estas cargas ocasiona una fuerza, que puede ser de atracción (cargas de diferente polaridad) o de repulsión (cargas de igual polaridad).

La magnitud de la carga eléctrica se mide en Coulombs, en honor al científico francés Carlos Agustín Coulomb, y la fuerzas de atracción y/o repulsión en Newtons. (Young et al., 2009).

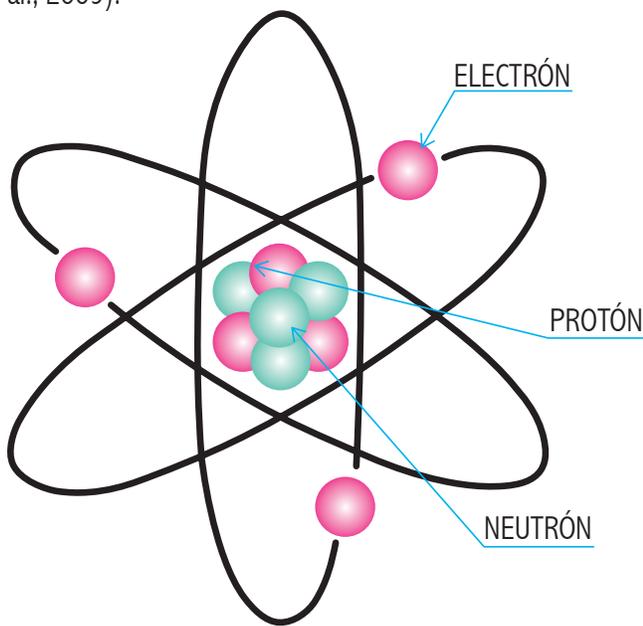


Fig. 1. Núcleo conformado por neutrones, protones y electrones. elaborada con base en Young et al., (2009).

## 2 | 1.2

## CAMPO ELÉCTRICO

El campo eléctrico es una región del espacio vacío, sin presencia de materia, en la que cualquier carga ejerce una fuerza, esto es debido a las cargas eléctricas.

Los campos eléctricos de cargas positivas son repulsivos (van de su centro hacia el exterior de las cargas positivas) y los campos eléctricos de cargas negativas son atractivos (van del exterior de las cargas negativas hacia el centro de éstas, como se aprecia en la figura 2).

“El campo eléctrico es igual a la fuerza eléctrica por unidad de carga, que una carga experimenta en ese punto. La unidad de carga para el campo eléctrico es 1 Newton sobre Coulomb” (Young et al., 2009).

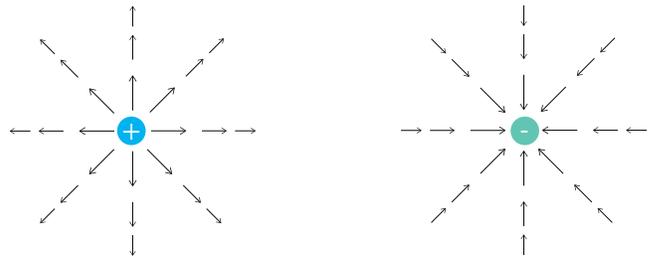


Fig. 2. Campos eléctricos de una carga positiva (izquierda) y de una carga negativa (derecha).

## 2 | 1.3

## CORRIENTE ELÉCTRICA Y DIFERENCIA DE POTENCIAL

La corriente eléctrica, es el movimiento de las cargas eléctricas de una región a otra en una magnitud de tiempo.

La polaridad de la corriente indica el sentido de ésta, tal como se aprecia en la figura 3. Esta se mide en Coulombs sobre segundo (C/s), unidad conocida como Ampere (A), en honor del científico belga Andrés María Ampere.

Aunque los electrones sean los que se mueven de una región a otra, la corriente se describe en términos de un flujo de carga positiva, siempre y cuando sea una corriente directamente polarizada “positivo a positivo y negativo a negativo”. (Pérez-Montiel, 2011; Young et al., 2009)

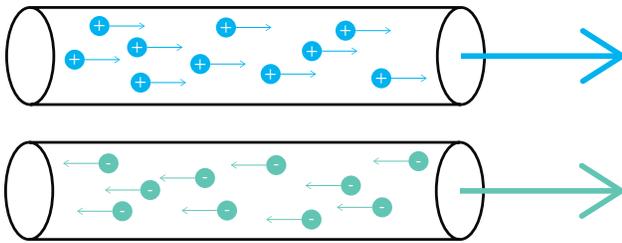


Fig. 3. Corriente eléctrica y su sentido de circulación.

El potencial eléctrico es la energía potencial que se ejerce para poder realizar un trabajo, en este caso mover una carga eléctrica. Toda carga eléctrica, positiva o negativa tiene una energía potencial eléctrica, debido a su capacidad de realizar un trabajo sobre otras cargas. (Pérez Montiel, 2011) (Young et al., 2009).

El movimiento de cargas eléctricas se va a realizar cuando los potenciales eléctricos sean diferentes en las terminales de un circuito eléctrico o una fuente de energía eléctrica (baterías, generadores, sistemas piezoeléctricos, entre otros), tal como se indica en la figura 4.

El fenómeno que es consecuencia de los potenciales eléctricos diferentes se denomina diferencia de potencial, tensión eléctrica o fuerza electromotriz.

Ésta diferencia de potencial se mide en Volts (V), por lo que también se le conoce coloquialmente, como voltaje, en honor del científico italiano Alejandro Volta. (Pérez Montiel, 2011) (Young et al., 2009).

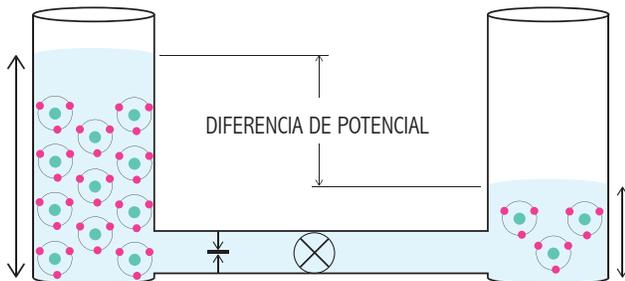


Fig. 4. Definición de diferencia de potencial eléctrico.

## 2 | 1.3

## PIEZOELECTRICIDAD

La piezoelectricidad es un fenómeno descubierto por los hermanos Curie el 2 de Agosto de 1880. Éste fenómeno se descubrió por accidente cuando estudiaban otro fenómeno parecido a éste llamado piroelectricidad, (propiedad de los materiales, que son sometidos a cambios de temperatura, éstos presentan cambios en la polarización eléctrica) que sucedía con cristales como la turmalina y la sal de Rochelle. Ellos notaron que, al presionar los cristales y deformarlos, generaban una polarización eléctrica.

Los cristales son materiales que no tienen simetría, por lo tanto en cada molécula contienen dipolos con cargas positivas y negativas, que al ser deformados o sometidos a tensiones mecánicas adquieren una polarización mecánica la cual genera una diferencia de potencial y que tenga cargas eléctricas en su superficie, también puede lograrse de manera inversa; aplicando una diferencia de potencial, se logra que el cristal se deforme (figura 5).

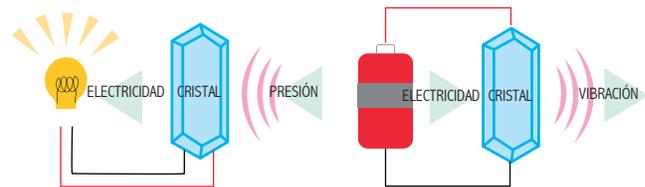


Fig. 5. Efecto piezoeléctrico. a) Generación de corriente por esfuerzo mecánico. b) Efecto piezoeléctrico inverso (deformación del cristal por suministro de una diferencia de potencial).

## 2 | 2

## RUIDO Y SONIDO

### 2 | 2.1

### CARACTERÍSTICAS DEL SONIDO

El sonido es un fenómeno físico, que el oído humano percibe como el resultado de una fluctuación en la presión del aire. Estas fluctuaciones son creadas por un objeto vibrante que mueve las ondas longitudinales en el aire, como la mostrada en la figura 5.

El sonido tiene características importantes, como son:

- Frecuencia
- Amplitud
- Longitud de onda
- Potencia acústica
- Espectro de frecuencia.

La frecuencia es una magnitud, es la repetición por unidad de tiempo de cualquier fenómeno. Aquí se refiere al número de ocasiones en que se repite el ciclo completo de una onda sonora completa.

En el sonido, la frecuencia es determinada por la oscilación de un objeto, cuando esa oscilación se repite, es que se ha completado un ciclo.

El número de ciclos por segundo es llamado frecuencia (F). La unidad de frecuencia es el hertz, 1 hertz = 1 ciclo/s, el tiempo que toma una oscilación en repetirse se llama periodo (T), la frecuencia es determinada por:  $F = 1/T$ .

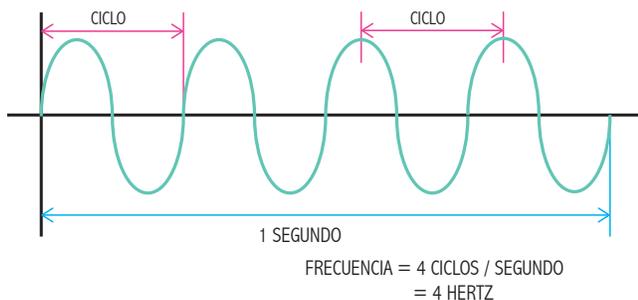


Fig. 6. Onda sonora típica ideal.

El sonido se propaga en ondas y las variaciones de presión producidas por éstas son muy pequeñas si se comparan con la presión atmosférica.

El sonido de más baja intensidad que una persona joven puede detectar corresponde a 0.00002 Pa ( 1Pa = N/m<sup>2</sup>).

La presión sonora es el concepto más importante, ya que de todas las cantidades que pueden ser utilizadas para calcular el “esfuerzo” de una onda sonora (Velocidad de la partícula, intensidad sonora, etc) la presión es la que realmente debe medirse.

El nivel de presión sonora (SPL) de un sonido es la raíz cuadrada de la medida de las presiones al cuadrado (Prms).

El nivel de presión sonora es la cantidad que es medida cuando un micrófono es colocado en un campo sonoro. El instrumento portátil usado para medir SPL es conocido como medidor de presión sonora, decibelímetro o sonómetro.

Para poder medir la potencia del sonido, se utilizan los decibeles (dB), éstos son una unidad logarítmica y es la décima parte de un belio (llamado así por Alejandro Graham Bell). (Saad, Eduardo, 2008)

Espectro de frecuencia en sonido.

La mayoría de los sonidos están compuestos de mezclas complicadas de vibraciones. Un espectro de sonido es una representación de un sonido en términos de cantidad de vibración en cada frecuencia individual, se presenta usualmente como un gráfico de potencia o presión en función de la frecuencia.

El poder de presión es medido en decibeles y la frecuencia es medida en Hertz o kilo hertz.

El espectro de sonido es medido por:

-Micrófonos los cuales miden la presión de sonido en un intervalo de tiempo.

-Convertidor analógico digital, el cual convierte el espectro de sonido a una serie de dígitos o pulsos (representando el voltaje del micrófono) en función del tiempo.

-Por último con una computadora la cual realiza un cálculo sobre estos números.

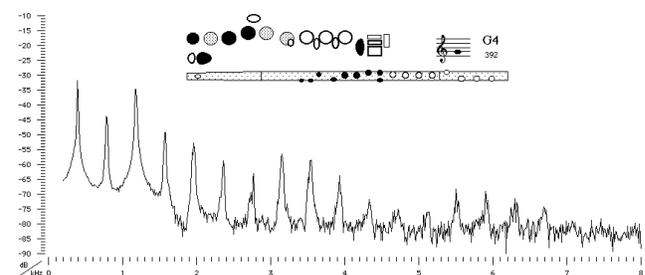


Fig. 7. Espectro de sonido de la nota G4 tocada en una flauta.

## 2 | 2.2 FUENTES SONORAS

Las fuentes sonoras en la acústica arquitectónica son muy variadas.

Las características y patrones de direccionalidad generados por cada tipo de fuente sonora, pueden cambiar, pero también es importante mencionar que muchas fuentes sonoras son aproximadas por una o varias combinaciones de fuentes teóricas idealizadas, como lo son: Fuentes monopolares o las bipolares.

Las actividades cotidianas que realizamos los seres humanos, son la principal fuente de contaminación sonora.

El ruido siempre ha existido, pero desde la Revolución industrial, el desarrollo de medios de transporte y el crecimiento de las ciudades, ha hecho que la contaminación auditiva aumente, se llama contaminación, ya que afecta negativamente a la vida de las personas. Ésta contaminación auditiva, puede utilizarse para poder generar electricidad.

La OMS (Organización mundial de la salud) demostró que la contaminación auditiva afecta al 80% de los habitantes en las ciudades. La Ciudad de México es la octava urbe con peor contaminación acústica del mundo.

## 2 | 3 Circuitos eléctricos

### 2 | 3.1 CIRCUITOS EN SERIE, EN PARALELO Y MIXTO.

Como ya se dijo antes, una corriente eléctrica es el resultado de las cargas en movimiento y un circuito eléctrico es la trayectoria de conducción cerrada que sigue la corriente eléctrica.

En esta trayectoria se exhiben tres propiedades básicas

Voltaje / diferencia de potencial  
Corriente / amperaje  
Resistencia

Existen diferentes tipos de circuitos; en serie, paralelo y mixto. Cuando el circuito está en serie, los elementos conductores están conectados uno detrás del otro (es decir, la salida del elemento anterior conectada con la entrada del elemento subsecuente, como se muestra en la figura 6), así que la corriente circula a través de cada uno de manera equitativa, por lo tanto, si el circuito está abierto, el paso de corriente se interrumpe. El voltaje en un circuito en serie, se reparte entre los elementos que consumen electricidad (elementos de carga de potencia).

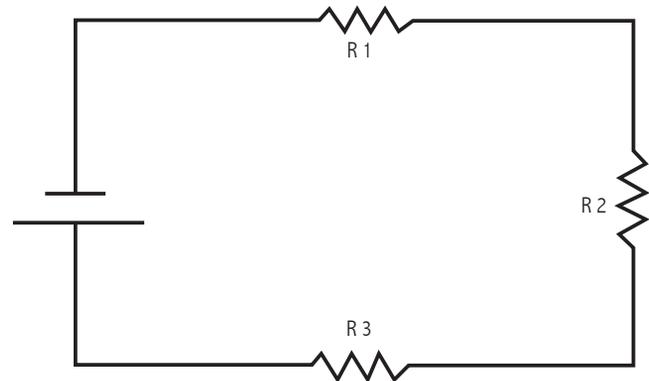


Fig. 8 Ejemplo de circuito resistivo en serie.

Cuando el circuito está en paralelo, los elementos conductores se encuentran separados en varios ramales (o líneas derivadas, como se muestra en la figura 7), por lo tanto la corriente eléctrica se divide de manera paralela entre cada uno de ellos, así que, si el circuito está abierto en cualquier parte, la corriente no será interrumpida. En los circuitos en paralelo, el voltaje aplicado en todos los elementos de carga es el mismo.

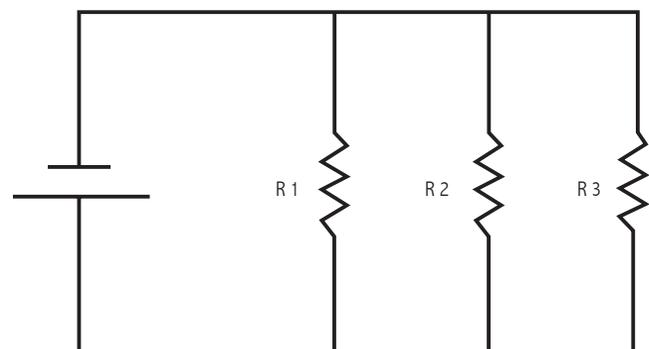


Fig. 9. Ejemplo de circuito resistivo en paralelo.

En los circuitos mixtos, los elementos conductores están conectados en serie y en paralelo, tal como se muestra en la figura 10.

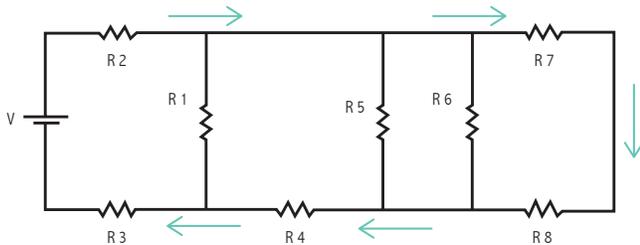


Fig. 10. Ejemplo de circuito resistivo mixto.

## 2 | 3.2 CAPACITANCIA, RESISTENCIA E IMPEDANCIA.

Los capacitores o condensadores, son elementos eléctricos pasivos que están conformados por al menos dos placas o electrodos fabricados con materiales conductores y un material aislante o dieléctrico al centro (figura 9).

La capacitancia es la capacidad que tienen estos elementos de almacenar transitoriamente energía eléctrica en forma de voltaje (debido a la diferencia de potenciales que se ocasiona al interrumpir el flujo de corriente eléctrica con el dieléctrico, provocando la existencia de carga eléctrica en uno de los electrodos del condensador, dando pie a un comportamiento electrostático debido a que las cargas eléctricas se detienen), ésta se mide en Faradios (en el SI), en honor al físico inglés Michael Faraday.

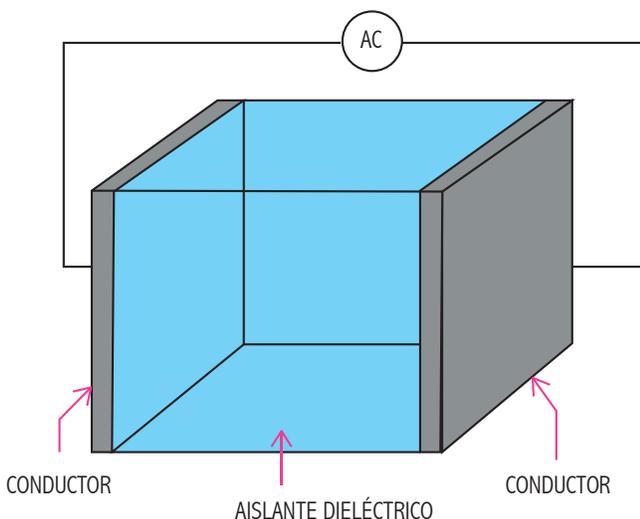


Fig. 11. Un condensador o capacitor de placas paralelas.

La resistencia es un elemento del circuito, el cual funciona como un efecto de oposición al paso de la corriente eléctrica.

La unidad de medida de la resistencia eléctrica son los Ohms. Este nombre es en honor del científico alemán Jorge Ohm.

Los materiales conductores, son poco resistivos, en comparación a los materiales aislantes.

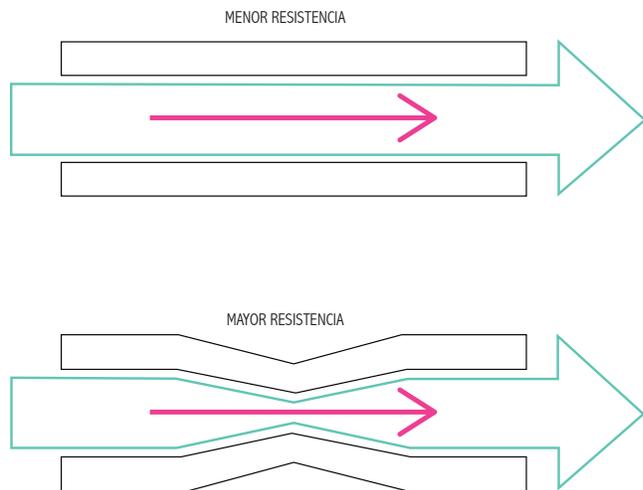


Fig. 12. Oposición al paso de la corriente.

La teoría de las bandas es una formulación que permite enunciar las causas de la resistencia eléctrica de los materiales, así como establecer las diferencias entre materiales conductores, aislantes y semiconductores, se trata de dibujar las energías disponibles de los electrones en el material.

El parámetro con el que se mide el máximo de los niveles de energía de los electrones disponibles a bajas temperaturas es el nivel de Fermi. La posición del nivel de Fermi con la relación a la banda de conducción es un factor fundamental en la determinación de las propiedades eléctricas.

Las mayoría de sustancias sólidas son aislantes, y la teoría de bandas en aislantes implica que hay un gran espacio entre las energías de los electrones de valencia y la energía a la cual se pueden mover los electrones libremente en el material (banda de conducción).

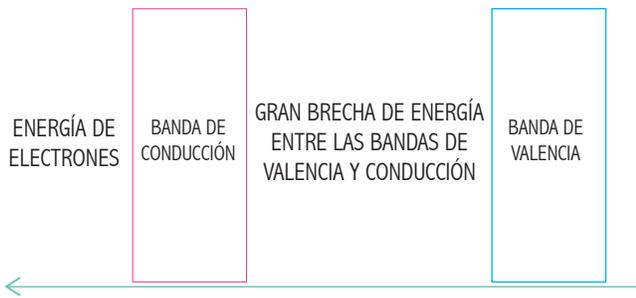


Fig. 13. Funcionamiento de material aislante.

Las bandas de energía en materiales semiconductores como el silicio y germanio, el nivel de Fermi está a la mitad entre las bandas de valencia y de conducción, no ocurre conducción a 0 K a temperaturas superiores y un número finito de electrones pueden alcanzar la banda de conducción y proporcionar algo de corriente.

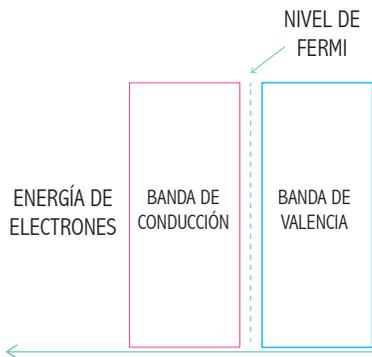


Fig. 14. Funcionamiento de material semiconductor.

