



GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA LIMPIA MEDIANTE BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS

Aurora Aparicio Castillo

*E.S.I.M.E Azcapotzalco. Instituto Politécnico Nacional
aaparicioc@gmail.com*

Ramón Rodríguez Luna

*E.S.I.M.E Azcapotzalco. Instituto Politécnico Nacional
lunaa3019@gmail.com, hguerra14@hotmail.com*

Hugo Armando Guerra Calva

*E.S.I.M.E Azcapotzalco. Instituto Politécnico Nacional
lunaa3019@gmail.com, hguerra14@hotmail.com*

Abstract

Currently one of the main problems facing society is environmental pollution, a clear example is that generated in the production of electricity already, which is obtained in an unsustainable manner and significantly affects the environment. On the other hand, current technology that produces clean energy is inefficient and extremely expensive. The project to be developed focuses on the complete design of a system capable of generating and storing clean electrical energy with the use of the piezoelectric effect. This effect is a phenomenon that has certain crystals, which, when subjected to mechanical stress, have a potential and electric charge on its surface. With the self-generated energy, public areas will be energized, and the sensors to be used will be placed in areas where there is a high amount of people's flow during the day, taking advantage of the peak hours to generate as much electricity as possible, and in accordance to the characteristics of the sensors to be used, the analysis and calculation of the amount of energy can be produced in relation to the size of the same, its electrical specifications, as well as the maintenance to which they will have to submit.

Palabras clave: pollution, electrical energy, piezoelectric effect, self-generated,

El proyecto a desarrollar se enfoca en el diseño completo de un prototipo capaz de generar y almacenar energía eléctrica limpia con el uso del efecto piezoeléctrico. Este efecto es un fenómeno que presentan determinados cristales, los cuales, al ser sometidos a tensiones mecánicas, presentan un potencial y carga eléctrica en su superficie la

cual se busca captar en provecho de la sociedad.

Con la energía autogenerada se energizarán áreas públicas, y los sensores a emplear serán colocados en zonas en las cuales hay una alta cantidad de flujo de personas en el día, aprovechando las horas pico para generar la mayor cantidad de energía eléctrica posible, y



de acuerdo con las características de los sensores a emplear se realizará el análisis y el cálculo de la cantidad de energía que puede ser producida con relación al tamaño del mismo, sus especificaciones eléctricas, así como al mantenimiento al que se tendrán que someter.

1. Generalidades

a) La Piezoelectricidad

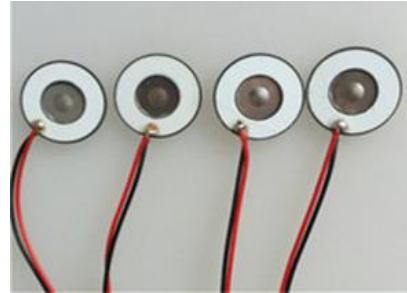
Es un fenómeno presentado por determinados cristales que al ser sometidos a tensiones mecánicas adquieren una polarización en su masa, apareciendo una potencial y cargas eléctricas en su superficie. Este fenómeno también se presenta a la inversa, esto es, se deforman bajo la acción de fuerzas internas al ser sometidos a un campo eléctrico. Estos dos fenómenos se estimulan mutuamente, lo que significa que si se golpea o deforma un material con cualidades piezoeléctricas, esa deformación provocará un voltaje que a su vez deformará el material, generando nuevamente una tensión eléctrica, y así sucesivamente.

Los materiales piezoeléctricos pueden ser agrupados en 2 grandes variantes.

- Cristales piezoeléctricos naturales.
- Cristales piezoeléctricos sintéticos.

b) Cerámicas piezoeléctricas

Al hablar de los materiales piezoeléctricos sintéticos o artificiales, se refiere a aquellos, particularmente cerámicos y polímeros, que en condiciones naturales no ostentan dicha propiedad; pero que son capaces de representarla bajo la influencia de agentes externos. Los ejemplos más representativos de los piezoeléctricos cerámicos son el Titanato de Plomo, Titanato de Bario, Titanato Zirconato de Plomo, Titanato Zirconato de Plomo y Lantano y el Niobato de Plomo y Magnesio (Esquibel, 2013).