Los metales son únicos como buenos conductores de la electricidad, ya que los electrones de valencia están libres.

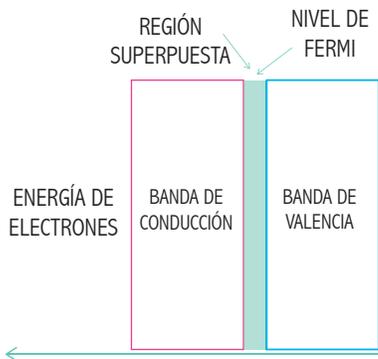


Fig. 15. Funcionamiento de material conductor.

La impedancia es una oposición que ofrece un circuito eléctrico al paso de la corriente alterna, por efectos de resistencia natural, efectos capacitivos y efectos inductivos (Fraile Mora, 2012).

La impedancia abarca efectos muy diversos sobre los circuitos eléctricos yendo desde una caída de voltaje hasta el retraso/desfasamiento de las señales de corriente eléctrica y voltaje eléctrico, así como también cambios en el comportamiento magnético (bobinas, e inductores tales como motores, generadores y transformadores) y/o electrostático (capacitores) de los elementos conectados a un circuito de corriente alterna (efecto conocido como potencia reactiva).

Esto puede apreciarse en un algoritmo gráfico llamado triángulo de potencia como el que se muestra en la figura 16.

La potencia consumida (Watts) por un circuito eléctrico está representada por la base del triángulo (disipada por efectos resistivos), la potencia aparentemente consumida (la potencia disipada por el efecto de impedancia total, en Volts-Ampere) se indica en la hipotenusa del triángulo y la potencia reactiva (la potencia disipada por efectos magnéticos puros o efectos electrostáticos puros, en VAR) se presenta en el cateto menor del triángulo.

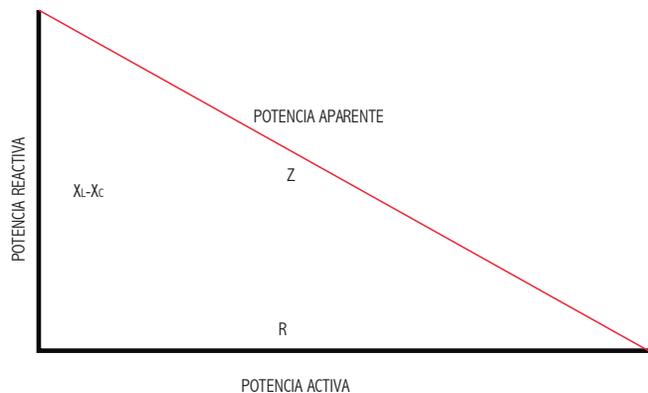


Fig. 16. Triángulo de potencias (Efectos de la impedancia en la corriente alterna).

## 2 | 3.2 SISTEMAS DE RECTIFICACIÓN, AMPLIFICACIÓN Y REGULACIÓN DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA.

El diodo y el puente rectificador.

Los sistemas de rectificación de la corriente eléctrica tienen como función convertir la corriente alterna a corriente directa mediante la rectificación, anulación o cambio de polaridad, de las señales de polaridad contraria a la requerida por el circuito eléctrico o electrónico, generalmente se componen de diodos y condensadores, los últimos a modo de filtros.

Un diodo es un dispositivo semiconductor que esencialmente actúa como un interruptor de una sola vía para la corriente, permite a la corriente fluir fácilmente en una dirección, pero restringe severamente la corriente que fluye en la dirección opuesta.

Por esta razón, la utilización de un solo diodo genera una corriente eléctrica continua con valores únicamente en una sola mitad de onda, lo que indica que la corriente eléctrica obtenida es una corriente directa pulsante.

Los diodos también son conocidos como rectificadores de media onda, porque cambian la corriente alterna a corriente directa en la manera descrita en el párrafo anterior.

Tienen polaridad, determinada por un ánodo (lado positivo) y un cátodo (lado negativo). Muchos diodos permiten que la corriente fluya solamente cuando el voltaje positivo es aplicado en el ánodo. En la figura 17 se muestra una descripción de como esta conformado el diodo.

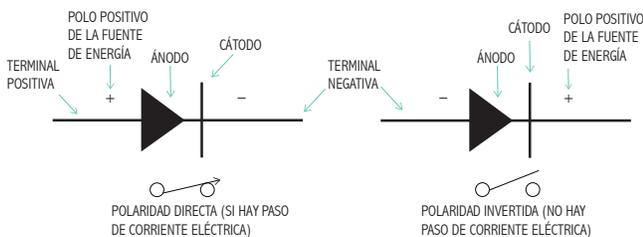


Fig. 17 Diodo en polarización directa y en polarización invertida.

Un puente rectificador de onda completa es un convertidor de Corriente Alterna (CA) en Corriente Directa (CD) (Fig 18).

Los puentes rectificadores se usan ampliamente en fuentes de alimentación que proporcionan el voltaje de CD necesario para los componentes o dispositivos electrónicos, ya que proporcionan una corriente eléctrica directa con valores más constantes, a pesar de que su naturaleza sigue siendo pulsante. Se pueden construir con cuatro o más diodos o cualquier otro interruptor de estado sólido controlado.

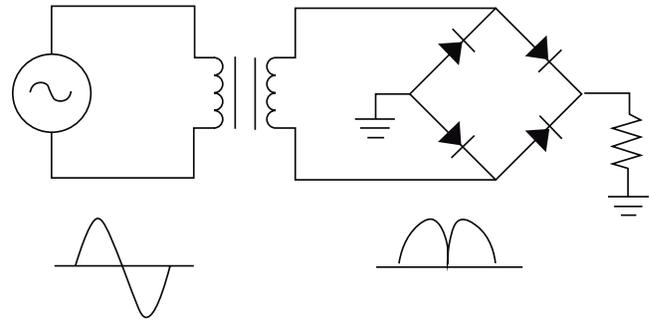


Fig. 18. Puente rectificador de onda completa.

Amplificador operacional como elevador de corriente eléctrica.

Los amplificadores operacionales se pueden conectar según dos circuitos amplificadores básicos: las configuraciones 1. Inversora y 2. No inversora.

Casi todos los demás circuitos con amplificadores operacionales están basados, de alguna forma, en estas dos configuraciones básicas, además de que existen variaciones estrechamente relacionadas de éstos dos circuitos, más otro circuito básico que es una combinación de los dos primeros: el amplificador diferencial.

Existen tres principales puntos de la teoría de los amplificadores operacionales:

1. La tensión de entrada diferencial es nula
2. No existe flujo de corriente en ninguno de los terminales de entrada
3. En bucle cerrado, la entrada (-) será regulada al potencial de entrada (+) o de referencia

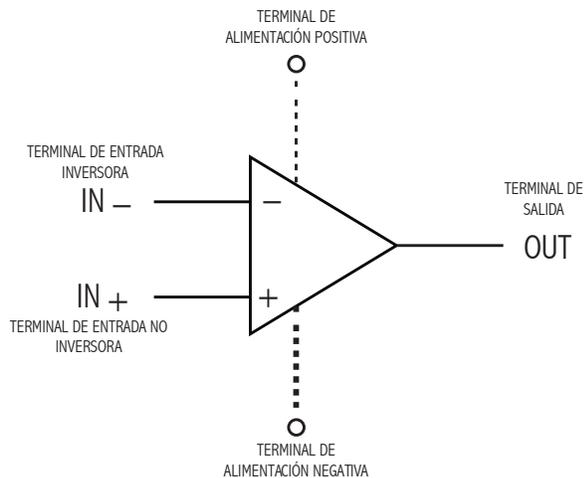


Fig. 19. Símbolo básico de amplificador operacional.

El símbolo básico de un amplificador de corriente operacional es un triángulo, el cual generalmente presupone amplificación. Las entradas están en la base del triángulo, y la salida en el ápice. De acuerdo con el convenio normal del flujo de señal, el símbolo se dibuja con el ápice (salida) a la derecha. (Fig. 19).

Las dos entradas están claramente identificadas por los símbolos (+) y (-), los cuales se sitúan adyacentes a sus respectivas terminales dentro del cuerpo del triángulo.

Las terminales de las tensiones de alimentación, se dibujan por encima y por debajo del triángulo, éstos pueden no ser mostrados en todos los casos pero siempre están implícitos.

Finalmente el tipo o número del dispositivo utilizado se sitúa centrado en el interior del triángulo. Si el circuito es uno general, el indicativo de un amplificador operacional cualquiera, se usa el símbolo A.

#### Diodo de Zener.

Los diodos de Zener están diseñados para mantener un voltaje constante en sus terminales, siempre debe ser polarizado.

Puede funcionar como un regulador de voltaje simple o limitador de voltaje.

La principal característica del diodo zener es la polarización inversa, ya que funciona como un circuito abierto.

Otra característica importante es que cuando la corriente a través de éste cambia, el voltaje que sale permanece constante.

Pueden comportarse como un diodo convencional o polarizado.

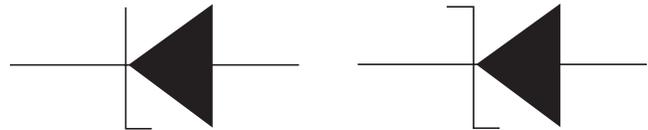


Fig. 20. Diodo Zener.

## 2 | 3.4 CORRIENTE DIRECTA Y CORRIENTE ALTERNA.

La corriente alterna tiene voltajes y corrientes que varían en el tiempo de forma sinusoidal adquiriendo valores cero, máximos y negativos; posee frecuencia y período. La mayoría de los sistemas de distribución de energía eléctrica en hogares e industrias operan con corriente alterna (figura 21 a).

La corriente directa a comparación de la alterna, es una corriente cuyos valores de voltaje y corriente permanecen, idealmente, constantes en el tiempo (figura 21 b), tal como la que se obtiene de baterías, paneles fotovoltaicos y de sistemas electrónicos de rectificación de la corriente alterna.

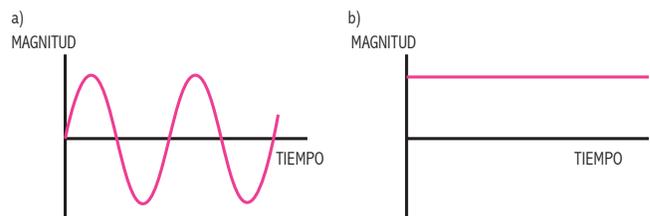


Fig. 21. a) Corriente eléctrica alterna sinusoidal. b) Corriente eléctrica directa o continua.

# 3 |

# ANÁLISIS DEL ESTADO DE ARTE

## 3 | 1.1

## ANTECEDENTES

En México a través de la SENER (Secretaría de Energía) se llevan a cabo las actividades de planeación del SEN (Sistema Eléctrico Nacional).

La SENER emite el programa PRODESEN (Programa del desarrollo del sistema eléctrico nacional, en este caso del 2016 al año 2030).

Este programa está alineado al Plan Nacional de Desarrollo, al Programa Sectorial de Energía, al Programa Nacional de Infraestructura, al Programa Especial para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía y al Programa Especial para el Aprovechamiento de las Energías Renovables.

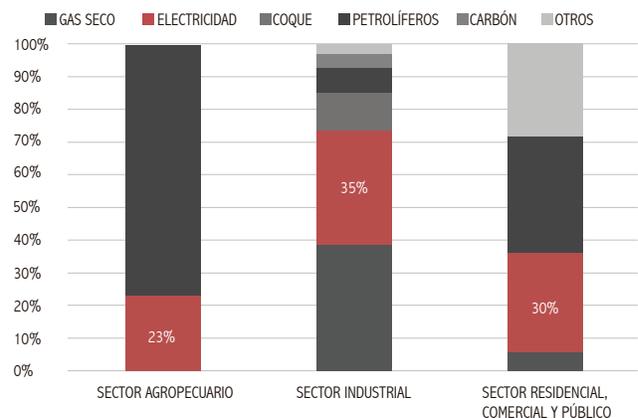
El PRODESEN incorpora aspectos importantes de los programas de ampliación y modernización. La energía eléctrica es un insumo primario para realizar actividades productivas, por lo que el costo accesible a ésta tiene un impacto en el crecimiento económico del país.

El garantizar energía eléctrica de forma continua y segura permite el acceso a servicios sociales básicos, como: educación, salud y alimentación, aumentando la calidad de

vida de las personas.

En México la electricidad es la segunda fuente de energía de mayor consumo, con una participación del 18% del consumo energético nacional. (Dirección General de Generación y Transmisión de Energía Eléctrica, 2018).

23% Sector agropecuario  
35% Consumo de Industria  
30% Sectores residenciales, comercial y público.

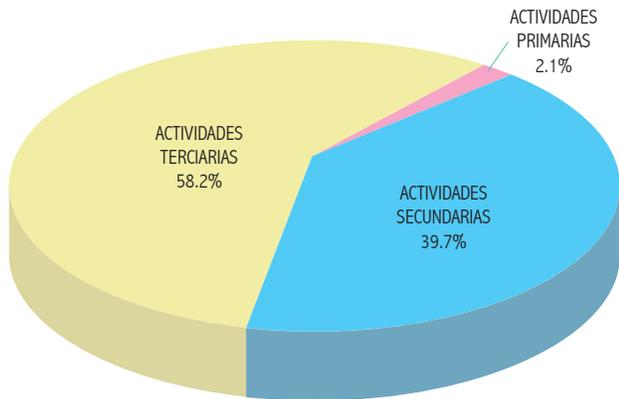


FUENTE: ELABORADO POR SENER CON DATOS DEL SISTEMA DE LA INFORMACIÓN ENERGÉTICA (SIE).

Fig. 22. Gráfico de participación de la electricidad en el consumo final de energía por sector.

Del total de la producción de la industria eléctrica, se destinó:

- 58.2% Actividades terciarias
- 39.7% Actividades secundarias
- 2.1% Actividades primarias



FUENTE: ELABORADO POR SENER CON DATOS DE LA MATRIZ INSUMO PRODUCTO 2012. INEGI.

Fig. 23. Gráfico de distribución del consumo intermedio de la producción interna de energía eléctrica.

La Ciudad de México es una urbe que cuyo crecimiento no fué planeado, lo que ha traído como consecuencia que se haya vuelto insostenible, lo que presenta un problema en cuanto a recursos naturales y energías, ya que la demanda ha aumentado rápidamente en muy poco tiempo.

El sector energético enfrenta cambios, la reducción de fuentes de energías fósiles y su demanda por la población, el compromiso del cuidado del medio ambiente y la mitigación de los efectos del cambio climático, son algunos factores para que las empresas privadas y públicas sean competitivas.

México ocupa el número 73 por la calidad de suministro de energía eléctrica a nivel mundial, según el Índice de Competitividad Global del Foro Económico Global (WEF por sus siglas en inglés).

Cada vez aumenta más la demanda por el consumo energético, es por eso que es necesario buscar alternativas sustentables que solucionen los problemas de contaminación y suplan parte de esta necesidad y así proteger el medio ambiente a futuro.

El uso de sistemas capaces de producir y almacenar energías sostenibles mientras mitigan las consecuencias ambientales que se generan en la producción de electricidad, puede ser la solución a esta necesidad. (Dirección General de Generación y Transmisión de Energía Eléctrica, 2018).

De acuerdo con informes de la OMS, la ciudad de México es la octava urbe en el mundo con mayor contaminación sonora. (Mileno, 20414).

En la figura 19, se muestran los niveles de ruido (decibeles) que tiene la Ciudad De México desde el nivel aceptable en color verde, hasta el inaceptable en color rojo.

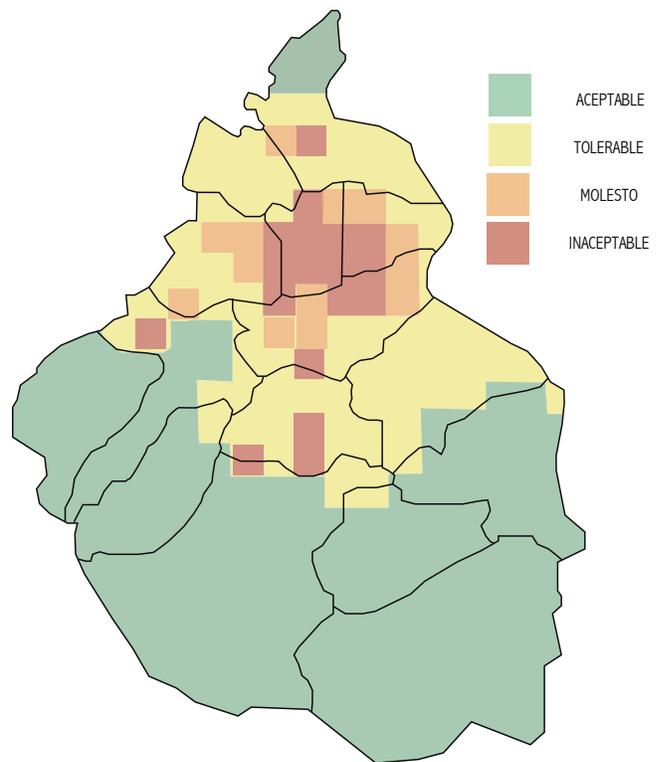


Fig. 24. Niveles de ruido en la Ciudad de México.

Este tipo de contaminación afecta el 80% de las personas que viven en ciudades.

Las delegaciones más ruidosas en la Ciudad de México son:

Miguel Hidalgo, Iztapalapa, Cuahutemoc, Coyoacán y Benito Juárez.

Las menos ruidosas son:

Cuajimalpa, Magdalena Contreras, MilpaAlta, Tlahuac y Xochimilco.

En la figura 20 se muestran los niveles permisivos al ruido, dependiendo las horas al día en el que se esta expuesto y en una respuesta lenta.

Exposición permisible a ruido (en horas por día y en resp. lenta)	Nivel Sonoro dB
8	90
7	91
6	92
5	93
4	95
3	97
2	100
1	105
30 min	110
15 min	115
nada	120

Fig. 25 Tabla de exposición permisible al ruido. (Peralta, 1998).

Las avenidas en donde los niveles sonoros alcanzan más de los niveles permitidos son (figura 21):

Avenida	promedio dB	máximo dB
Zaragoza	91.2	111.1
Ermita	80.2	99.1
Eje Central	79.0	101
Politécnico	78.2	100.8
Cuautepec	77.9	101.0
Consulado	83.8	105
Insurgentes	80.0	95.8
Vía Morelos	83.0	105.5

Fig. 26 Tabla de avenidas ruidosas en la Ciudad de México. (Peralta, 1998).

El ruido puede causar distintas enfermedades como:

Sordera, dolor de cabeza, cardiopatías, estrés, insomnio, irritabilidad y agresividad.

Este tipo de problemas se extiende a la población joven, ya que existe un riesgo de que 1.1 mil millones de ellos en el futuro padezcan pérdida auditiva. (Gracias al uso de audífonos).

Todos estos problemas pueden prevenirse al reducir la exposición a ruidos fuertes.

### 3 | 1.2 TIPOS DE MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS

Los materiales piezoeléctricos son denominados inteligentes ya que transforman un estímulo físico a una forma de energía diferente del estímulo recibido, forman parte de los materiales inteligentes tipo II.

En el caso de los materiales piezoeléctricos, éstos perciben un estímulo mecánico (un esfuerzo aplicado en éstos traducido en una deformación) y reaccionan produciendo una corriente eléctrica. Estos materiales pueden fabricarse de materiales cerámicos, materiales compuestos, polímeros o bien por su estructura, algunos pueden ser considerados como monocristalinos.

Los piezoeléctricos de cerámica son los más empleados en los sistemas de generación eléctrica mediante efecto piezoeléctrico, un ejemplo de éstos son los PTZ.

Los piezoeléctricos de materiales compuestos son conformados de piezoeléctricos de diferentes materiales configurados en secuencias de capas adhesivas conteniendo, básicamente, películas de polímero piezoeléctrico y disponiendo de electrodos de salida de potencia del piezoeléctrico. En este tipo de materiales se encuentran el PFC o piezoeléctrico compuesto de fibras (configurados como elementos adhesivos que contienen fibras circulares con películas de poliamida); así como también el sistema de MFC o piezoeléctrico de macrofibra (barras piezoeléctricas cerámicas rectangulares separadas por capas adhesivas, películas delgadas fabricadas en poliamida y electrodos para conectar el PFC).

Los piezoeléctricos poliméricos se constituyen de polímeros, como el Polivinidelo de Fluoruro o PVDF, de naturaleza semicristalina (es decir, el material se encuentra cristalizados en un 50% - 60%).

Los piezoeléctricos monocristalinos son materiales especiales que se configuran como un solo cristal, a escala dimensional variable. Al revés de los materiales piezoeléctricos convencionales, los monocristales prometen una generación de electricidad más eficiente, ya que la pérdida de energía se reduce al reducirse la cantidad de fronteras entre cristales.

Las fronteras entre cristales oponen una resistencia mayor a la circulación de la corriente eléctrica.

### 3 | 1.3 APLICACIONES DE PIEZOELÉCTRICOS

Generalmente se han aplicado los materiales piezoeléctricos en sistemas de baja potencia ya que, a pesar de que son materiales muy sensibles a los estímulos mecánicos y su respuesta eléctrica es prácticamente, instantánea, la cantidad de energía generada es mínima. Tales aplicaciones se encuentran en micrófonos (las presiones derivadas del sonido que se hacen sobre el piezoeléctrico permiten que éste genere pulsos eléctricos que, aunque débiles, se pueden amplificar para convertirse en señal de audio aplicada), bocinas y timbres (efecto piezoeléctrico inverso, al aplicarse un voltaje al piezoeléctrico se produce una vibración que, en función de su magnitud, puede percibirse acústicamente) y sistemas de sensores de movimiento y control de sistemas de actuación mecánico.