*Figura 1. Cerámicas Piezoeléctricas
(Paxtrade, 2015)*

El sensor que se muestra en la figura 1 consta de 3 componentes principales:

- Material piezoeléctrico
- Placa de metal
- Cables (Positivo y Negativo)
-

2. Árbol de funciones

Un diagrama funcional es una representación gráfica o dibujo de figuras geométricas que sirve para mostrar el funcionamiento de, ya sea, una institución, empresa, equipo, club o una máquina o teoría científica, ver figura 2.

1. El nivel superior lo ocupa la función general del producto.
2. El segundo Nivel lo ocupan funciones principales del producto a diseñar, se determinan realizando la pregunta ¿Cómo hace el producto o proyecto para realizar esta acción?
3. El tercer nivel y los siguientes lo ocupan las propuestas o posibles soluciones que se hayan encontrado al consultar con expertos o realizar las adecuadas investigaciones.

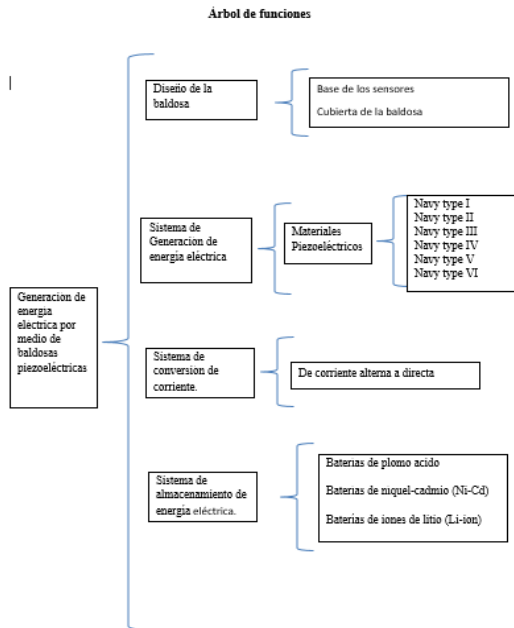


Figura 2. Cerámicas Piezoeléctricas
(elaboración propia)

2.1. Diseño de la baldosa

Dada la naturaleza del proyecto es necesario diseñar una base que contenga varios sensores, el cableado a utilizar y una cubierta que permita proteger y presionar de manera simultánea la mayor cantidad de sensores posible, ya que en el mercado actual no hay ninguna baldosa cerámica o producto que se pueda utilizar para este fin.

La base de los sensores y la cubierta deberán ser de un material aislante, resistente a la fractura por fatiga, con una alta resistencia al impacto y con un índice bajo de deformación, ya que estarán en un lugar con alto flujo peatonal.

2.1.1. Matriz morfológica de la cubierta y tapa de la baldosa.

La siguiente matriz tiene como objetivo mostrar los posibles materiales a usar para la cubierta y la tapa de la baldosa, y posteriormente se mostrarán las propuestas de diseño de ambas.

Tabla 1. Posibles materiales de fabricación
(elaboración propia).

| Características deseadas | Polipropileno | Madera | Delrin o acetal | Polipropileno (HDPE) |
|---|---------------|--------|-----------------|----------------------|
| Resistencia mecánica a la fractura por flexión o fatiga | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Económico | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ |
| Ser un aislante eléctrico | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Poca absorción de humedad. | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ |
| Fácil de encontrar en el mercado | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ |

De la matriz anterior podemos afirmar que el polipropileno es material más adecuado para la construcción de la baldosa piezoeléctrica.

2.1.2. Materiales piezoeléctricos.

Las cerámicas piezoeléctricas se clasifican en blandas y duras.

- Las cerámicas blandas (“Soft”) tienen como ventaja su gran coeficiente piezoeléctrico de carga dominado por pequeños y grandes factores de acoplamiento.
- Las cerámicas duras (“Hard”) pueden ser sometidas a grandes fuerzas mecánicas y eléctricas presentan una moderada permisividad, su gran factor de acople piezoeléctrico, de calidad altos, bajas pérdidas eléctricas, facilidad de uso



continuo en modo de resonancia con muy bajo calentamiento del componente.

morfológica de los sensores piezoeléctricos (Navy Type PZT Classifications, 2018)

2.1.3. Matriz morfológica de los materiales piezoeléctricos.

El propósito de esta matriz es el poder comparar de manera práctica las principales características de los materiales piezoeléctricos, las cuales se muestran en la tabla 2, lo que facilitará la elección de los sensores a utilizar en la propuesta de diseño.