Desde luego, los materiales piezoeléctricos, pueden utilizarse en sistemas de generación de electricidad en dispositivos llamados generadores piezoeléctricos. Estos generadores piezoeléctricos, aprovechan los esfuerzos mecánicos inducidos en el material piezoeléctrico para generar electricidad. En muchos casos se configuran mediante sistemas consistentes en vigas en voladizo, como las mostradas en las figuras 27 a 30, cuyo principio general de funcionamiento se puede resumir de la siguiente manera:

1. La fuente de movimiento inducido al piezoeléctrico se encuentra en el “empotramiento” de la viga. Ésta fuente de movimiento será la que induzca los esfuerzos en el material piezoeléctrico.

2. En el cuerpo de la viga se encuentra el material piezoeléctrico colocado como capas en ambas caras de la viga. Éstas capas reciben el estímulo mecánico de la fuente de vibración (del empotramiento) y poseen electrodos de los que salen un par de terminales, una positiva y una negativa, de los que se recolecta la electricidad generada (indicada como una salida de voltaje generada,  $V_g$ ).

3. En el extremo libre de la viga se coloca generalmente una masa ( $m$ ) para amplificar el movimiento inducido a la viga desde el empotramiento. La amplificación del movimiento de la viga incrementará, en consecuencia, el esfuerzo y deformación inducido en los piezoeléctricos y, por lo tanto, la salida de energía eléctrica del sistema de generación tenderá a ser mayor.

Los detalles de los sistemas de generación piezoeléctricos descritos en la lista pueden verse en las figuras 27 a 30.

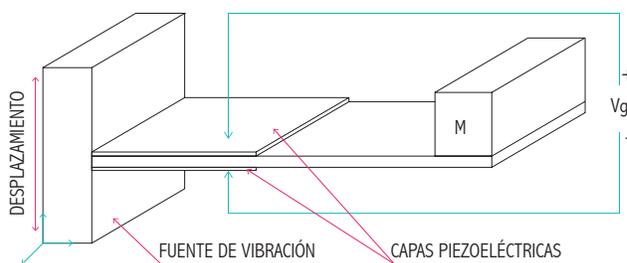


Fig. 27. Generador con dos placas de cerámica PTZ (Bimorfa).  $V_g$  indica la salida del voltaje generado. Elaborada con base en Gryzbek, (2013).

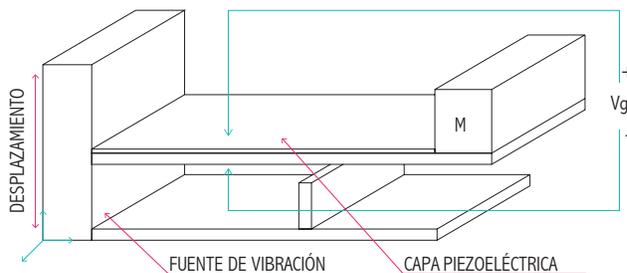


Fig. 28. Viga con un elemento adicional, que incrementa la tensión en el material piezoeléctrico.  $V_g$  indica la salida del voltaje generado. Elaborada con base en Gryzbek, (2013).

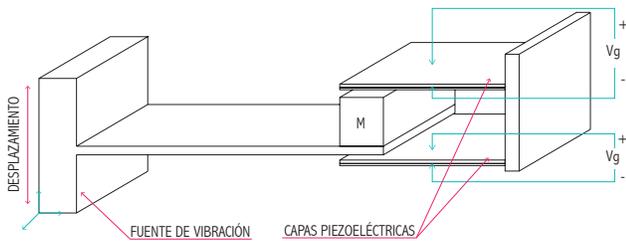


Fig. 29. La viga no contiene material piezoeléctrico, con una configuración adicional que tiene capas de material piezoeléctrico.  $V_g$  indica la salida del voltaje generado. Elaborada con base en Gryzbek, (2013).

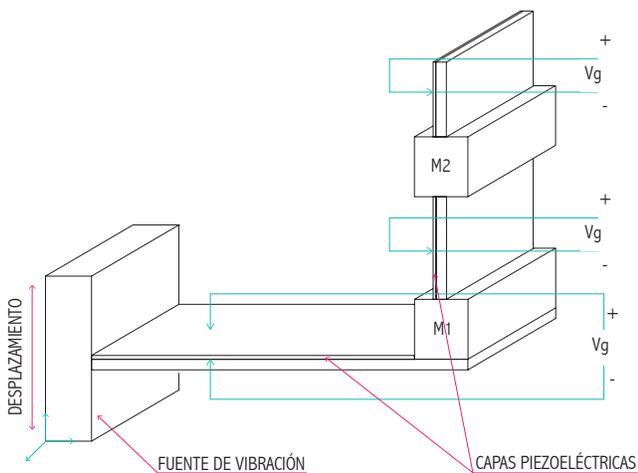


Fig. 30. Viga con elemento adicional, que hace que sea posible añadir más capas piezoeléctricas.  $V_g$  indica la salida del voltaje generado. Elaborada con base en Gryzbek, (2013).

Otras configuraciones se han utilizado también en sistemas de generación piezoeléctricos, tales como aquellos basados en esfuerzos de compresión. Su principio general de funcionamiento se puede resumir como sigue:

1. Se colocan capas apiladas de materiales piezoeléctricos en una celda vertical. Cada una de estas celdas dispone de una serie de terminales (provenientes de los electrodos de cada piezoeléctrico) que se conectan en paralelo (lo que hace que la corriente eléctrica de salida se incremente a un voltaje generado,  $V_g$ , casi constante).
2. Se les puede colocar una membrana completamente elástica que servirá para transmitir el esfuerzo a la pila de piezoeléctricos.

3. Se les induce una carga de compresión a los piezoeléctricos a través de la membrana descrita en el punto dos, ocasionando que el piezoeléctrico reaccione produciendo corriente eléctrica.

El sistema descrito en la lista anterior puede analizarse con las figuras 31 y 32.

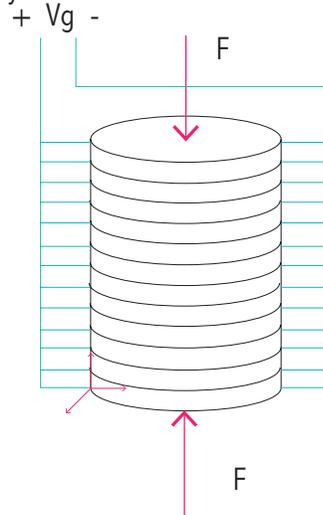


Fig. 31. Actuadores piezoeléctricos apilados.  $V_g$  indica la salida del voltaje generado. Elaborada con base en Gryzbek, (2013).

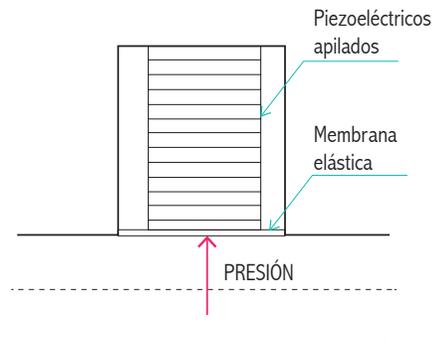


Fig. 32. Ejemplo de tal estructura generadora que extrae energía de las pulsaciones de presión en un conducto hidráulico. Elaborada con base en Gryzbek, (2013).

La eficiencia de la energía eléctrica generada depende de algunos factores, como por ejemplo:

- El material piezoeléctrico utilizado
- La estructura generadora
- Sistema electrónico de control y el almacenamiento de energía
- El tamaño del generador.

La máxima cantidad de energía eléctrica está dada por el tipo de generador junto con la estructura piezoeléctrica utilizada y el tamaño de los materiales piezoeléctricos.

La demanda de energía en aplicaciones potenciales no puede exceder varias docenas de milivolts, donde se debe tener en cuenta que la cantidad de energía eléctrica generada depende de la frecuencia de vibración de un objeto, del cual es de donde se extrae la energía eléctrica.

Hará posible reducir los costos operativos y permitirá crear una tecnología ecológica (en la que se reduzca potencialmente el empleo de baterías y, por lo tanto, se reduzca también la disposición final de baterías degradadas).

Existen tres tipos básicos del sistema eléctrico que pueden ser aplicados en generadores:

1. Sistema que consiste en el convertidor de voltaje CA/CD
2. Sistema que consiste en 2 subsistemas: convertidor de CA/CD y el subsistema optimización de voltaje para el receptor suministrado.
3. Sistema que consiste en 2 subsistemas antes mencionados y amplificador de potencia eléctrica.

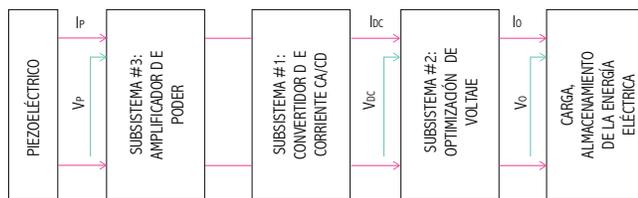


Fig. 33. Subsistemas de sistema de cosecha de energía. Elaborada con base en Gryzbek, (2013).

Actuadores y sensores.

Los sensores piezoeléctricos se utilizan para medir presión, aceleración, tensión o fuerza, transformando éstas lecturas en señales eléctricas.

Éstos consisten en dos discos de cristal con un electrodo situado entre ellos, cuando se aplica una fuerza genera una carga eléctrica que es proporcional a esta fuerza.

Los actuadores piezoeléctricos son componentes electrónicos que utilizan una sustancia derivada de un material piezoeléctrico, en el interior tienen componentes formados por cristales, estos cristales conforman una serie de cargas y campos eléctricos sin ordenen, una vez que este campo está cerca de los cristales, estos comienzan a reordenarse, creando vibraciones.

Éstos conjuntos de fenómenos son utilizados en dispositivos electrónicos.

Éstos son algunos criterios, para el colocamiento óptimo de los sensores y actuadores piezoeléctricos en estructuras inteligentes.

1. Maximizar el comportamiento vibratorio / momentos aplicados por actuadores piezoeléctricos.
2. Maximizar la deflexión de la estructura inteligente del piezoeléctrico
3. Minimizar el esfuerzo de control / maximizar energía disipada
4. Maximizar el grado de controlabilidad
5. Maximizar el grado de observación
6. Minimizar el efecto de derrame

Los sensores y actuadores piezoeléctricos son utilizados de manera extensa en el ámbito de controles de vibración activos, ya que estos materiales tienen excelentes propiedades electromecánicas, como son: respuesta rápida, fácil fabricación, diseño flexible, poco peso, bajo costo, bajo consumo de energía, no generan campo eléctrico mientras convierten la energía eléctrica en energía mecánica.

El rendimiento de los controles de vibración activos dependen del emplazamiento de los sensores y actuadores piezoeléctricos.

Muchos de los trabajos en controles de vibración activos están concentrados en el modelo y uso de una estructura inteligente.

1. Maximizar fuerzas modales / momentos, aplicados por actuadores piezoeléctricos.

Los actuadores piezoeléctricos son útiles para tensar la estructura anfitrión, en una dirección opuesta a las tensiones que se desarrollan en las estructuras anfitrionas.

Por lo tanto, se puede razonar que los actuadores piezoeléctricos se deben colocar en las regiones de tensiones medias a altas y lejos de áreas de tensión cero (nodos de deformación).

Si un campo eléctrico, es aplicado a través de los actuadores piezoeléctricos en la misma dirección, la estructura anfitrión será deformada en modo de extensión.

(a) Si el campo eléctrico es aplicado mediante el actuador piezoeléctrico en la posición contraria, la estructura anfitrión será deformada en modo de flexión.

(b) Para el control del primer modo de una viga en voladizo, el par de actuadores debe ser colocado cerca de la raíz, para el segundo control modo, los actuadores necesitan ser colocados a una cierta distancia de la raíz.

Los actuadores pueden colocarse de tal manera que la fuerza modal disponible para los modos de interés se maximiza.

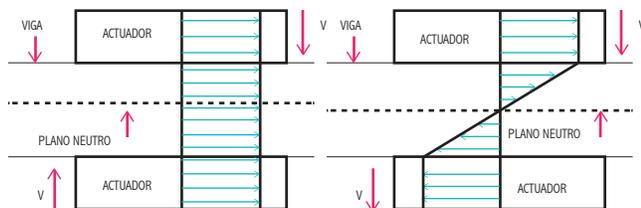


Fig. 34. Distribución de deformación de sustrato piezoeléctrico unido a una superficie durante: a) extensión y b) modo de flexión del par de actuadores piezoeléctricos colocados. Elaborada con base en Gupta et al., (2010).

Para una relación de módulo dada, se puede obtener el espesor óptimo así como la ubicación del actuador con respecto al plano neutro de la estructura.

2. Maximizar la deflexión de la estructura

Cuando un voltaje, tensión o diferencia de potencial externo es aplicado en la superficie unida del actuador piezoeléctrico, este produce una deflexión transversal en la estructura. La deflexión transversal en la estructura es una función del la ubicación del actuador. Esta deflexión transversal puede ser utilizada como un criterio para la ubicación óptima de los actuadores.

3. Minimizar el esfuerzo de control / maximizar energía disipada

En control activo de vibraciones, la fuente externa de energía es utilizada para causar deflexión en la estructura.

4. Maximizar el grado de controlabilidad

Para que exista un control efectivo de la vibración, y la estructura inteligente pueda ser controlada.

La controlabilidad es una función de ambos sistemas dinámicos y ubicación y número de actuadores. El grado de control de un sistema se puede aumentar con la colocación adecuada de los actuadores usando varias técnicas

En una estructura inteligente, la óptima colocación del actuador, es en donde la energía eléctrica consumida es pequeña y las fuerzas modales generadas son las más grandes.

El criterio asegura la ubicación de los actuadores en donde la energía requerida para controlar las vibraciones de la estructura son mínimas.

5. Maximizar el grado de observación

Cada estado variado en el sistema tiene algún efecto en el sistema de salida. Un sistema de sistema de lazo cerrado se dice que es completamente observable si, la señal de salida del sistema está relacionada con la información de entrada de cada una de las variables de estado.

Si un estado es variable no puede ser observado de ésta forma, entonces el sistema se dice que es inobservable.

La observabilidad es una función de ambos sistemas dinámicos y la ubicación y número de sensores.

La observabilidad de un sistema sólo dice si el clima del sistema es observable o no. El grado de observación depende de la ubicación de los sensores utilizando diferentes métodos.

La ubicación óptima de los sensores es determinada utilizando la misma metodología utilizada para actuadores.

En una estructura inteligente, las ubicaciones óptimas para sensores son en donde las vibraciones o los cambios en las formas de modo de vibración en la estructura son relativamente largas.

### 6. Minimizar el efecto de derrame

Muchas veces, una estructura inteligente flexible es dividida en un número de elementos finitos para el análisis de vibraciones y control.

Es suficiente para tener en cuenta el comportamiento dinámico de baja frecuencia en la mayoría de las situaciones prácticas.

Al implementar la ley de control, el modelo se reduce para incluir solo los primeros pocos modos de interés de baja frecuencia.

Sólo los primeros pocos modos de baja frecuencia se consideran en el observador de estado. Sin embargo, la ley de control de realimentación de estado basada en un modelo reducido puede excitar los modos residuales.

Éstos modos residuales aparecen en sensores de salida pero no están incluidos en el diseño de control

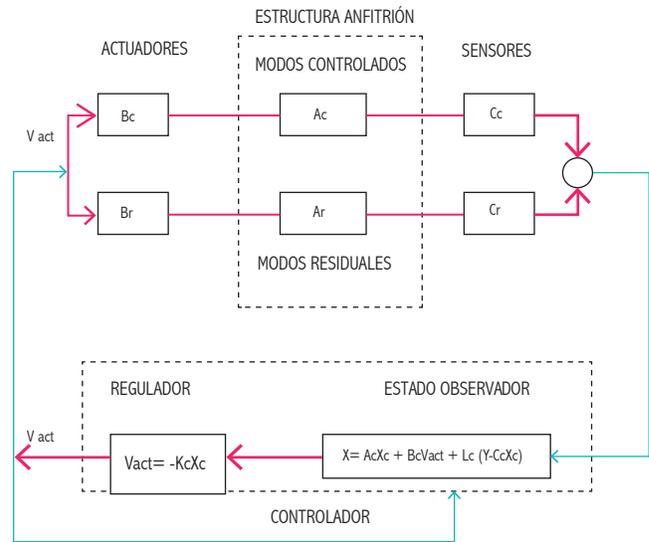


Fig. 35. Ilustración esquemática del efecto de derrame. Elaborada con base en Gupta et al., (2010).

Éstos son algunos de los criterios para la optimización de los piezoeléctricos en estructuras inteligentes, que se han implementado en las investigaciones de estos materiales. Estos criterios son utilizados en vigas y estructura de placa.

En la primera tabla se muestran los criterios de optimización de los piezoeléctricos en la estructura inteligente "viga", en la segunda tabla se muestran los criterios de optimización en una estructura inteligente "Plato (Plana circular)".

### 3 | 1.4 MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS EN EL MERCADO.

Dispositivo piezoeléctrico cerrado con conexión inalámbrica. (Pequeño).

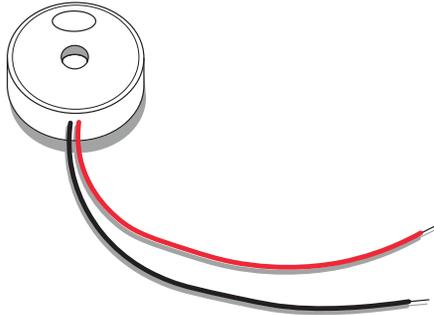


Fig. 36. Piezoeléctrico cerrado con conexión inalámbrica.

Elemento piezoeléctrico de 14 mm de diámetro, que se puede adaptar fácilmente. Los elementos piezoeléctricos, convierten vibraciones a voltaje o voltaje a vibraciones, esto significa que este piezoeléctrico puede funcionar como una bocina, para hacer sonidos, tonos o alertas y puede ser utilizado como sensor, para detectar rápidos movimientos como golpes.

Puede ser utilizado hasta con 9Vpp, pero también puede usar ondas cuadradas de 3V y es bastante ruidoso.

-Detalles técnicos.

Frecuencia resonante: 8 kHz  
Corriente clasificada máxima: 3.0 mA  
Voltaje nominal: -20°C ~ 70°C  
Voltaje de entrada máximo: 40 V

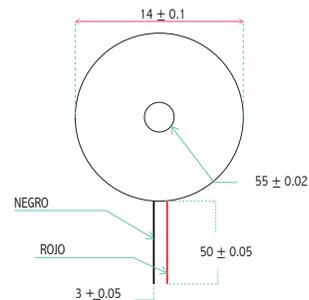


Fig. 37. Descripción en imagen de ficha técnica del piezoeléctrico.

-Dimensiones.

Diametro externo: 14 mm/.55"  
Circunferencia central: 5.5 mm / 0.2"  
Espesor: 2.5 mm / 0.1"  
Peso: 0.5 gr

Dispositivo piezoeléctrico cerrado con conexión inalámbrica.

(Grande)

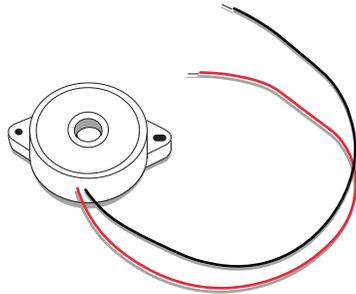


Fig. 38. Piezoeléctrico cerrado.

Elemento piezoeléctrico de 30 mm de diámetro, está conformado por elementos de montaje para poder ser sujetado fácilmente.

-Detalles técnicos.

Voltaje nominal (Onda cuadrada): 12 Vp-p

Voltaje de funcionamiento: 1-30 Vp-p

Corriente clasificada (MAX): 3.5 mA

Min. Salida de sonido a 10cm : 85 dB

Frecuencia resonante: 1300 Hz +/- 500 / 4000Hz +/- 500

-Dimensiones.

Ancho del orificio de montaje: 41 mm

Diametro: 30 mm

Diametro del centro: 5.7 mm

Peso 4.3 gr

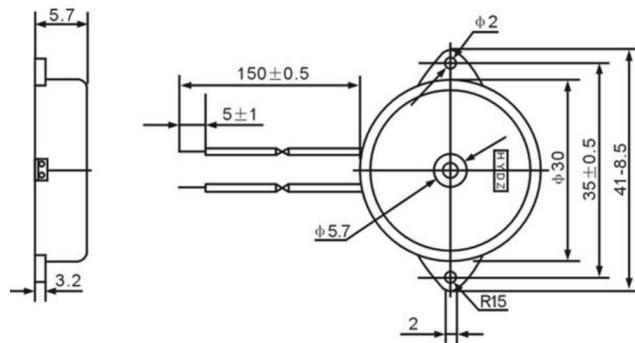


Fig. 39. Ficha técnica de Piezoeléctrico de 30 mm.

Dispositivo piezoeléctrico buzzer.

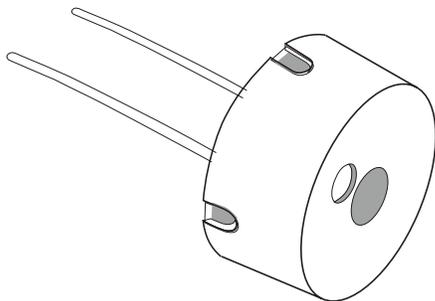


Fig. 40. Piezoeléctrico como bocina.

Éstos piezoeléctricos son utilizados para generar sonidos, tonos y alertas. Es pequeño pero ruidoso, se debe manejar con una onda cuadrada de 3-30 V.

Para usarlo se conecta un pin a una onda cuadrada y el otro pin a una onda cuadrada de un temporizador o microcontrolador.

Para los tonos más fuertes, debe permanecer alrededor de 4 kHz, aunque funciona bien de 2 kHz a 10 kHz

Características.

Utilizados para bocinas de alto rendimiento que emplean elementos piezoeléctricos unimorfos y están diseñados para facilitar la incorporación a diversos circuitos.

Presentan un consumo de energía extremadamente bajo, en comparación con unidades electromagnéticas.

-Detalles técnicos.

Diametro: 11.90 mm

Altura: 6.53 mm

Peso: 0.70 gr

Sensor de vibración piezoeléctrico horizontal pequeño.

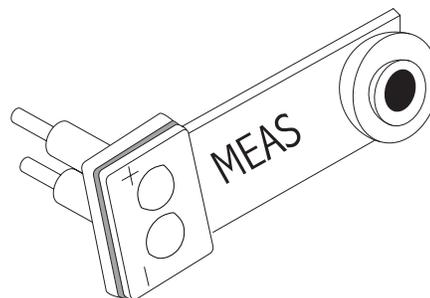


Fig. 41. Piezoeléctrico utilizado como sensor con masa para generar mas vibraciones.

El Minisense 100 de Measurement Specialties es un sensor de vibración en voladizo de bajo costo cargado por una masa para ofrecer alta sensibilidad a bajas frecuencias. Útil para detectar vibraciones y entradas de "toque" de un usuario. Se crea una pequeña CA y una gran tensión (hasta +/- 90 V) cuando la película retrocede un cuarto. Una resistencia simple debería reducir el voltaje a niveles de ADC. También se puede usar para detección de impacto o un interruptor flexible.

Viene con pasadores de máquina que permiten el montaje horizontal.

Hemos visto esto utilizado como grandes entradas musicales.

características:

Película de polímero piezoeléctrico PVDF flexible

Amplio rango dinámico

Laminado para mayor salida de voltaje

Cables amigables para tableros de prueba

Dispositivo piezoeléctrico buzzer 5V.

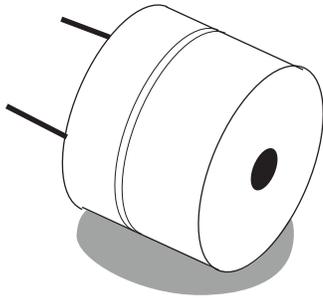


Fig. 42. Piezoeléctrico como bocina de 5 Volts.

Éstos son utilizados para generar sonidos, tonos y alertas. Es pequeño pero ruidoso, se debe manejar con una onda cuadrada de 3-30 V.

Para usarlo se conecta un pin a una onda cuadrada y el otro pin a una onda cuadrada de un temporizador o microcontrolador.

Para los tonos más fuertes, debe permanecer alrededor de 4 kHz, aunque funciona bien de 2 kHz a 10 kHz

-Detalles técnicos.

Diametro: 11.90 mm

Altura: 6.53 mm

Peso: 0.70 gr

Si se quiere escuchar un ruido fuerte, sólo se necesita aplicar de 3 V a 5 V a este piezoeléctrico y se recibirán sonidos de frecuencias de hasta 2 kHz.

Este piezoeléctrico, no necesita una señal de CA, ya que en el interior hay un circuito piezoeléctrico y un circuito del controlador que lo hace oscilar a 2 kHz.

Por un lado funciona muy bien en proyectos, ya que no necesita una señal de control oscilante, pero no se puede cambiar la frecuencia.

-Detalles técnicos

Dimensiones: 12 mm de diametro, 9.7 mm de alto

Los pins tienen 6 mm de largo y 0.3" de separación.

Dispositivo piezoeléctrico con raspberry Pi (Tonos de llamada).

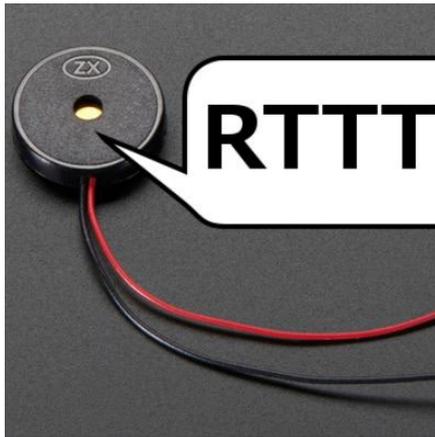


Fig. 43. Piezoeléctrico con raspberry.

Gran alarma piezoeléctrica (16 tonos)

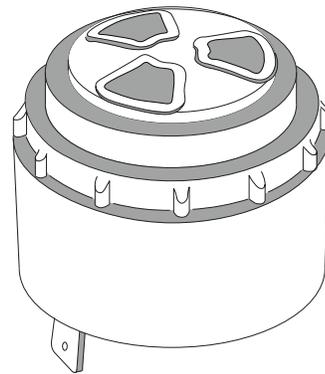


Fig. 44. Gran alarma piezoeléctrica.

El lenguaje de transferencia de texto de tono de llamada (RTTTL) es una forma de representar datos de música para reproducir en teléfonos móviles más antiguos. El formato fue creado por Nokia para sus teléfonos, pero también funciona con pines GPIO y un zumbador piezoeléctrico.

Este proyecto muestra cómo usar los pines GPIO de Raspberry Pi para reproducir RTTTL en un zumbador piezoeléctrico. Este proyecto se inspiró en implementaciones de RTTTL existentes, pero difiere de aquellas en que su interfaz de usuario está habilitada para la Web.

La aplicación, escrita en Java, inicia un servidor HTTP. El servidor HTTP presenta la interfaz de usuario a través de HTML. La interfaz de usuario proporciona una lista de canales RTTTL incorporados disponibles para reproducir. La interfaz de la aplicación también acepta secuencias RTTTL proporcionadas por el usuario, a través de sus controles de entrada sobre la marcha.

Esta alarma piezoeléctrica es una excelente opción para cuando necesitas una alarma audible. Esta alarma tiene 16 opciones de salida diferentes que se pueden cambiar con los interruptores DIP en la unidad. Continuo, Timbre, Intermitente, Trino o Pulsante.

### Gran alarma piezoeléctrica (3kHz)

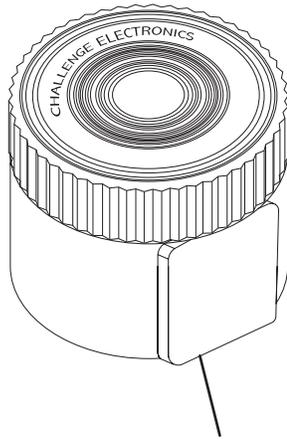


Fig. 45. Alarma piezoeléctrica de 3 kHz.

Ésta alarma piezoeléctrica de 3 kHz es una opción una alarma audible alta. Esta alarma produce un 3 kHz a hasta 100 dB (A) y tiene un rango de entrada de 3 V a 18 V.

### Piezoeléctrico igniter

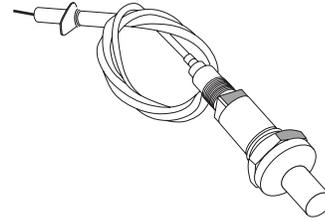


Fig. 46. Piezoeléctrico como sensor de luz.

Éste encendedor piezo se puede utilizar para todo tipo de aplicaciones.

El encendedor tiene aproximadamente 8.89 cm (3.5 pulgadas) de largo, con un barril de 0.65" de diámetro (para el montaje). El cable tiene poco más de 2 pies de largo.

Dispositivo piezoeléctrico de botón.

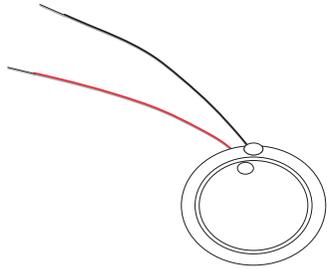


Fig. 47. Piezoeléctrico de botón.

Los elementos piezoeléctricos son útiles cuando se necesita detectar vibraciones o golpes. Puede usar estos para detectar o tocar sensores con bastante facilidad al leer el voltaje en la salida. También se pueden usar para un transductor de audio muy pequeño, como un zumbador.

Sensor de vibración piezoeléctrico masa grande.

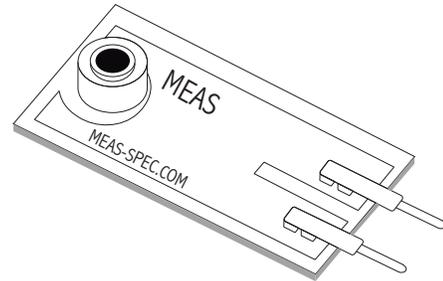


Fig. 48. Piezoeléctrico con masa para generar mayor esfuerzo por carga inercial.

Este sensor piezoeléctrico básico de Measurement Specialties se utiliza a menudo para mediciones de flexión, contacto, vibración y choque. Se crea una pequeña CA y una gran tensión (hasta +/- 90 V) cuando la película se mueve hacia adelante y hacia atrás. Una resistencia simple debería reducir el voltaje a niveles de ADC. También se puede usar para detección de impacto o un interruptor flexible.

Viene con pernos de engarce soldables y una masa unida a la punta. Esta masa aumenta la sensibilidad al movimiento. Características:

- Película de polímero piezoeléctrico PVDF flexible
- Amplio rango dinámico
- Laminado para mayor salida de voltaje
- Pistas fáciles de tablero de prueba de 0.1 "

Sensor de vibración piezoeléctrico grande.

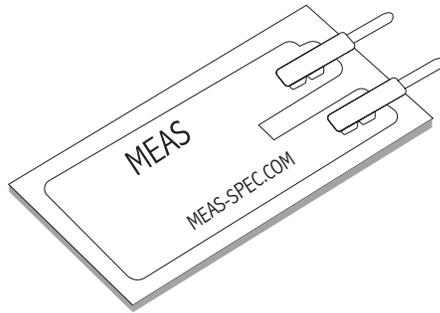


Fig. 49. Piezoeléctrico con película de polímero.

Este sensor piezoeléctrico básico de Measurement Specialties se usa a menudo para mediciones de flexión, tacto, vibración y choque. Se crea una CA pequeña y un voltaje grande (hasta +/- 90 V) cuando la película se mueve hacia adelante y hacia atrás. Una resistencia simple debería reducir el voltaje a los niveles de ADC. También se puede utilizar para la detección de impacto o un interruptor flexible.

Características:

Película de polímero piezoeléctrico PVDF flexible  
Amplio rango dinámico  
Laminado para mayor salida de voltaje  
Cables amigables de 0.1 "

Sensor de vibración piezoeléctrico vertical pequeño.

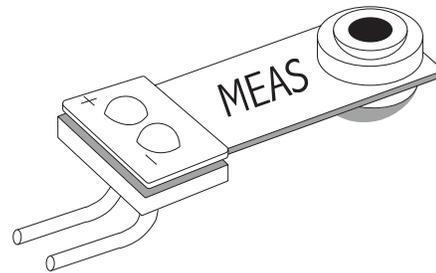


Fig. 50. Piezoeléctrico con masa en voladizo.

El Minisense 100 de Measurement Specialties es un sensor de vibración en voladizo de bajo costo cargado por una masa para ofrecer alta sensibilidad a bajas frecuencias. Útil para detectar vibraciones y entradas de "toque" de un usuario. Se crea una pequeña CA y una gran tensión (hasta +/- 90 V) cuando la película retrocede un cuarto. Una resistencia simple debería reducir el voltaje a niveles de ADC. También se puede usar para detección de impacto o un interruptor flexible.

Viene con pasadores de soldadura que permite el montaje vertical.

Características:

Película de polímero piezoeléctrico PVDF flexible  
Amplio rango dinámico  
Laminado para mayor salida de voltaje  
Cables amigables para tableros de prueba

Ruido urbano, energía limpia.

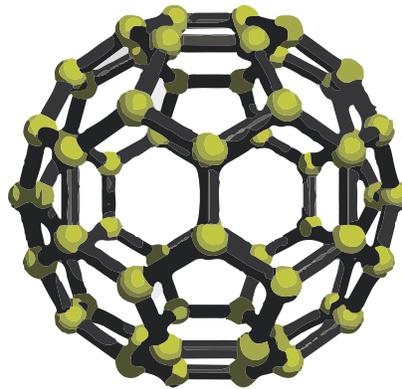


Fig. 51. Esfera piezoeléctrica para captación de sonido.

Mediante sensores piezoeléctricos, se desarrolló un sistema que es capaz de captar el sonido, ya que este siempre se encuentra presente y es independiente de las condiciones climáticas y de los horarios, la única variación que presenta es en el cambio de niveles de intensidad.

El sistema consiste en un panel de forma esférica de 31 caras, diseñadas en fulleno. En él hay dos sensores piezoeléctricos por cada cara (los sensores están compuestos de polifluoruro de vinilo, PVDF, con masa y sensores de disco de latón) que se encuentran conectados a un circuito principal que recibe tres señales.

La estructura es de forma esférica ya que el sonido incide en distintas direcciones. El sistema funciona con la vibración producida por el ruido urbano, las cuales convierten la energía mecánica en energía eléctrica, ésta electricidad es ingresada en un circuito, en donde se almacena o se utiliza al momento.

Aunque es poco voltaje lo que se produce, el circuito cosechador siempre está funcionando y consume la misma energía que cosecha, y la captación es constante.

Otro punto importante por mencionar, es en donde se podría colocar este dispositivo, sólo se necesitan lugares en donde haya demasiado ruido, en avenidas, en fachadas de edificios o azoteas, con una altura de 2.5 m como mínimo.

Actualmente el prototipo de este proyecto, está en etapa de depuración para obtener mejores resultados, se planea que este listo en un plazo de 10 años, funcionando en exteriores, si fuera en interiores, podría ser un plazo de 15 años.

Este sistema, fue desarrollado por el ingeniero de la UNAM Jesús Torres Jurado, en el año 2015.

## Jardines piezoeléctricos para trolebuses en Belgrado.



Fig. 52. Utopía de jardines piezoeléctricos.

La arquitecta encargada de este proyecto es Margot Krasojevic, ella hace arquitectura onírica, que esta conformada por formas y diseños inusuales, su objetivo es que todos sus proyectos impacten demasiado visualmente e incluye diferentes tipos de materiales inteligentes para aprovechar el medio ambiente y los recursos naturales.

Éste es el segundo proyecto para los jardines y planea utilizar energía vibratoria como un tipo de movimiento cinético el cual genera energía eléctrica. La ciudad de Belgrado, Serbia, utiliza trolebuses como uno de los principales medios de transporte, éstos son vehículos eléctricos que son amigables con el medio ambiente,

Los piezoeléctricos serán colocados en los cables que alimentan de corriente eléctrica a los trolebuses, la idea es que el movimiento de los trolebuses al pasar e incluso hasta la lluvia genere tensiones en este material, y así generar electricidad.

Este diseño genera: iluminación en calles, acceso a WiFi, puertos adaptables de energía. Así estas estaciones de trolebuses funcionarán como un capacitor y transistor que transformará la corriente alterna en corriente directa.

Belgrado, Serbia.

Las autopistas y las vías de tren serán en el futuro una fuente de energía.



Fig. 53. Carretera piezoeléctrica.

Innowatech es una empresa preocupada por el cuidado del medio ambiente, ellos se dedican a la utilización de energías renovables.

En colaboración con el instituto de tecnología de Israel, desarrollaron un prototipo para la utilización de energías renovables. Han logrado cosechar la energía mecánica desperdiciada transformándola en energía eléctrica y poder utilizarla de diferentes formas.

La idea de esta empresa es utilizar piezoeléctricos debajo del asfalto de las autopistas y también de las vías de los trenes. Éstas son capaces de generar energía a través de la temperatura, el peso y las vibraciones de los vehículos que pasan por encima.

Se produce electricidad a base de energía mecánica, convierte la energía mecánica de la carretera en electricidad, la cual es captada en baterías o conectada directamente a la iluminación de estas carreteras.

Ésta solución es una alternativa sustentable a otras soluciones aplicadas en los costados de las carreteras. Pueden producir 200 kWh por hora en una distancia de 1km.

Ésta energía es suficiente para suplir 250 hogares con electricidad. Las ventajas son que esta tecnología puede funcionar en cualquier clima y puede adaptarse a las infraestructuras existentes, sin necesidad de construir nuevas carreteras.

Israel.

Generar energía con las carreteras.



Fig.54. Vista aérea de la carretera M30, de Madrid, España.

Éste es un proyecto dirigido por Antonio Pérez Lepe, del centro de tecnología de Repsol. Uno de los objetivos de esta empresa es crear infraestructuras de transportes inteligentes y activas, en donde las carreteras no solamente sean vías de comunicación, sino también sean un elemento para poder generar energía.

Las investigaciones para poder llevar a cabo el proyecto han sido realizadas por técnicos de organismos públicos y privados en los que se incluyen: ingenieros químicos, físicos, ingenieros en materiales e ingenieros electricistas. Ésta investigación analiza la capacidad de las infraestructuras activas capaces de generar energía de forma eficiente y respetar el entorno. El proyecto utilizó dos formas de captura de energía: Piezoeléctricos y fotovoltaicos.

En cuanto a piezoeléctricos, las carreteras se sembrarán de receptores y captadores de energía de bajo voltaje, de los cuales se recolectará energía. El uso de ésta energía está destinada a iluminación, seguridad vial, control de tráfico e incluso hasta el mantenimiento de la misma infraestructura.

La idea es poner los piezoeléctricos enterrados a una distancia corta en el pavimento, para que los vehículos que pasen, transmitan la presión y vibración hacia estos materiales y así generar electricidad.

Este proyecto se inició en 2012 en Repsol, logrando un prototipo, en donde se obtuvieron valores reales acerca de la energía recuperada, y así poder crear un modelo real.

Se estimó que se podría producir 1kW-h por cada 12 m de carretera, aunque no todas las carreteras podrían tener esta tecnología, ya que se necesita que sean carreteras concurridas, porque los piezoeléctricos necesitan de una gran cantidad de impactos para poder generar energía.

Ellos han demostrado que la tecnología es viable gracias al prototipo, en cuanto a cantidad y calidad de energía recuperada. Se podría abastecer una carretera a base de iluminación LED, y en cuanto al costo la inversión se puede recuperar de cinco a seis años desde la instalación.

Se necesitan sensores autónomos inalámbricos, que no necesiten baterías ya que esto hace que el tamaño del piezoeléctrico sea mas pequeño, con una duración máxima de dos a tres años.

Con ésto quieren lograr que haya ciudades inteligentes y que se aprovechen los recursos naturales, para la generación de energías.

Madrid, España.

En el metro de Tokio, los viajeros generan electricidad con sus pisadas.



Fig. 55. Estacion de Shibuya, Tokio.

La compañía inglesa llamada East Japan Railway Company, ha instalado en distintas estaciones del metro de Tokio, pasos peatonales en donde se encuentran los materiales piezoeléctricos instalados en el piso.

Éstos materiales se encuentran ubicados dentro de las estaciones, en los torniquetes y son capaces de recoger la energía almacenada al caminar sobre ellos.

Éste proyecto todavía está en fase de prueba y sólo funciona para mantener prendido un cartel que indica la cantidad de energía generada por los mismos.

Con el sistema funcionando al 90% de su capacidad se logran obtener 10 watts por segundo. Con el proyecto mejorado, se esperan conseguir unos 1400 kw por segundo cada día.

Éste proyecto prueba, comenzó en el año 2008, se espera que con esta energía generada funcionen las máquinas de lectura de los tickets y los carteles electrónicos.

Tokio, Japón.

Pavegen systems.



Fig. 56. Corredor con sistema piezoeléctrico de Pavegen systems.

Pavegen systems es una empresa británica fundada en 2009, líder en la cosecha de energía basada en pisadas, su visión es crear entornos construidos inteligentes y sostenibles que conecten a las personas.

La tecnología de Pavegen systems es un sistema de pisos multifuncionales personalizado, mientras las personas pisan las baldosas, su peso hace que los generadores de inducción electromagnética, generen electricidad.

Cada baldosa, cuenta con un dispositivo inalámbrico que transmite los datos de movimientos en tiempo real, mientras que produce poder cuando y donde es necesario, incluso Pavegen también puede conectarse a dispositivos móviles y sistemas de administración de edificios.

El objetivo de esta empresa es convertirse en una solución permanente y comercial de baldosas inteligentes. La tecnología de estas baldosas, se divide en tres partes: datos, pisos y energía.

-Datos: Captura la información de cada paso. Cada baldosa, está equipada con un transmisión de datos para capturar información inalámbrica de cada paso.

Moneda digital: Cada paso cuenta Caminando sobre las baldosas de pavegen y conectándose a una aplicación de celular, cada paso recolectado es convertido en monedas digitales que pueden ser utilizadas para causas caritativas.

Seguimiento de pisadas: Análisis de patrones de consumo El sistema Pavegen monitorea las pisadas, así prediciendo tiempos pico y ubicaciones principales. También el diseño proporciona un análisis de los patrones de movimiento.

Mapeo de calor: Identificación de puntos calientes de pisadas. El comportamiento del consumidor se puede entender midiendo la intensidad de pasos y también midiendo el número de personas que caminan dentro de un área.

-Pisos: A medida de soluciones de pavimentos inteligentes. Acabados personalizados: Integración perfecta.

Pavegen utiliza el vinil comercial en la superficie superior. Existen 4 tipos de pisos: lisos, goma, resina y seguridad, así que se pueden adaptar dentro y fuera de los espacios.

Marca integrada: Creatividad ilimitada. Las superficies de los pisos se pueden adaptar a cualquier diseño.



Fig. 57. Colocación de piezoeléctricos.

Diseño único: Ningún paso es desperdiciado. El diseño de las baldosas es de forma triangular, maximizando la producción de energía y captura de datos.

-Energía: Convirtiendo energía cinética a electricidad renovable.

Luz inteligente: Eficiente y responsable. Crearon una matriz LED a medida, son exclusivos de Pavegen con una eficiencia del 90% a comparación de otros controladores que solo tienen el 50%. Pavegen crea soluciones de iluminación receptivas, impulsados por las pisadas de los visitantes.

Camina a la luz: Enciende el camino. Pavegen es una solución inteligente de iluminación, mientras que caminas, ilumina. Mejorando la red de iluminación en espacios públicos.

Esta compañía tiene 2 tipos de productos: los permanentes y los que solo son utilizados en eventos (provisionales).