Las propiedades más importantes a considerar de los piezoeléctricos para este proyecto son:

- La constante dieléctrica $[K^T_{33}]$ la cual permite conocer qué tanto afecta y es afectado el campo eléctrico del sensor por un campo eléctrico externo.
- El factor de disipación que indica el porcentaje de pérdidas de energía a lo largo de los ciclos de carga y descarga del sensor.
- La constante de tensión que hace referencia a cuanto voltaje genera el sensor por cada Newton ejercido sobre él.
- El factor de acoplamiento es un valor que muestra cuanta eficiencia tiene el piezoeléctrico en transformar la energía mecánica en eléctrica.

Nota: se considera a ese valor como el porcentaje real de efectividad, es decir 0.62 es igual a 62%.

Tabla **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..** Matriz

| Características eléctricas | | | Navy-V | Navy-II | Navy-I |
|---------------------------------|---------------|-----------------------------|---------------------|------------------|------------------|
| | | | SensorTech BMS27 | Morgan PZT5A1 | Morgan PZT402 |
| Constante dieléctrica relativa | K^T_{33} | | 2750 | 1800 | 1320 |
| Factor de disipación | $\tan \delta$ | -----% | 2.0 | 2.0 | 0.22 |
| Características piezoeléctricas | | | Navy-V | Navy-II | Navy-I |
| | | | SensorTech BMS27 | Morgan PZT5A1 | Morgan PZT402 |
| | Simbolos | Unidades | | | |
| Constante de Tensión | g_{33} | $10^{-3} \cdot V \cdot m/N$ | 22 | 24.8 | 26.3 |

Se elige utilizar sensores piezoeléctricos tipo NAVY II debido a sus especificaciones técnicas en los cuales destacan su alto porcentaje de eficiencia al convertir la energía mecánica en eléctrica (factor de acoplamiento), su generación de potencial eléctrico por newton ejercido (constante de tensión piezoeléctrica) y su poca pérdida de energía a lo largo de sus ciclos de carga y descarga (factor de disipación).

2.2. Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica

Para poder elegir la mejor forma de almacenamiento se deben tomar en cuenta los siguientes factores:

- Factor energético
- Factor económico
- Factor social
- Factor ambiental

2.2.1. Matriz morfológica de las baterías. El propósito de esta matriz es el poder comparar de manera más práctica las principales características de las baterías, lo cual facilitará la elección de la que se utilizará en la propuesta de diseño.



Tabla 3. Matriz morfológica del sistema de almacenamiento (Baterías Industriales, 2013).

| | Nickel-Cadmio | Nickel-metal-Hidruro | Plomo-Acido Sellada | Ion de Litio Cobalto | Ion de Litio Manganesio | Ion de Litio Fosfato |
|---|-------------------------|-------------------------|---------------------|--|-------------------------|----------------------------------|
| Densidad de Energía (Wh/Kg) | 45-80 | 60-120 | 30-50 | 150-190 | 100-135 | 90-120 |
| Resistencia Interna en mΩ | 100 a 200 Paquete de 6V | 200 a 300 Paquete de 6V | <100 Paquete de 12V | 150-300 Paquete 100-130 por célula | 25-75 por célula | 25-50 por célula |
| Ciclo de Vida (a 80% de la capacidad inicial) | 1500 | 300-500 | 200-300 | 300-500 | 300-500 | >1000 a condición de laboratorio |
| Tiempo de carga aprox. | Comúnmente 1H | 2-4H | 8-16H | 1.5-3H | 1H o menos | 1H o menos |
| Tolerancia a Sobrecarga | Moderada | Baja | Alta | Baja. No puede tolerar carga por goteo | | |
| Temperatura de Operación | -40 a 60°C | -20 a 60°C | -20 a 60°C | -20 a 60°C | | |
| Mantenimiento necesario | 30 a 60 Días | 60 a 90 Días | 3 a 6 Meses | No es Necesario | | |
| Corriente de carga | 20A-1A | 5A-0.5A o menos | 5A-0.2A | <3A- 1A o menos | >30A- 10A o menos | >30A- 10A o menos |