-Permanentes: The Pavegen V3. Éste modelo ha ido mejorando, siendo más eficiente, generando 200 veces mas poder que el primer modelo en 2009. El diseño triangular maximiza energía y captura

de datos, mientras que su alta durabilidad y capacidad de despliegue, permite adaptarse a cualquier ubicación.

Especificaciones del producto:

Dimensiones: 500 mm de cada lado

Potencia: 5 watts de potencia a partir de pasos

Voltaje: 48 V (Rango 12V-48V)

Materiales: Acero, Aluminio reciclado, compuesto.

Tamaño mínimo de pedido: Matriz de 2x4 m

Certificación: Cumple con CEM, con marcado CE, cumple con UL.

-Eventos: Pavegen LIVE. (Tipo 2: Provisionales)

Ésta parte de pavegen se dedica a trabajar con empresas para crear eventos y así nuevas experiencias mediante la tecnología cinética. Las baldosas Pavegen Events, se ensamblan fácilmente y su instalación es muy rápida.

Éstas también son compatibles para diferentes aplicaciones, y pueden personalizarse las baldosas desde el celular. Sólo se utilizan por poco tiempo.

Londres, Reino Unido.

Strawscraper, edificio ecológico y autosuficiente.



Fig. 58. Propuesta de fachada en el edificio.



Fig. 59. Vista del edificio actual.

El proyecto está ubicado en Estocolmo, el edificio se terminó en 1997 y fué diseñado por el arquitecto Henning Larsen. La propuesta es incorporar a éste edificio, que es uno de los mas altos de ésta ciudad, una extensión estructural y una cubierta compuesta por filamentos piezoeléctricos agitados por el viento generando electricidad, hecho por el despacho Belatchew Architects.

Éste tipo de energía renovable, hará que este rascacielos sea “energía cero”, lo cual significa que se abastecerá él mismo de toda la electricidad que necesita. El proyecto no tiene una restricción en cuanto a la velocidad del viento, ya que sus fibras piezoeléctricas requieren una corriente ligera. La fachada del edificio consiste en un material compuesto con propiedades piezoeléctricas que convierten el movimiento en energía eléctrica.

-Ventajas:

La tecnología que ocupan es silenciosa no como las turbinas eólicas tradicionales.

No interfiere con la vida animal como las turbinas.

Funciona con poco estrés por el viento.

El término de ésta construcción será en el año 2030.

Estocolmo, Suecia.

# 4 | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, HIPÓTESIS, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

## CONCLUSIÓN DEL ANÁLISIS DEL ESTADO DE ARTE.

En México ha crecido de manera exacerbada, la demanda de electricidad para su consumo en edificaciones ya que es una de las urbes mas grandes del mundo, lo que trae en consecuencia que se exija más cantidad de enegía generada por las centrales eléctricas convencionales, generando más contaminantes que afectan la salud de la sociedad y destruyen el entorno.

Las investigaciones en relación con materiales inteligentes han dado paso a la generación de electricidad más sostenible, como lo son los piezoeléctricos. Existen diferentes proyectos en los que los piezoeléctricos han sido empleados como: edificios, pavimentos y losetas que ayudan a la generación de energía electrica, e incluso se han considerado como una alternativa a la utilización del ruido urbano para la generación de energía eléctrica con piezoeléctricos.

Las diferentes formas de utilización de estos materiales han sido satisfactorias, aunque para el desarrollo de estrategias para la cosecha de energía, aún los estudios efectuados han sido insuficientes.

## PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

Una vez revisados los avances y aplicaciones de la piezoelectricidad como un sistema auxiliar de generación de energía eléctrica se concluye preliminarmente que puede ser factible la utilización de piezoeléctricos para la generación de energía eléctrica para su uso en iluminación en edificios utilizando el ruido como fuente de energía.

Con base en lo anterior se plantea el problema de estudio a través de la pregunta de investigación siguiente:

¿Cómo disminuir el consumo eléctrico de edificios en zonas urbanas mediante una fachada piezoeléctrica en la Ciudad de México que aproveche las vibraciones generadas por el ruido urbano?

## HIPÓTESIS

Diseñando una fachada piezoeléctrica que aproveche las vibraciones del ruido urbano que incide sobre los edificios en zonas de alta densidad de ruido para excitar piezoeléctricos y que se pueda generar energía eléctrica utilizable.

## JUSTIFICACIÓN

La Ciudad de México es una de las ciudades más grandes del mundo, por lo que la demanda por el consumo energético aumentan cada vez mas.

Para poder generar energía eléctrica, se necesitan diferentes procedimientos, los cuales son los mayores contaminantes en el mundo, una solución a este gran problema, son las alternativas a las energías convencionales, llamadas energías renovables, que son fuentes de energías limpias e inagotables que existen de manera abundante en el planeta.

Muchas de las energías renovables, sólo utilizan recursos naturales, y se ha dejado de lado el poder utilizar los recursos de desecho para poder generar energía. Éstos recursos de desecho se refiere a poder utilizar los diferentes tipos de contaminación para poder generar energía eléctrica.

En las ciudades existen diferentes tipos de contaminación, ya sea sonora, del aire, del agua, entre otras que afectan a la salud de los habitantes. Un recurso de desecho importante es el ruido, junto con materiales inteligentes, se puede generar energía eléctrica de manera sustentable y eficiente para poder reducir la contaminación en las ciudades.

Se debe tomar en cuenta que la mayoría de las ciudades no tienen los mismos problemas, pero al ser la Ciudad de México una de las mayores urbes en el mundo, ocupa el octavo lugar con mayor contaminación sonora del mundo.

Ésta contaminación puede ser utilizada con sistemas alternativos de energía como los piezoeléctricos, es decir, la cosecha de energía (“Energy harvesting”).

Ya que en nuestros días el campo de investigación hacia los materiales inteligentes utilizados en edificios o espacios públicos en ciudades también son una alternativa a las energías convencionales.

## OBJETIVOS

Objetivo general.

Diseñar una fachada con piezoeléctricos para evaluar la factibilidad de la utilización de las vibraciones del ruido en la Ciudad de México, y así generar energía eléctrica utilizable para iluminar espacios, considerando un espacio de oficinas simple como caso de estudio.

Objetivos específicos.

- Estudiar fuentes sonoras con niveles sonoros de 50, 100 y 120 dB a diferentes frecuencias de 100, 500 y 1000 Hz cada uno, para evaluar la factibilidad de generación de electricidad mediante vibración.

- Diseñar una fachada piezoeléctrica que pueda generar vibraciones mediante el ruido.

- Diseñar iluminación utilizando el cálculo de la intensidad lumínica del espacio.

- Diseñar y simular sistema de cosecha de energía en MultiSIM, con un circuito eléctrico que conecte cuatro piezoeléctricos en serie y en paralelo.

# 5 |

# METODOLOGÍA

## 5 | 1.1 REVISIÓN DE LITERATURA

Eduardo Saad Eljure.

La Ciudad de México es una de las ciudades más grandes del mundo, lo que trae como consecuencia distintos tipos de contaminación, que afectan la salud de las personas.

Existe un tipo de contaminación que no es tan perceptible como las demás pero siempre está ahí; la contaminación sonora. Para poder describir mejor lo que es la contaminación sonora, se revisaron distintos artículos sobre el ruido en la Ciudad de México; “El ruido en la Ciudad de México” de José Antonio Peralta, el cual describe los niveles permisivos del ruido por hora y las avenidas con mas ruido en esta ciudad, también un artículo del periódico Excelsior: “CDMX, octava urbe con mayor contaminación acústica del mundo”, en donde se explica como el ruido puede propiciar diversas patologías en las personas e indica, desde el título, el nivel que ocupa mundialmente la Ciudad de México en cuanto contaminación auditiva, otro artículo más fue: “La ruidosa Ciudad de México”, que habla sobre los niveles de contaminación sonora en las alcaldías de la Ciudad de México.

Para poder hablar sobre el ruido en general, en donde se encontraron los decibels y frecuencias máximas del ruido, se revisó el libro del “Acústica en arquitectura” del maestro

Con esta información el siguiente paso, fue escoger el piezoeléctrico; un elemento piezoeléctrico 7BB-15-16 de botón de encapsulado de bronce, el cual es un piezoeléctrico, que está en el mercado y es muy fácil de encontrar, se necesitaban algunas características específicas, ésta información se revisó en Adafruit, en donde se encontró la ficha técnica de este elemento. Esta clase de piezoeléctrico se seleccionó también debido a que el tipo botón se ha utilizado para sistemas que sensan vibraciones e impactos (como se indicó en el Análisis del Estado de Arte).

Teniendo los conceptos básicos para el proyecto, se diseñó una fachada, utilizando diferentes análogos, el principal análogo, fue un edificio en Estocolmo, Suecia, llamado “Strawscraper”, que genera energía eléctrica, pero utilizando el viento, está propuesta no es factible en la Ciudad de México, por que la frecuencia del viento es demasiado variante para poder ejercer una presión en el piezoeléctrico elegido, otros análogos de fachadas eólicas, fueron los de Ned Kahn, un arquitecto de Estados Unidos, que ha trabajado con fachadas de materiales ligeros para que puedan moverse con el viento.

Para lograr el proyecto de investigación, se diseñó en un programa llamado MultiSIM, un circuito eléctrico utilizando diferentes fuentes de información en donde utilizaban también piezoeléctricos, no para fachadas sino para pisos, e incluso en zapatos, las cuales fueron: “Principios de electrónica” de Malvino, P.

También se revisó literatura de conceptos de física para circuitos eléctricos, en el libro “Física Universitaria con física moderna” de Young y Freedman, conceptos como: carga eléctrica, diferencia de potencial, campo eléctrico, y por último utilizando información para entender mejor el fenómeno de piezoelectricidad, se utilizaron distintos artículos, en donde se describen los diferentes tipos de materiales piezoeléctricos que existen, los antecedentes de la piezoelectricidad, como funcionan y como usar los tipos de materiales piezoeléctricos.

Con la información recaudada se llevó a cabo el proyecto final, que es generar energía eléctrica utilizable para edificios en la Ciudad de México, utilizando las vibraciones del ruido para excitar una fachada piezoeléctrica.

## 5 | 1.2 CARACTERÍSTICAS DEL PIEZOELÉCTRICO EMPLEADO

Se diseñó una fachada piezoeléctrica, utilizando los piezoeléctricos de botón de encapsulado de bronce modelo 7BB-15-16, cuya hoja de datos se presenta en la tabla XX.

Tabla 1. Hoja de datos del piezoeléctrico 7BB-15-16. “Piezoelectric Sound Components”, (2002).

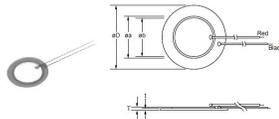
### Piezoelectric Diaphragms

#### ■ Features

1. Clear sound
2. Ultra thin and lightweight
3. No contacts; therefore, no noise and highly reliable
4. Low power consumption for voltage type

#### ■ Applications

Clocks/Calculators/Digital camera/Various alarms (Burglar alarms, etc.)



#### External Drive Type

Part Number	Resonant Frequency (kHz)	Resonant Impedance (ohm)	Capacitance (nF)	Plate Size dia. D (mm)	Element Size dia. a (mm)	Electrode Size dia. b (mm)	Thickness T (mm)	Plate Thickness t (mm)	Plate Material
7BB-12-9	9.0 ±1.0kHz	1000 max.	8.0 ±30% [1kHz]	12.0	9.0	8.0	0.22	0.10	Brass
7BB-15-6	6.0 ±1.0kHz	800 max.	10.0 ±30% [1kHz]	15.0	10.0	9.0	0.22	0.10	Brass

Con una frecuencia resonante de 6 a 1 kHz

Capacitancia de 10 nF con tolerancia del 30% a 1 kHz  
Diámetro de 15 mm y un a diámetro del elemento de 10 mm  
Impedancia resonante de 800 ohms

## 5 | 1.3

## MODELO ELECTROMECAÁNICO DEL PIEZOELÉCTRICO

MultiSIM es un software utilizado para diseño y generación de prototipos de circuito y simulación electrónica. Éste programa tiene diferentes elementos para poder crear circuitos, existe un elemento llamado “Crystal” el cual es utilizado como un piezoeléctrico. En este caso el elemento anterior no funciona como piezoeléctrico, ya que se necesita simular dos elementos importantes; el sonido (como energía que funciona para deformar el piezoeléctrico) y las vibraciones. Por lo tanto como un análogo a un piezoeléctrico se simuló un modelo electromecánico el cual es dividido en 2 partes.

1. Parte mecánica
2. Parte eléctrica

La parte mecánica consiste en la simulación del ruido mediante un generador de corriente gobernado por un voltaje, ya que el ruido son ondas mecánicas y la simulación de la vibración del piezoeléctrico.

La parte eléctrica consiste en la simulación de la generación de corriente en el piezoeléctrico y la intensidad de corriente en este.

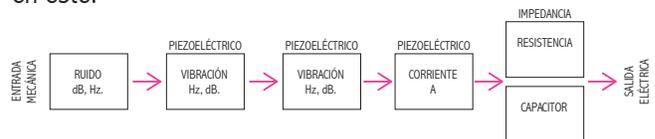


Fig. 60. Diagrama de bloques del piezoeléctrico.

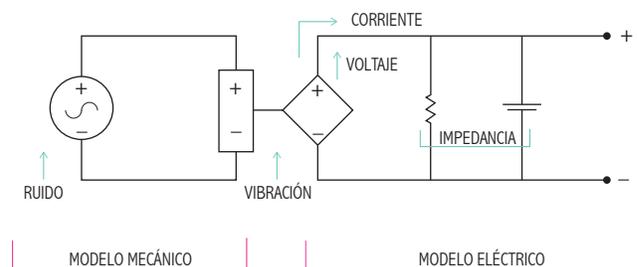


Fig. 61. Esquema del funcionamiento del piezoeléctrico.

## 5 | 1.4

## CASO DE ESTUDIO: ILUMINACIÓN

Para lograr generar energía eléctrica mediante piezoeléctricos, se tomó en cuenta lo mencionado en el punto 3 | 1.1 sobre los niveles de ruido en la Ciudad de México.

Se diseñó un edificio de oficinas, sin tomar en cuenta las Normas técnicas complementarias del reglamento de construcciones para Distrito Federal.

Las cuales mencionan que para iluminación natural es necesario tener un área de ventanas para iluminación no inferior al 17.5% del área del local en todas las edificaciones, así como los vidrios o cristales de las ventanas de piso a techo en cualquier edificación debe cumplir con la Norma Oficial NOM-146-SCFI, con excepciones.

Para iluminación artificial se deben tomar en cuenta los luxes mencionados en el reglamento de construcciones para el Distrito Federal, en éste caso se utilizan los mencionados en el apartado de servicios, tomando en cuenta que es un edificio de oficinas, será de 200 a 500 luxes, dependiendo de los detalles que se quieran apreciar.

Las condiciones complementarias a la tabla mencionada anteriormente, son las siguientes:

I. El nivel de iluminación artificial para circulaciones verticales y horizontales, así como elevadores en todas las edificaciones, será de 100 luxes;

II. El porcentaje de iluminación de emergencia debe realizarse conforme a la tabla 3.7, y

III. El Director Responsable de Obra debe cumplir, en su caso con lo dispuesto en las siguientes Normas Oficiales Mexicanas:

NOM-001-SEDE, “Instalaciones eléctricas (utilización)”;  
NOM-007-ENER, “Eficiencia energética para sistemas de alumbrado en edificios no residenciales”;

NOM-013-ENER, “Eficiencia energética en sistemas de alumbrado para vialidades y exteriores de edificios”;

NOM-025-STPS, “Condiciones de iluminación en los centros de trabajo”. (Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, 2019)”



Fig. 62. Croquis de localización

Se diseñó un espacio de oficinas localizado en una de las avenidas más transitadas en la Ciudad de México, en una de las Alcaldías más ruidosas, en donde los niveles de ruido sobrepasan los niveles permisibles, Alcaldía Coyoacán, en la avenida Insurgentes Sur.

La dirección es Av. de los Insurgentes Sur, Copilco Universidad, Copilco el bajo, Coyoacán, 01000 Ciudad de México, CDMX.

Fig. 62. Croquis de localización.

Para diseñar la iluminación y el cálculo del número de lámparas Led's se necesitan en el espacio, fué necesario diseñar el edificio de oficinas.

El edificio cuenta con cuatro plantas; planta baja (acceso) en donde se ubica la recepción, vestíbulo, sanitarios, circulaciones verticales y espacios de áreas verdes. Está conformado por dos plantas tipo, en donde se ubican la sala de juntas, sanitarios, espacio de trabajo colaborativo, zona común y el espacio de oficinas, y por último, azotea, en donde solo estarán servicios de mantenimientos.

El espacio que se utilizó para calcular la iluminación fue el de el espacio de oficinas, en donde se encuentran los escritorios y es un área abierta.

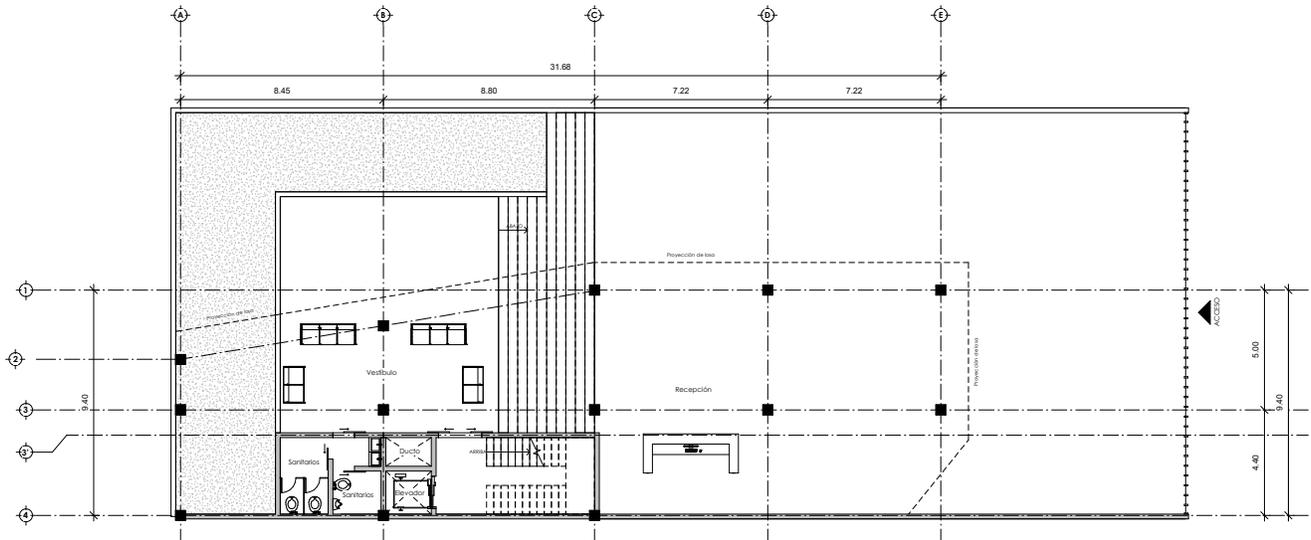


Fig. 63. Planta baja, acceso al edificio de oficinas, en donde se encuentran: recepción, sanitarios, vestibulo, circulaciones verticales y patios.

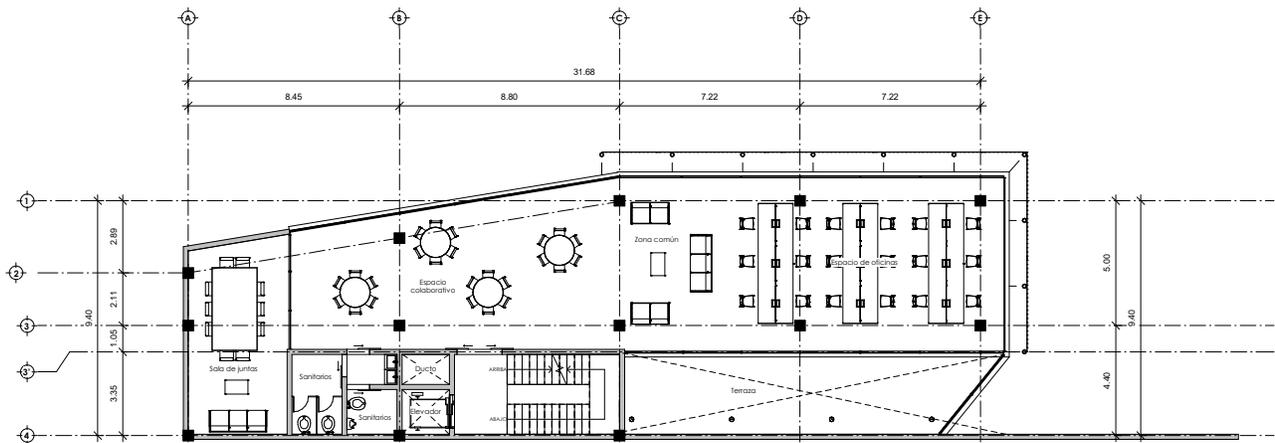


Fig. 64. La planta tipo de este edificio de oficinas, está conformado por sala de juntas, espacio colaborativo, zona común, escritorios, sanitarios y circulación vertical.

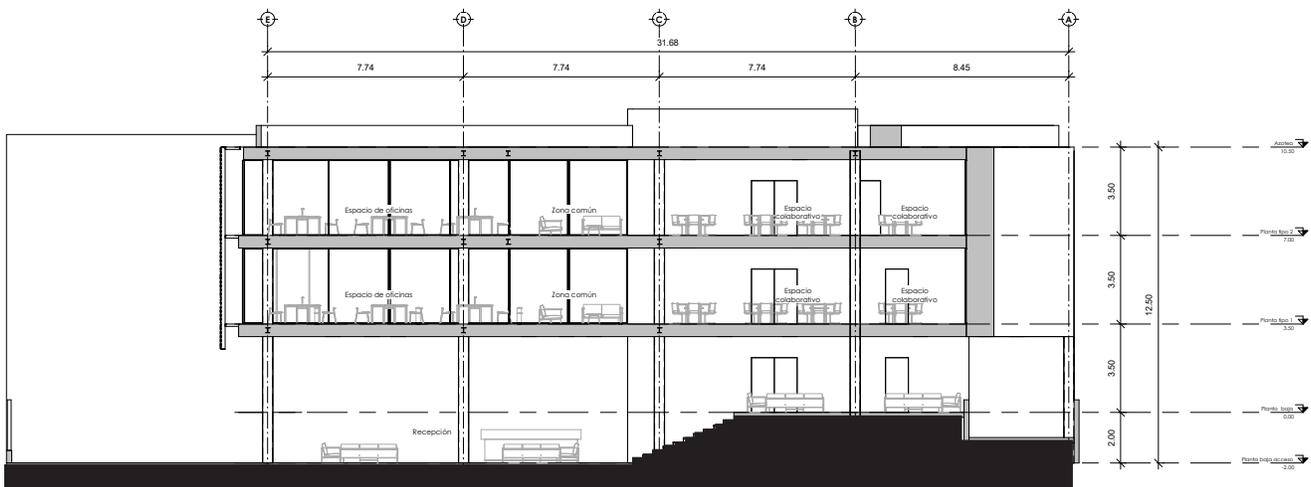


Fig. 65. Corte arquitectónico



Fig. 66. Vista desde terraza a interior de oficinas.



Fig.67. Vista interior de oficinas.

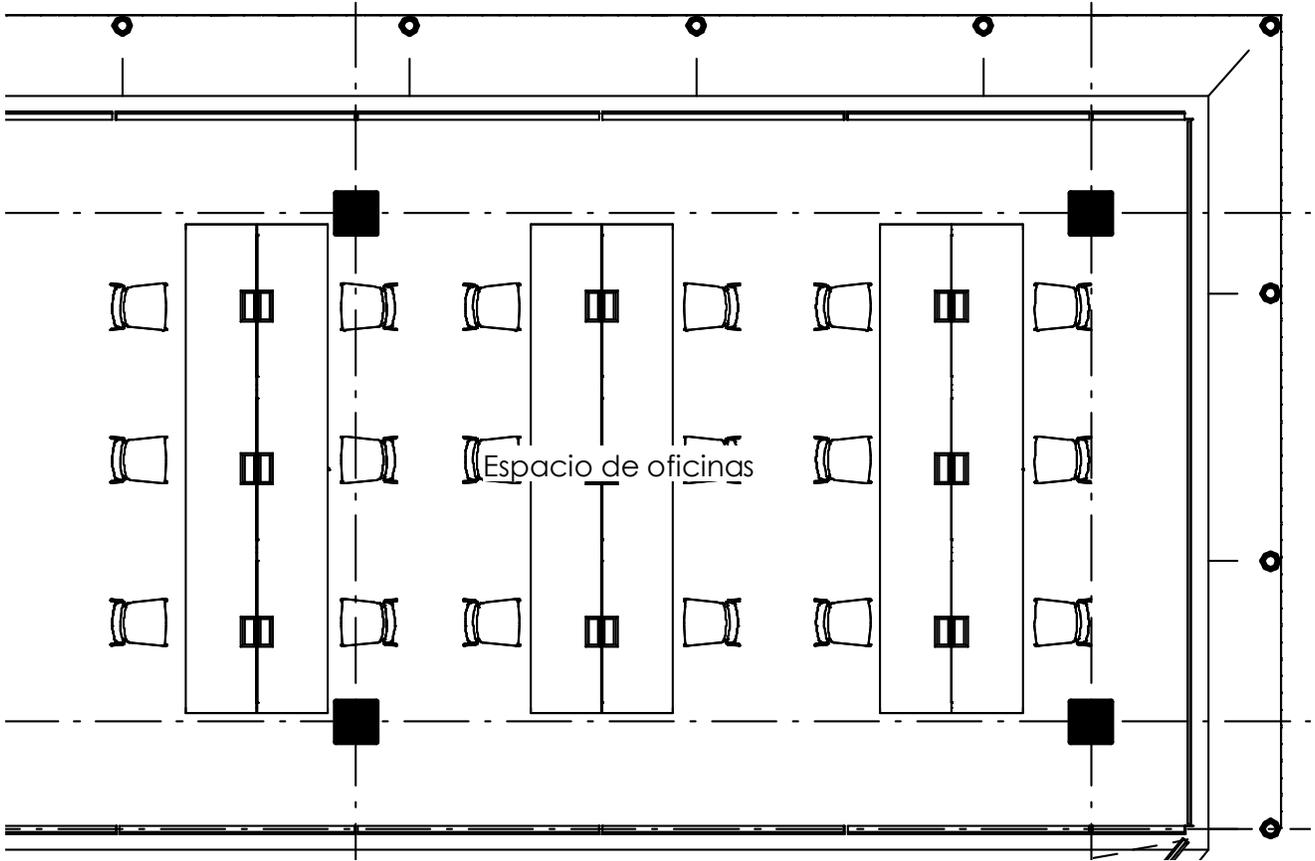


Fig. 68. Espacio de oficinas a iluminar.

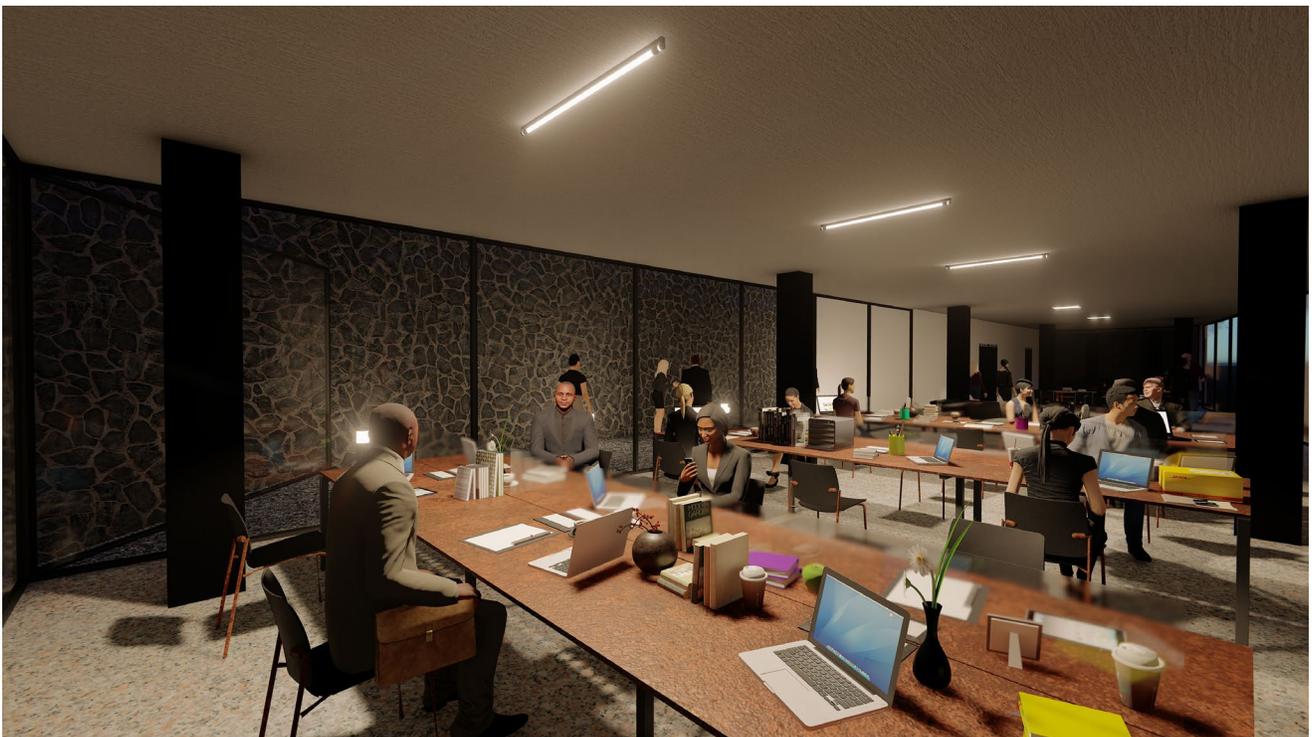


Fig. 69. Espacio de oficinas iluminado.

Para realizar el dimensionamiento de la iluminación de los espacios se empleó el método de la cavidad (Enríquez Harper, 2000) considerando que el espacio de oficinas a iluminar tiene dimensiones de 9.50 m por 5.00 m (haciendo un área de piso de 47.50 m<sup>2</sup>) y una altura interior de piso a techo de 3.00 m.

Se consideraron las reflectancias de techo, piso y muros del 80%, 10% y 50%, respectivamente. Se consideró un estado de la iluminación, con base en su mantenimiento del 77.5%.

Para fines de análisis, se consideró toda la iluminación como iluminación directa.

$$h = z + 0.75 \quad (1)$$

La obtención de la intensidad lumínica para un espacio depende de las relaciones dimensionales del espacio a estudiar. Estas relaciones se obtienen a través de la relación del local (Rel. Local) que es función del largo del espacio (l), el ancho del espacio (w) y la altura de la cavidad del espacio (h). Esto se define en la ecuación 2.

$$Rel. local = \frac{wl}{h(w + l)} \quad (2)$$

La intensidad lumínica depende del coeficiente de mantenimiento o de estado de mantenimiento, indicado del 77.5% (Cb) y del coeficiente de utilización (Ca) que se define como un factor corrección de utilización de las lámparas con base en las dimensiones del espacio. El coeficiente de utilización se encuentra tabulado y para su obtención es preciso realizar una interpolación lineal, tal como se expresa en la ecuación 3.

$$Ca = Ca_a + (Rel. local - Rel. local_a) \frac{Ca_b - Ca_a}{Rel. local_b - Rel. local_a} \quad (3)$$

Donde los subíndices a y b indican los datos tabulados inmediatamente anterior e inmediatamente posterior, respectivamente, a la relación del local calculada, como a los coeficientes de utilización buscados.

La intensidad lumínica (E<sub>esp</sub>) se calcula finalmente en función del requerimiento lumínico (E<sub>req</sub>), el área de piso (A<sub>piso</sub>) y los coeficientes de mantenimiento (Cb) y de utilización (Ca) acorde a la ecuación 4.

$$E_{esp} = \frac{E_{req} A_{piso}}{Ca Cb} \quad (4)$$

Los datos obtenidos fueron:

$$A_{piso} = wl = (9.50) * (5.00) = 47.50 \text{ m}^2$$

$$h = z + 0.75 = 3 + 0.75 = 3.75 \text{ m}$$

$$Rel. local = 0.84$$

$$Cb = 0.775$$

$$Ca = 0.476$$

$$E_{req} = 215 \text{ Lux}$$

El espacio está destinado a oficinas, por lo que el requerimiento lumínico es de 215 Lux. Para el área de piso dada, el estado de mantenimiento del espacio y la relación de local con cavidad la intensidad lumínica total que se calculó fue de 228 286.05 Lm.

Se seleccionaron lámparas LED para proporcionar la iluminación. Se proponen LEDs de luz blanca con una intensidad lumínica de 645 Lm. Se requirieron 44 lámparas para proporcionar esa cantidad de iluminación. Sin embargo, por distribución se emplearon 45 lámparas.

La potencia de cada lámpara es de aproximadamente 9.8 W, por lo que el consumo eléctrico de todo el sistema es de 441 W.

## 5 | 1.5

Para el diseño de la fachada se realizó una investigación de análogos, los cuales se basaron en fachadas que como características tengan el funcionamiento con el viento, agua, o que las personas puedan interactuar con ellas.

Otra característica importante, que se debe tomar en cuenta, pero en esta investigación no se tomó, es el material con la que se fabricará la fachada, ya que debe ser algún material ligero, económico y de fácil mantenimiento.

## DISEÑO DE LA FACHADA

Las fachadas que se utilizaron como análogos para el diseño, fueron las de Ned Khan, quien es un artista y escultor de Estados Unidos, él cual hace que sus obras interactúen con la naturaleza.

Se diseñaron módulos de 1.00 m x 1.00 m colgados a lo largo y alto de la fachada con una estructura de acero, cada panel de 1m<sup>2</sup> contiene 18 piezoeléctricos.



Fig. 70. Fachada con paneles y piezoeléctricos

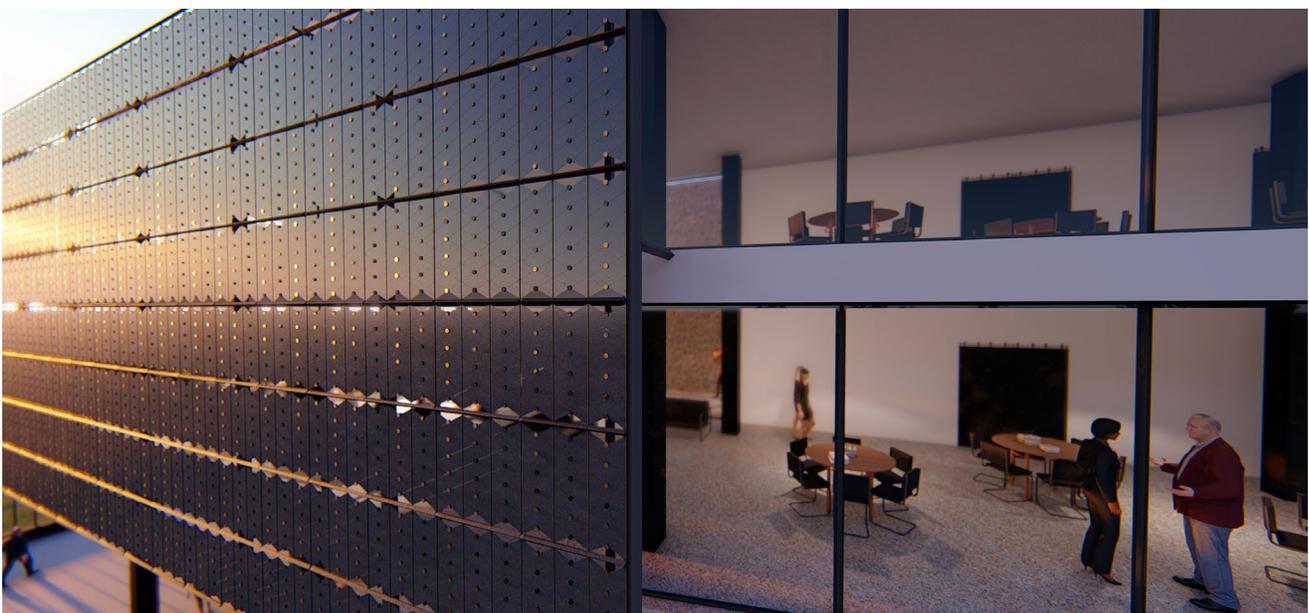


Fig. 71. Vista de la fachada..

Para evaluar la capacidad de generación de electricidad de los piezoeléctricos con las vibraciones producidas por el ruido urbano se realizó el modelado del circuito eléctrico empleado.

Se simuló el piezoeléctrico como se mencionó en el punto 5 | 1.3, con la parte mecánica y eléctrica. (Fig. 72)

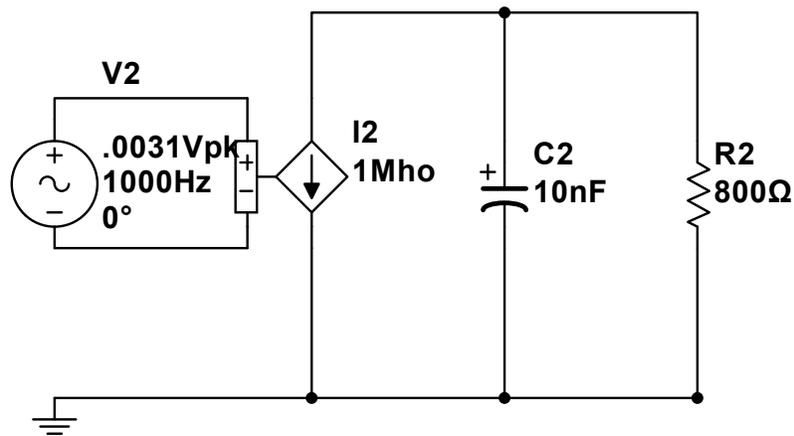


Fig. 72. Piezoeléctrico simulado en MultiSIM.

La señal que sale de este elemento es una corriente alterna (CA), por lo que se coloca el puente rectificador de onda completa, para así lograr una señal de corriente directa y más estable en el tiempo.

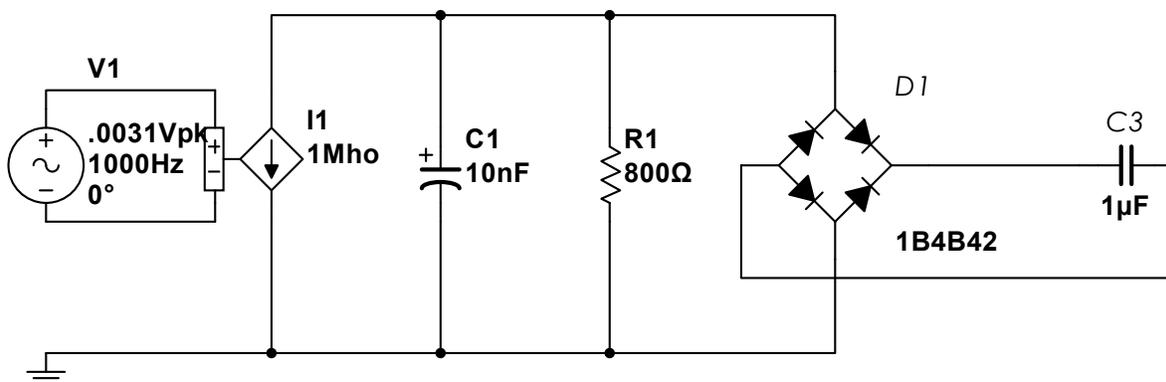


Fig. 73. Piezoeléctrico con puente rectificador de onda completa.

Se conectan 4 piezoeléctricos en serie y en paralelo; en serie para aumentar el voltaje de salida y en paralelo para aumentar la corriente eléctrica.

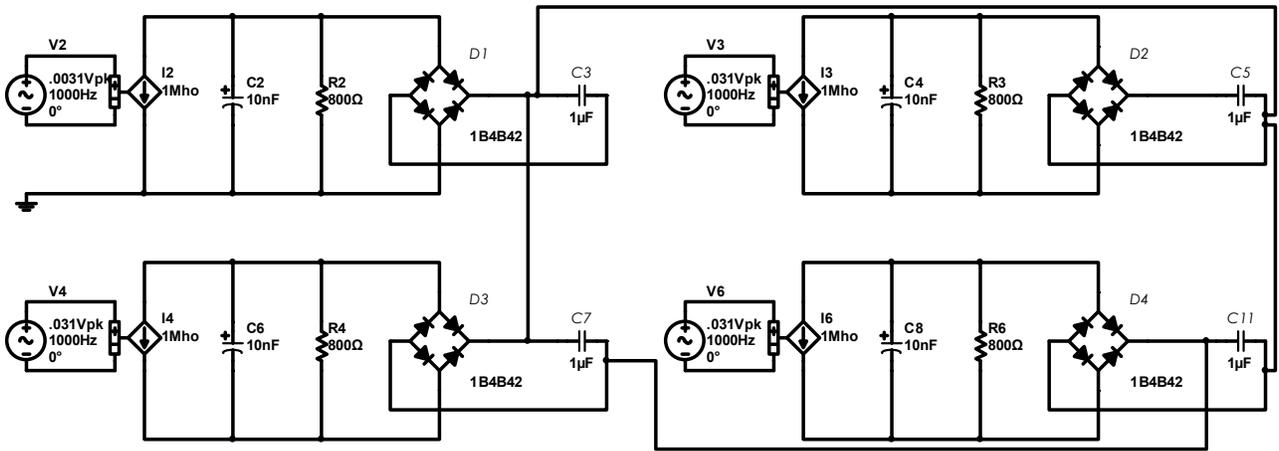


Fig. 74. Piezoeléctricos conectados en serie y en paralelo.

Se coloca un amplificador de corriente para incrementar la corriente eléctrica de salida del circuito eléctrico completo.

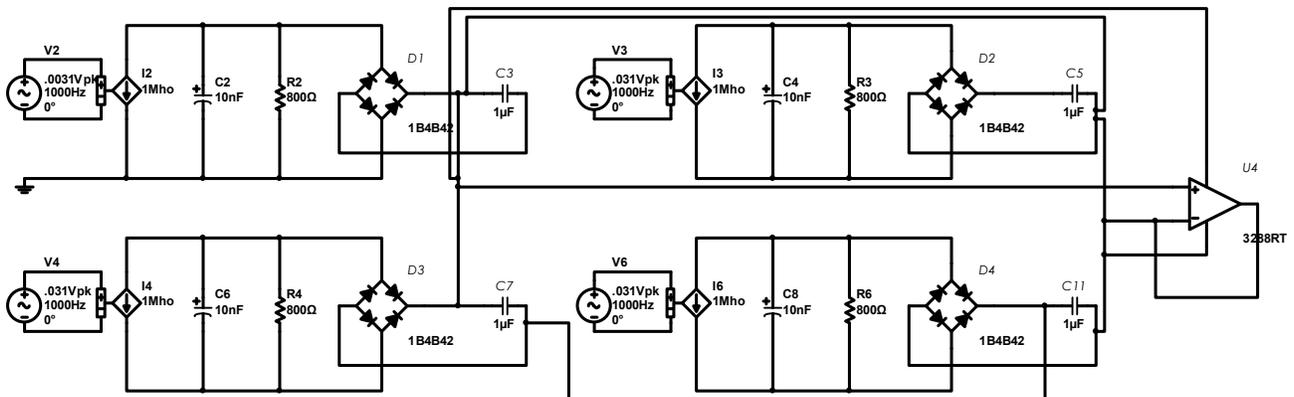


Fig. 75. Piezoeléctricos conectados en serie y en paralelo, con amplificador operacional.