Las baterías elegidas para el proyecto serán las baterías de iones de litio, o también conocidas como Li-Ion, específicamente las baterías de Ion de Litio de Cobalto, ya que éstas no sufren del efecto de memoria y pueden cargarse sin necesidad de estar descargadas totalmente.

2.3. Sistema de conversión de corriente CD/CA

La energía eléctrica generada por los sensores piezoeléctricos es alterna por lo tanto debe de ser convertida a directa para que esta se pueda almacenar en baterías.

2.3.1. Circuito Típico de Captación EHE004 Charge Management System de MIDE Technology.

En la figura 3 se muestra la arquitectura del circuito que se encarga de la captación y almacenamiento de energía, para excitaciones

mecánicas por impacto y para excitaciones mecánicas por vibraciones continuas.

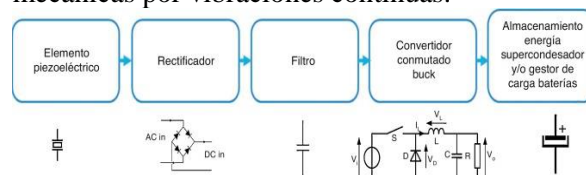


Figura 3. Arquitectura del circuito de captación y almacenamiento (Martínez, 2015)

1. El elemento piezoeléctrico es la fuente de energía y el conversor de energía mecánica en energía eléctrica.
2. El rectificador consiste en un circuito rectificador de onda completa encargado de conseguir que la señal eléctrica proporcionada por el elemento piezoeléctrico sólo tenga valores positivos.

El filtro es uno o más condensadores de alta capacidad para conseguir que la entrada al convertidor/conmutador/reductor (Buck) tenga una tensión de entrada con variaciones pequeñas de tensión. En el EHE004 es el CIN = 200 μ .

3. Para el Buck converter se utiliza el circuito Linear LTC3588-1, que viene montado en el EHE004 Charge Management System y que ofrece la ventaja de tener integrado el rectificador.

Módulo de almacenamiento y distribución de energía

2.3.2. Módulo Energy Harvesting LTC3588.

El módulo de recolección de energía (energy harvesting) LTC3588 de Linear Technology permite alimentar nuestros proyectos utilizando energía disponible en el ambiente como puede ser vibraciones, solar o transductores magnéticos. El módulo posee entrada rectificada para elementos tipo piezoeléctricos (PZ1 y PZ2) y otra entrada de tipo DC (VIN), ambas entradas están limitadas a 20V. Adicionalmente podemos usar el módulo con un regulador tipo Buck de alta eficiencia.

3. Sistema experimental

En la imagen 4 se puede apreciar una vista general de cómo se vería el sistema una vez ensamblado, cabe destacar que el número de baldosas del sistema dependerá de la cantidad de energía que se busque generar. Para uso ilustrativo se encuentran un conjunto de nueve baldosas de 33x33 cm cada una fijada al concreto. También se aprecia un módulo al cual irán los cables provenientes de las baldosas hacia el sistema de almacenamiento.

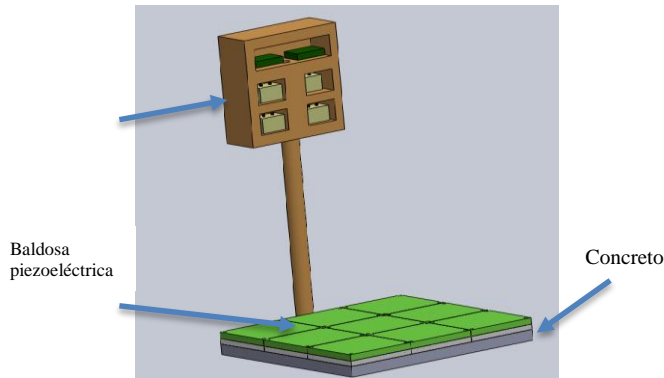


Figura 4. Vista del Sistema (Elaboración Propia)

El módulo de almacenamiento será elaborado del mismo material de la baldosa, de PET-G el cual mantendrá protegidos a los circuitos harvesting y demás componentes electrónicos.