A la salida del circuito, se coloca un regulador de voltaje para que la diferencia de potencial entregada por el piezoeléctrico tenga un valor uniforme, el regulador de voltaje lo constituye un diodo de zener y una resistencia eléctrica. Por otro lado, incluir un condensador a la salida del regulador de voltaje garantiza una señal de corriente eléctrica uniforme que permita que los Led's funcionen sin oscilación (variación)

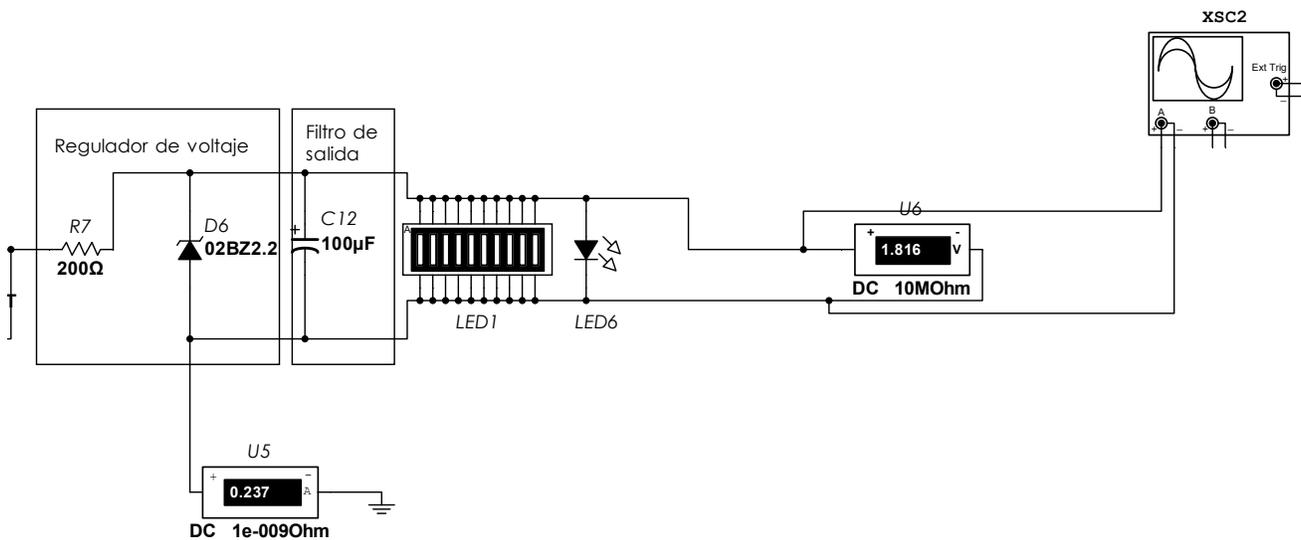


Fig. 76. Regulador de voltaje y filtro de salida.

El circuito final para la generación de energía eléctrica utilizando una fachada piezoeléctrica, se muestra en la figura 77.

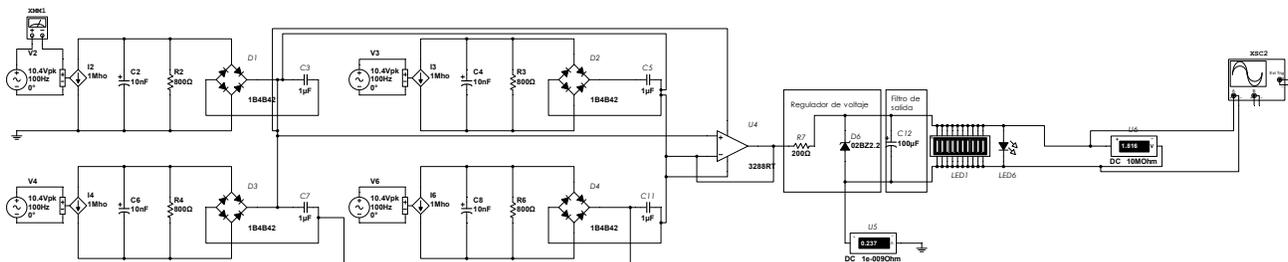


Fig. 77. Circuito eléctrico final para la fachada piezoeléctrica.

# 6 |

# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La obtención de los resultados de las simulaciones fue gracias a la modelación de los circuitos en MultiSIM, para ello se analizaron varios casos de modelo de circuito.

A fin de obtener la corriente eléctrica y el voltaje necesarios para energizar los LED de tal suerte que arrancaran y funcionaran apropiadamente, se simuló la conexión de los LED con una fuente de corriente directa con un voltímetro y amperímetro conectados, según se muestra en la figura 78.

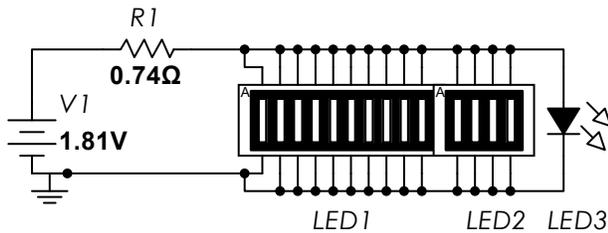


Fig. 78. Circuito de prueba para la obtención de los valores de corriente y voltaje operativos de los LED.

Finalmente, se encontró que los LED funcionan con 0.74 Amperes y 1.81 Volts.

El primer acercamiento al elemento piezoeléctrico simulado en MultiSIM, fué el que se muestra en la figura 79.

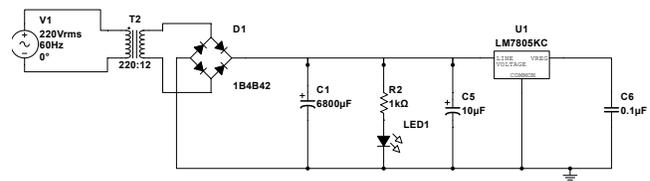


Fig. 79. Prueba 1 del circuito eléctrico para la fachada piezoeléctrica.

Simulado con una fuente de poder de corriente alterna (CA), un transformador de corriente y después un puente rectificador de onda completa, para convertir la corriente alterna en corriente directa (CD).

Se tenían claros los principios de funcionamiento del piezoeléctrico y los efectos que produce como es la impedancia, por lo cual también se colocó una resistencia y un capacitor en paralelo. Sin embargo, el arreglo propuesto no logró energizar a la lámpara LED

La segunda prueba, fue con una fuente de corriente que genera una señal sinusoidal que aumenta en frecuencia y amplitud, conectando a una resistencia y condensador (como en el caso anterior) y al puente rectificador de corriente.

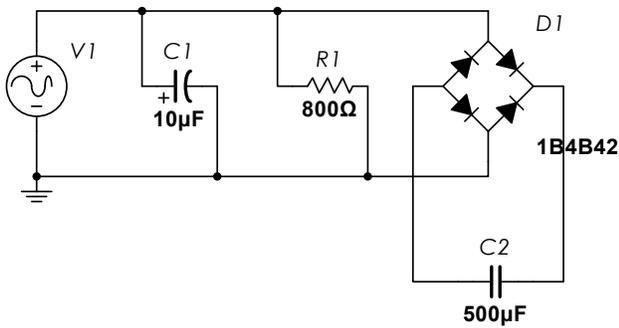


Fig. 80. Prueba 2 del circuito eléctrico para la fachada piezoeléctrica.

Con esta segunda prueba, se apreció que, aparte de simular la parte eléctrica del piezoeléctrico, se tenía que simular la parte mecánica por lo que aparte de la fuente de poder colocó un generador de corriente gobernado por voltaje para simular la parte mecánica como analogía al ruido.

Por lo tanto el modelo es el mostrado en la figura 81.

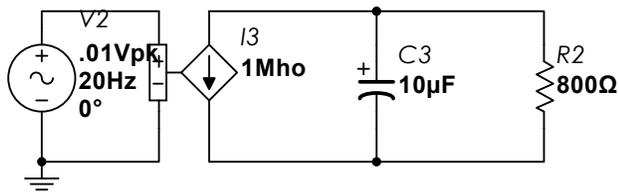


Fig. 81. Modelo piezoeléctrico en MultiSIM.

El modelo final obtenido simulando la parte eléctrica y la parte mecánica del piezoeléctrico se presenta en la figura 82.

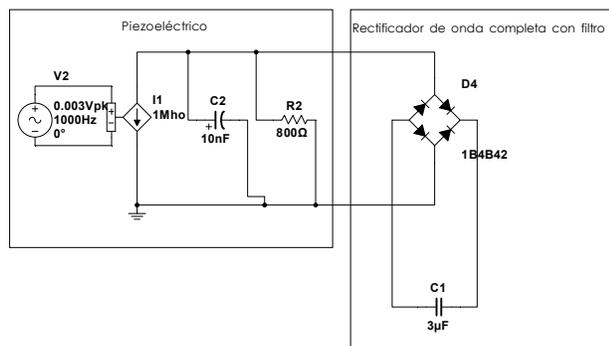


Fig. 82. Modelo final del circuito.

La primer prueba con este modelo, fué el conectar 4 pares de piezoeléctricos en serie y paralelo, porque se pensó que se aumentaría el voltaje (a consecuencia de la conexión en paralelo de los piezoeléctricos) y la corriente (a consecuencia de la conexión en serie de los grupos de piezoeléctricos), mostrados en la fig.83, ya que las corrientes obtenidas no fueron suficientes para energizar el LED.

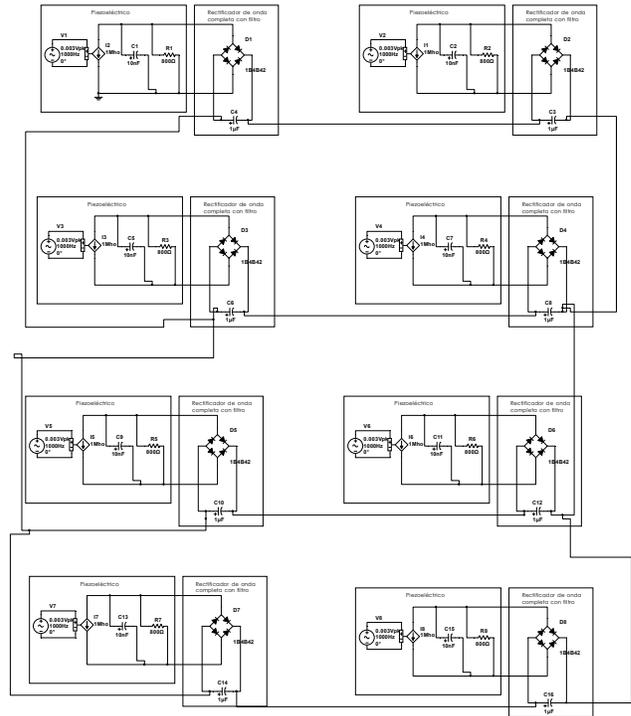


Fig. 83. Piezoeléctricos en serie y en paralelo.

El voltaje y la corriente generados con este diseño fueron de 2.6 V y 0.13 A, los cuales no fueron suficientes para energizar correctamente los LED y permitir el arranque y operación de éstos.

Pensando en aumentar la corriente para energizar los LED's se simuló otro modelo, con los siguientes elementos:

Fuente de poder de corriente alterna, generador de corriente gobernado por voltaje, resistencia y capacitor conectados a un transformador de corriente y al rectificador de onda con filtro, como se muestra en la figura 84.



Nivel sonoro (dB)	Frecuencia (Hz)	Voltaje (V)	Corriente (A)	¿Encendieron los Led's?	Potencia entregada (W)
50 dB	100 Hz	1.816 V	0.237 A	NO	0.430
	500 Hz	1.816 V	0.237 A	NO	0.430
	1000 Hz	1.817 V	0.237 A	NO	0.431
100 dB	100 Hz	1.829 V	0.236 A	SI	0.432
	500 Hz	1.829 V	0.236 A	SI	0.432
	1000 Hz	1.829 V	0.236 A	SI	0.432
120 dB	100 Hz	1.829 V	0.236 A	SI	0.432
	500 Hz	1.829 V	0.236 A	SI	0.432
	1000 Hz	1.829 V	0.236 A	SI	0.432

Tabla 2. Resultados se la simulación del circuito para la fachada piezoeléctrica.

Tomando en cuenta los datos de la gráfica anterior, se hicieron nueve pruebas diferentes con la frecuencia y con la potencia del ruido.

Al realizar las simulaciones anteriores y con base en los datos de la tabla 2 se puede apreciar que la diferencia de potencial o voltaje producidos variaban proporcionalmente con el nivel sonoro en dB, sin embargo, más allá de los 100 dB, la variación del voltaje generado en función del nivel sonoro no fue muy apreciable, desde el punto de vista numérico.

La frecuencia de la fuente sonora también es un factor que afecta al desempeño del sistema eléctrico propuesto, ya que al disminuir la frecuencia, las lámparas observan cierta oscilación en el ciclo de funcionamiento tendiendo a parpadear ocasionalmente.

Éste último punto lleva a proponer, en un estudio futuro, que se utilice un sistema electrónico para compensar la oscilación cuando los sonidos exteriores, empleados para excitar los piezoeléctricos, pasen de sonidos agudos o de alta frecuencia a sonidos graves o de baja frecuencia.

Hasta este punto no se consideraron en el diseño de la fachada los efectos inerciales, ni elásticos de la masa en ésta, por lo que es importante que cuando se diseñe la fachada se propongan las dimensiones y materiales de tal suerte que se reduzca el efecto inercial de ésta para que el sonido se pueda transferir directamente a los piezoeléctricos.

Ésta fachada inteligente da una respuesta a la necesidad de mitigar el cambio climático, ya que en el futuro se pueden diseñar edificios, que no sólo consuman energía eléctrica sino que también la produzcan e incluso sean autónomos. Esta investigación queda abierta a distintos diseños tanto de circuitos como de diseño de fachada e incluso en las partes del edificio en donde coloquen los piezoeléctricos, como en pisos, paredes, mobiliario, etc.

En éste trabajo se presentó un análisis de la factibilidad de la utilización de materiales piezoeléctricos en una fachada, excitados por las ondas mecánicas generadas por el ruido de las ciudades para generar energía eléctrica utilizable en las edificaciones.

Éste análisis, comprendió el estudio del fenómeno de la piezoelectricidad, así como de las propiedades de diferentes tipos de materiales piezoeléctricos para elegir el más funcional para el caso de estudio.

Se estudiaron diferentes aspectos sobre el comportamiento de éstos materiales y los efectos que produce como son: efecto piezoeléctrico, capacitancia e impedancia, y la generación de diferencia de potencial y corriente eléctrica.

También fue importante el estudio de la contaminación auditiva por el ruido en la Ciudad de México, tomando como referencias diferentes investigaciones sobre el ruido y las formas en que se genera en las ciudades, así como sus niveles (decibeles) mínimos y máximos.

Se diseñaron distintos circuitos eléctricos y se simularon en el programa computacional MultiSIM, tomando en cuenta diferentes elementos como la manera de simular eléctricamente el ruido urbano, el piezoeléctrico modelado

como resistencia y capacitor para reproducir su natural impedancia.

Es importante mencionar que en el circuito eléctrico diseñado para la fachada se conectaron cuatro piezoeléctricos en serie y paralelo, conectados después a un amplificador de corriente, un puente de rectificación de onda completa, un diodo Zener con una resistencia como regulador de voltaje, y un condensador como filtro para poder obtener electricidad utilizable sin oscilaciones temporales ni aleatorias en sus propiedades de corriente y diferencia de potencial.

A fin de sentar las bases del estudio presentado en este trabajo y de realizar una aportación sobre la piezoelectricidad en la Arquitectura, se presentó un contexto de la utilización de la energía generada por los piezoeléctricos, siendo éste un espacio con oficinas iluminado con lámparas LED, cuya cantidad e intensidad fueron calculadas con el método de la cavidad.

Del análisis realizado computacionalmente, se concluyó que no es posible generar electricidad que pueda ser empleada al 100% a cualquier nivel sonoro y que niveles sonoros menores a 50 dB, no eran útiles para la generación de energía eléctrica.

Los circuitos estudiados fueron ensayados a 50 dB con frecuencias de 100 Hz, 500 Hz y 1000 Hz, dando como resultado que no es posible lograr generación de energía eléctrica a niveles sonoros de 50 dB o menores, sin embargo, a 100 dB y 120 dB con frecuencias de 100Hz, 500 Hz y 1000 Hz, fué posible generar energía eléctrica utilizable para energizar sin fluctuaciones apreciables las lámparas LED que se consideraron en el caso de estudio.

La hipótesis de trabajo fue comprobada con éxito, ya que con las ondas mecánicas del ruido se excitaron los piezoeléctricos en una fachada generando energía eléctrica para la iluminación en edificios.

Existieron diferentes retos en este análisis, ya que no hay muchas investigaciones de piezoeléctricos en fachadas, sino que la mayoría son utilizados en losetas o pavimentos e incluso prendas de vestir, como calzado. Hay que mencionar también, que en el programa utilizado para diseñar y simular circuitos eléctricos (MultiSIM), no existe un componente que permita la simulación de materiales piezoeléctricos de manera bidireccional, es decir, que cuando se les suministre voltaje vibren o que cuando se les somete a esfuerzos mecánicos generen electricidad (aunque el componente "crystal", incluido en MultiSIM, se comporta como un piezoeléctrico empleado como transductor en circuitos de micrófonos y teléfonos), por lo que el siguiente reto es generar un componente que incluya el circuito equivalente empleado en el modelado y simulación de los piezoeléctricos que pueda ser excitado mecánicamente.

Otro punto a considerar es que, si bien es posible generar señales de audio con los componentes virtuales de MultiSIM, no se logró excitar con éstos al circuito equivalente empleado ni en el componente "crystal", esto trajo como consecuencia la planeación de análogos del piezoeléctrico, con diferentes elementos y del ruido con un generador de corriente gobernado por voltaje.

Otro punto importante es que es preciso llevar a cabo un estudio experimental con un circuito eléctrico construido físicamente, como complemento de la simulación, también es importante mencionar que el material de la fachada no es tomado en cuenta en el diseño del circuito, así como tampoco el número de piezoeléctricos que pueden ir en toda la fachada, sino que solo se utilizaron cuatro piezoeléctricos.

Esta investigación serviría de precedente a las futuras pruebas de materiales piezoeléctricos en fachadas, para la generación de energía eléctrica utilizable en edificios, ya que el campo de aplicación en el desarrollo para energías sustentables queda abierto a nuevas posibilidades.

Es un avance en las tecnologías alternativas en la arquitectura, ya que la industria de la construcción es una de las más contaminantes.

Las nuevas generaciones de estudiantes de arquitectura, deben pensar sustentablemente en cuanto a materiales y diseño arquitectónico, ya que el uso excesivo de energías convencionales es uno de los mayores problemas que existen hoy en día y seguirán existiendo sino nos preocupamos por resolverlo.

Los materiales inteligentes son una fuente alternativa a las energías convencionales, en éste caso, que pueden generar energía limpia gracias al ruido en las ciudades, no solamente en la Ciudad de México.

# APÉNDICE: MODELOS SIMULADOS

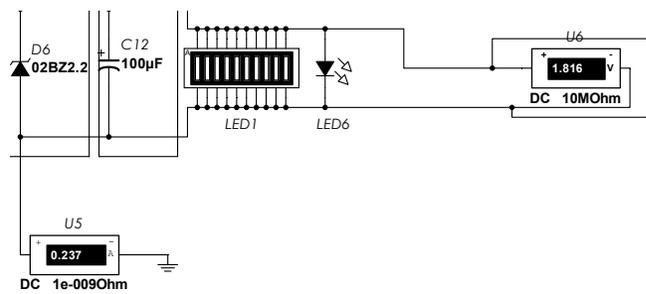


Fig. 88. Prueba 1. 50 dB 100 Hz

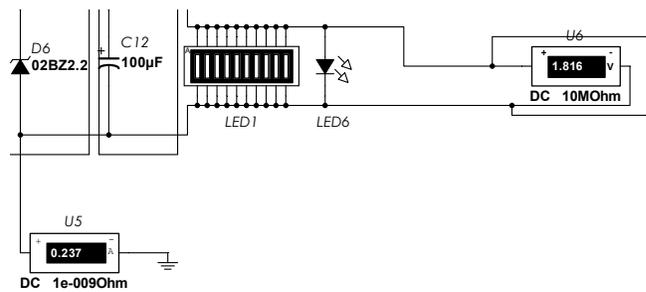


Fig. 89. Prueba 2. 50 dB 500 Hz

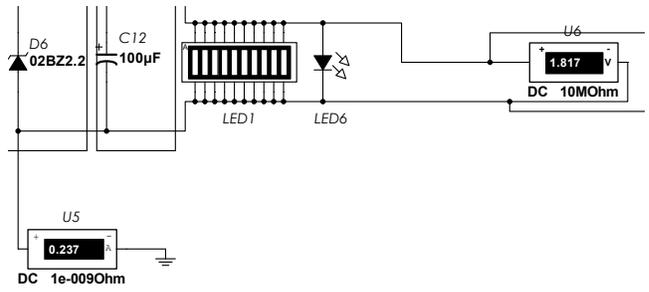


Fig. 90. Prueba 3. 50 dB 1000 Hz

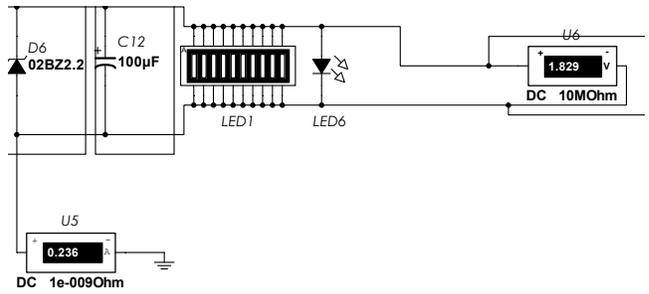


Fig. 91. Prueba 4. 100 dB 100 Hz

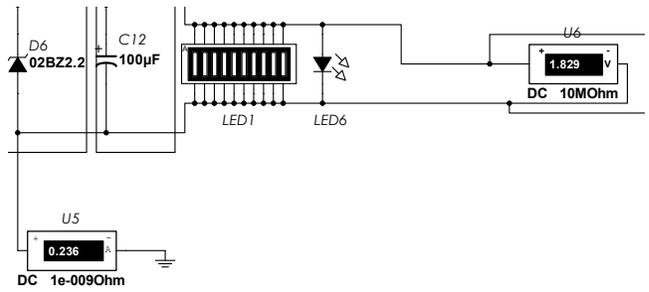


Fig. 92. Prueba 5. 100 dB 500 Hz

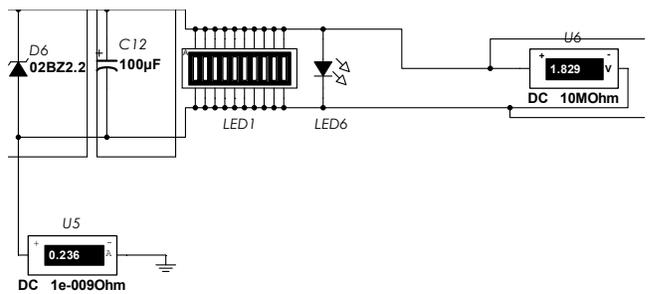


Fig. 93. Prueba 6. 100 dB 1000 Hz

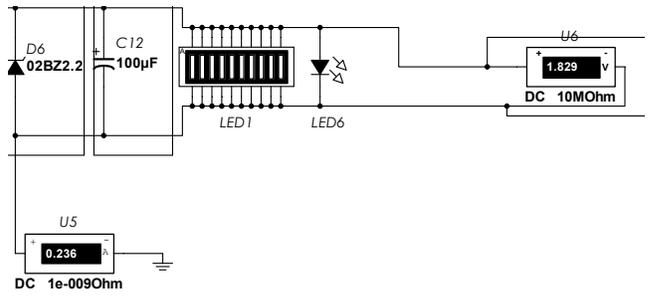


Fig. 94. Prueba 7. 120 dB 100 Hz

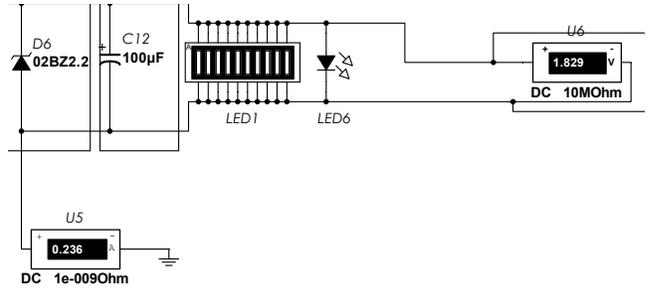


Fig. 95. Prueba 8. 120 dB 500 Hz

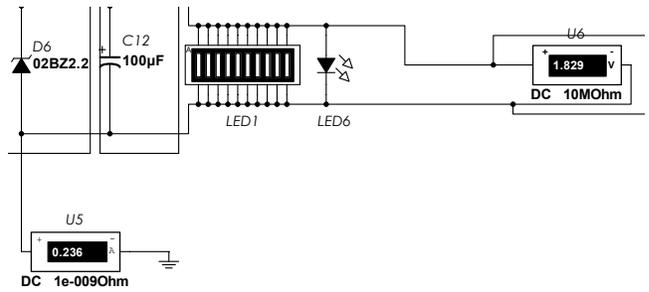


Fig. 96. Prueba 9. 120 dB 1000 Hz

# REFERENCIAS

- Adafruit. (2018), "Buzzer 5V-Breadboard friendly". Recuperado de <https://www.adafruit.com/product/1536>
- Adafruit. (2018), "Piezo Vibration Sensor - Small Vertical". Recuperado de <https://www.sparkfun.com/products/9199>
- Adafruit. (2018), "Large Enclosed Piezo Element w/Wires". Recuperado de <https://www.adafruit.com/product/1739>
- Adafruit. (2018), "Piezo Vibration Sensor - Small Horizontal". Recuperado de <https://www.sparkfun.com/products/9198>
- Adafruit. (2018), "Large Piezo Alarm-16 Tone". Recuperado de <https://www.sparkfun.com/products/13939>
- Adafruit. (2018), "Small Enclosed Piezo w/Wires". Recuperado de <https://www.adafruit.com/product/1740>
- Adafruit. (2018), "Large Piezo Alarm-3kHz". Recuperado de <https://www.sparkfun.com/products/13940>
- Adafruit. (2018), "Small Enclosed Piezo w/Wires". Recuperado de <https://www.adafruit.com/product/1740>
- Adafruit. (2018), "Piezo Igniter". Recuperado de <https://www.sparkfun.com/products/10234>
- Adafruit. (2018), "Piezo Buzzer - PS1240". Recuperado de <https://www.adafruit.com/product/160>
- Adafruit. (2018), "Piezo Ring Tones with Raspberry Pi". Recuperado de <https://learn.adafruit.com/piezo-ring-tones-with-raspberry-pi>
- Adafruit. (2018), "Piezo Element". Recuperado de <https://www.sparkfun.com/products/10293>
- Adafruit. (2018), "Piezo Vibration Sensor - Large with Mass". Recuperado de <https://www.sparkfun.com/products/9197>
- Adafruit. (2018). Recuperado de <https://www.adafruit.com/product/1739>
- Adafruit. (2018), "Piezo Vibration Sensor - Large". Recuperado de <https://www.sparkfun.com/products/9196>
- Addington, M., Schodek, D. (2005). "Smart materials and technologies: for the architecture and design professions". Burlington, MA: Architectural Press.

- Bhallas, S., Moharana S., Talakokula V., Kaur N. (2017) "Piezoelectric materials: applications in SHM, energy harvesting and biomechanics", New Dheli, India: Wiley.
- Dirección General de Generación y Transmisión de Energía Eléctrica (2018). "PRODESEN 2018-2032". Recuperado de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/331770/PRODESEN-2018-2032-definitiva.pdf>.
- Excelsior. (2017, Abril 30), "CDMX, Octava urbe con mayor contaminación acústica del mundo". Recuperado de <https://www.excelsior.com.mx/comunidad/2017/04/30/1160744>
- Gryzbek, D. (2013). "Piezoelectric generators: materials and structures." *Pomiary automatyka robotyka*.
- Gupta, V., Sharma M., & Thakur, N. (2010). "Optimization criteria for optimal placement of piezoelectric sensors and actuators on a start structure: A technical review". *Journal of intelligent material systems and structure*, volumen (21).
- Gutiérrez, L. & Fragoso, M. (2012, Octubre-Diciembre). "La generación de energía eléctrica en México". Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222012000400012](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222012000400012).
- Industrial electronics. (2019), "Amplificador operacional". Recuperado de [https://www.industrial-electronics.com/image/four-diode-full-wave%20bridge-rectifier\\_7-3.jpg](https://www.industrial-electronics.com/image/four-diode-full-wave%20bridge-rectifier_7-3.jpg)
- Katzir, S. (2006). "The beginnings of piezoelectricity". Dordrecht, Países bajos: Springer.
- Krasojevic, M., (2016). "Jardines para Estaciones de Trolebuses Piezoeléctricos en Belgrado". Recuperado de <https://www.arquired.com.mx/arq/arquitectura/jardines-estaciones-trolebuses-piezoelectricos-en-belgrado/>.
- Liao, Y. & Sodano, H.A., (2010). "Modeling and comparison of bimorph power harvesters with piezoelectric elements connected in parallel and series". *Journal of intelligent material systems and structure*, volumen (21).
- MILENIO. (2019), "Contaminación auditiva en la Ciudad de México". Recuperado de <https://www.milenio.com/estados/contaminacion-auditiva-en-la-ciudad-de-mexico?image=4>
- Montalvillo, J. (2011, Marzo 20). "Medición diferida de la diferencia de potencial". Recuperado de <http://www.djibnet.com/photo/intensidad/medicion-diferida-de-la-diferencia-de-potencial-5541744917.html>.
- Peralta, J. (1998, Abril - Junio). "El ruido en la Ciudad de México". Recuperado de <https://www.revistaciencias.unam.mx/images/stories/Articles/50/CNS05008.pdf>.
- Pérez Montiel, H. (2011). "Física General," Ciudad de México, México: Grupo editorial Patria.
- Ritter, A. (2007), "Smart materials in architecture, interior architecture an design", Suiza: Birkhauser.
- SAAD, Eduardo. (2008), "Acústica en arquitectura". Ciudad de México, México: S.E.
- Tapia, A., (2015), "Ruido Urbano, Energía Limpia". Recuperado de <https://e-management.mx/ruido-urbano-energia-limpia/>.
- UNSW. (2019, Diciembre 4), "What is a Sound Spectrum?". Recuperado de [https://newt.phys.unsw.edu.au/jw/sound\\_spectrum.html](https://newt.phys.unsw.edu.au/jw/sound_spectrum.html)
- Young, H.D., & Freedman R.A. (2009). "Física universitaria: con física moderna". México: Pearson Educación."

## Referencias de imagenes.

Fig. 1. Elaborada con base en:

Young, H.D., & Freedman R.A. (2009). "Física universitaria: con física moderna". México: Pearson Educación."

Fig. 2. Elaborada con base en:

Khan Academy, (2017). "Campo eléctrico". Recuperado de <https://es.khanacademy.org/science/electrical-engineering/ee-electrostatics/ee-electric-force-and-electric-field/a/ee-electric-field>

Fig. 3. Elaborada con base en:

Fisic (2019). "Corriente eléctrica". Recuperado de <https://www.fisic.ch/contenidos/electricidad/corriente-el%C3%A9ctrica/>

Fig. 4. Elaborada con base en:

Montalvillo, J. (2011, Marzo 20). "Medición diferida de la diferencia de potencial". Recuperado de <http://www.djibnet.com/photo/intensidad/medicion-diferida-de-la-diferencia-de-potencial-5541744917.html>.

Fig. 5. Elaborada con base en:

Departamento de física y química. (2018, Noviembre 1). "¿Es la piezoelectricidad una propiedad exclusiva de los materiales inorgánicos?". Recuperado de <http://www.fqsaja.com/?p=9158>.

Fig. 6. Elaborada con base en:

Hobby Pojects.com. (2019). "About OSCILLOSCOPE-Oscilloscope Wave form Measurements". Recuperado de [https://www.hobbyprojects.com/oscilloscope\\_tutorial/waveform\\_measurements.html](https://www.hobbyprojects.com/oscilloscope_tutorial/waveform_measurements.html)

Fig. 7. UNSW. (2019, Diciembre 4), "What is a Sound Spectrum?". Recuperado de <https://newt.phys.unsw.edu.au/jw/sound.spectrum.html>

Fig. 8 Elaborado con base en:

La Guía. (2013, Mayo 29). "Circuitos en serie y en paralelo". Recuperado de <https://fisica.laguia2000.com/general/circuitos-en-serie-y-en-paralelo>.

Fig. 9. Elaborado con base en:

La Guía. (2013, Mayo 29). "Circuitos en serie y en paralelo". Recuperado de <https://fisica.laguia2000.com/general/circuitos-en-serie-y-en-paralelo>.

Fig. 10. Elaborada con base en:

Ifetronic: Electrónica y Más. (2017, Octubre 29). "Como resolver circuitos mixtos Resistivos. Muy fácil! (Parte 1)". Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=qgxo6ZeNs0g>

Fig. 11. Elaborada con base en:

MAGNETROL. LEVEL MATTERS. (2019, Diciembre 9), "Controles de nivel por capacitancia". Recuperado de <https://www.magnetrol.com/es/controles-de-nivel-por-capacitancia>

Fig. 12. Elaborada con base en:

TheAmplituhedron. (2019, Diciembre 4), "Resistance Formulas Calculator". Recuperado de <https://www.theamplituhedron.com/tools/Resistance-Formulas-Calculator/>

Fig. 13. Elaborada con base en:

HyperPhysics. (2019, Diciembre 9), "Teoría de Bandas en Sólidos". (2019, Diciembre 9). Recuperado de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Solids/band.html#c5>

Fig. 14. Elaborada con base en:

HyperPhysics. (2019, Diciembre 9), "Teoría de Bandas en Sólidos". (2019, Diciembre 9). Recuperado de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Solids/band.html#c5>

Fig. 15. Elaborada con base en:

HyperPhysics. (2019, Diciembre 9), "Teoría de Bandas en Sólidos". (2019, Diciembre 9). Recuperado de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Solids/band.html#c5>

Fig. 17 Elaborada con base en:

FLUKE. (2019, diciembre 9), "What is a diode?". Recuperado de <https://www.fluke.com/en-us/learn/best-practices/measurement-basics/electricity/what-is-a-diode>

Fig. 18. Elaborada con base en:  
Industrial electronics. (2019), "Amplificador operacional".  
Recuperado de [https://www.industrial-electronics.com/  
image/four-diode-full-wave%20bridge-rectifier\\_7-3.jpg](https://www.industrial-electronics.com/image/four-diode-full-wave%20bridge-rectifier_7-3.jpg)

Fig. 19. Elaborada con base en:  
Infent.org. (2019, Diciembre 9), "Amplificadores  
operacionales". Recuperada de [http://www.ifent.org/temas/  
amplificadores\\_operacionales.asp](http://www.ifent.org/temas/amplificadores_operacionales.asp)

Fig. 20. Elaborada con base en:  
Mecatronic LATAM. (2018), "Diodo Zener, ¿Qué es,  
características y para qué sirve?". Recuperado de [https://  
www.mecatronicalatam.com/es/diodo/diodo-zener](https://www.mecatronicalatam.com/es/diodo/diodo-zener)

Fig. 21. Elaborada con base en:  
T-BEM. (2017, julio 5), "¿Cuál es la diferencia entre AC y  
DC?". Recuperada de [https://teslabem.com/blog/corriente-  
alterna-corriente-directa/](https://teslabem.com/blog/corriente-alterna-corriente-directa/).

Fig. 22. Elaborada con base en:  
Dirección General de Generación y Transmisión de Energía  
Eléctrica (2018). "PRODESEN 2018-2032". Recuperado de  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/331770/  
PRODESEN-2018-2032-definitiva.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/331770/PRODESEN-2018-2032-definitiva.pdf).

Fig. 23. Elaborada con base en:  
Dirección General de Generación y Transmisión de Energía  
Eléctrica (2018). "PRODESEN 2018-2032". Recuperado de  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/331770/  
PRODESEN-2018-2032-definitiva.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/331770/PRODESEN-2018-2032-definitiva.pdf).

Fig. 24 Elaborada con base en:  
MILENIO. (2019), "Contaminación auditiva en la Ciudad de  
México". Recuperado de [https://www.milenio.com/estados/  
contaminacion-auditiva-en-la-ciudad-de-mexico?image=4](https://www.milenio.com/estados/contaminacion-auditiva-en-la-ciudad-de-mexico?image=4)

Fig.25. Peralta, J. (1998, Abril - Junio). "El ruido en la Ciudad  
de México". Recuperado de [https://www.revistaciencias.  
unam.mx/images/stories/Articles/50/CNSO5008.pdf](https://www.revistaciencias.unam.mx/images/stories/Articles/50/CNSO5008.pdf).

Fig. 26. Peralta, J. (1998, Abril - Junio). "El ruido en la Ciudad  
de México". Recuperado de [https://www.revistaciencias.  
unam.mx/images/stories/Articles/50/CNSO5008.pdf](https://www.revistaciencias.unam.mx/images/stories/Articles/50/CNSO5008.pdf).

Fig. 27. Elaborada con base en:  
Gryzbek, D. (2013). "Piezoelectric generators: materials  
and structures." Pomiary automatyka robotyka.

Fig. 28. Elaborada con base en:  
Gryzbek, D. (2013). "Piezoelectric generators: materials  
and structures." Pomiary automatyka robotyka.

Fig. 29. Elaborada con base en:  
Gryzbek, D. (2013). "Piezoelectric generators: materials  
and structures." Pomiary automatyka robotyka.

Fig. 30. Elaborada con base en:  
Gryzbek, D. (2013). "Piezoelectric generators: materials  
and structures." Pomiary automatyka robotyka.

Fig. 31. Elaborada con base en:  
Gryzbek, D. (2013). "Piezoelectric generators: materials  
and structures." Pomiary automatyka robotyka.

Fig. 32. Elaborada con base en:  
Gryzbek, D. (2013). "Piezoelectric generators: materials  
and structures." Pomiary automatyka robotyka.

Fig. 33. Elaborada con base en:  
Gryzbek, D. (2013). "Piezoelectric generators: materials  
and structures." Pomiary automatyka robotyka.

Fig. 34. Elaborada con base en:  
Gupta, V., Sharma M., & Thakur, N. (2010). "Optimization  
criteria for optimal placement of piezoelectric sensors and  
actuators on a start structure: A technical review". Journal  
of intelligent material systems and structure, volumen (21).

Fig 35. Elaborada con base en:  
Liao, Y. & Sodano, H.A., (2010). "Modeling and comparison  
of bimorph power harvesters with piezoelectric elements  
connected in parallel and series". Journal of intelligent  
material systems and structure, volumen (21).

Fig. 36 Elaborada con base en:  
Adafruit. (2018), "Small Enclosed Piezo w/Wires".  
Recuperado de <https://www.adafruit.com/product/1740>

Fig. 37. Elaborada con base en:  
Adafruit. (2018), "Small Enclosed Piezo w/Wires".  
Recuperado de <https://www.adafruit.com/product/1740>

Fig. 38. Elaborada con base en:  
Adafruit. (2018), "Large Enclosed Piezo Element w/Wires".  
Recuperado de <https://www.adafruit.com/product/1739>

Fig. 39. Elaborada con base en:  
Adafruit. (2018). Recuperado de <https://www.adafruit.com/product/1739>

Fig. 40. Elaborada con base en:  
Adafruit. (2018), "Piezo Buzzer - PS1240". Recuperado de  
<https://www.adafruit.com/product/160>

Fig. 41. Elaborada con base en:  
Adafruit. (2018), "Piezo Vibration Sensor -Small Horizontal".  
Recuperado de <https://www.sparkfun.com/products/9198>

Fig. 42. Elaborada con base en:  
Adafruit. (2018), "Buzzer 5V-Breadboard friendly".  
Recuperado de <https://www.adafruit.com/product/1536>

Fig. 43. Elaborada con base en:  
Adafruit. (2018), "Piezo Ring Tones with Raspberry Pi".  
Recuperado de <https://learn.adafruit.com/piezo-ring-tones-with-raspberry-pi>

Fig. 44. Elaborada con base en:  
Adafruit. (2018), "Large Piezo Alarm-16 Tone". Recuperado  
de <https://www.sparkfun.com/products/13939>

Fig. 45. Elaborada con base en:  
Adafruit. (2018), "Large Piezo Alarm-3kHz". Recuperado  
de <https://www.sparkfun.com/products/13940>

Fig. 46. Elaborada con base en:  
Adafruit. (2018), "Piezo Igniter". Recuperado de <https://www.sparkfun.com/products/10234>

Fig. 47. Elaborada con base en:  
Adafruit. (2018), "Piezo Element". Recuperado de <https://www.sparkfun.com/products/10293>

Fig. 48. Elaborada con base en:  
Adafruit. (2018), "Piezo Vibration Sensor - Large with Mass".  
Recuperado de <https://www.sparkfun.com/products/9197>

Fig. 49. Elaborada con base en:  
Adafruit. (2018), "Piezo Vibration Sensor - Large".  
Recuperado de <https://www.sparkfun.com/products/9196>

Fig. 50. Elaborada con base en:  
Adafruit. (2018), "Piezo Vibration Sensor - Small Vertical".  
Recuperado de <https://www.sparkfun.com/products/9199>.

Fig. 51. Elaborada con base en:  
Tapia, A., (2015), "Ruido Urbano, Energía Limpia".  
Recuperado de <https://e-management.mx/ruido-urbano-energia-limpia/>.

Fig. 52. Elaborada con base en:  
Krasojevic, M., (2016). "Jardines para Estaciones de  
Trolebuses Piezoeléctricos en Belgrado". Recuperado de  
<https://www.arquired.com.mx/arq/arquitectura/jardines-estaciones-trolebuses-piezoelctricos-en-belgrado/>.

Fig. 53. Elaborada con base en:  
La verdad (2019, Octubre, 17), "Carreteras inteligentes:  
Generarán energía por medio de rampas tecnológicas".  
Recuperado de <https://laverdadnoticias.com/tecnologia/Carreteras-Inteligentes-Generaran-energia-por-medio-de-rampas-tecnologicas-20191017-0070.html>.

Fig.54. Elaborada con base en:  
Madrdes. (2019), "Vistas guiadas de arquitectura".  
Recuperado de <http://madrdes.es/blog/madrid-rio/>

Fig. 55. Elaborada con base en:  
UNGATONIPÓN. (2008, Diciembre 6), "Genera electricidad  
caminando". Recuperado de <https://www.ungatonipon.com/1061/genera-electricidad-caminando>.

Fig. 56. Elaborada con base en:  
Corredor con sistema piezoeléctrico de Pavegen systems.  
Elaborada con base en (s.a.), "Oxford Street, London"  
(2018). Recuperado de <https://pavegen.com/case-studies/oxford-street/>

Fig. 57. Elaborada con base en:  
PAVEGEN. (2019), "University of Birmingham, UK".  
Recuperado de <https://pavegen.com/case-studies/university-of-birmingham/>.

Fig. 58. Elaborada con base en:

Segura, R (2013), "Strawscaper, edificio ecológico y autosuficiente". Recuperado de <https://www.metroscubicos.com/articulo/consejos/2013/06/17/strawscaper-edificio-ecologico-y-autosuficiente>

Fig. 59. Elaborada con base en:

Segura, R (2013), "Strawscaper, edificio ecológico y autosuficiente". Recuperado de <https://www.metroscubicos.com/articulo/consejos/2013/06/17/strawscaper-edificio-ecologico-y-autosuficiente>