3.1. Módulo de control y almacenamiento de energía

Este módulo será el encargado de resguardar las baterías y las tarjetas electrónicas del sistema, será utilizado independientemente de la baldosa elegida. El cableado de los sensores piezoeléctricos al módulo será de manera subterránea y pasará a través del soporte de éste, el cual es hueco por dentro y permite su acceso. Tiene cuatro orificios para las baterías y sus respectivas

perforaciones para poder conectar los cables al sistema que se vaya a alimentar. En la parte superior cuenta con un espacio, el cual está destinado a las tarjetas electrónicas del sistema con sus respectivas perforaciones para el cableado hacia las baterías (figura 5)

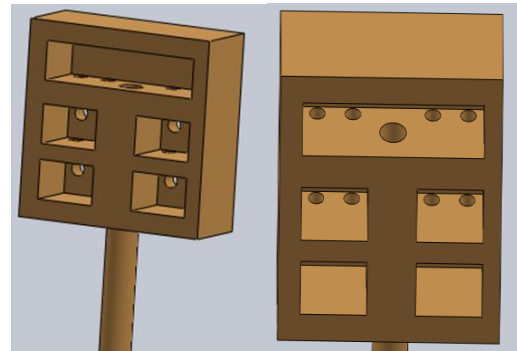


Figura 5. Módulo de control y almacenamiento (Elaboración Propia)

3.2. Baldosa Piezoeléctrica

Es importante mencionar que para que los sensores piezoeléctricos puedan entregar un potencial eléctrico es necesario que no se encuentren presionados todo el tiempo, lo cual genera la necesidad de encontrar un sistema en el cual la baldosa regrese a su posición inicial, es por eso por lo que se utiliza un sistema de resortes de compresión o bien se utilizan punzadores a los cuales se les ha desbastado una pequeña sección que evitará el contacto con las zapatas eléctricas de manera permanente.

En la figura 6 se observan todos los elementos ensamblados mediante una vista de corte, esta sería la posición inicial de la baldosa antes de ser pisada.

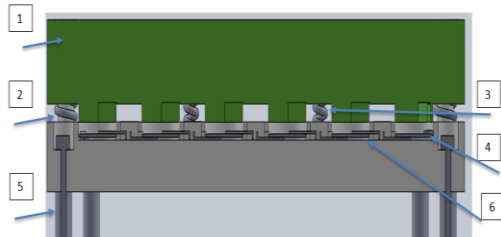


Figura 6. Vista de corte de la baldosa
(Elaboración Propia)

En la tabla 4 se enlistan los componentes descritos en el párrafo anterior

Tabla 4. Vista de corte componentes ensamblados (Elaboración Propia)

| | |
|---|---|
| 1 | Cubierta de la baldosa |
| 2 | Resortes colocados en los soportes guía |
| 3 | Resortes de apoyo |
| 4 | Sensor piezoeléctrico |
| 5 | Tornillos con taquetes de sujeción |
| 6 | Zapatas eléctricas |

En la figura 7 se puede ver la baldosa una vez que es pisada, como se aprecia la zapata eléctrica no es presionada por el punzador lo cual evita cualquier daño relacionado con los esfuerzos mecánicos a los que será sometido el sensor.

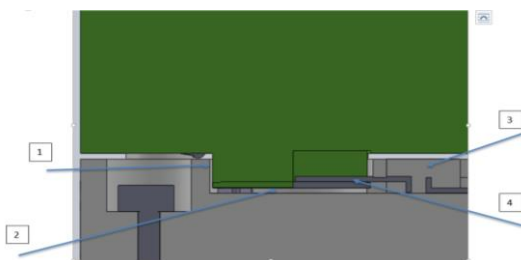


Figura 7. Vista de corte de la baldosa
presionada (Elaboración Propia)

En la tabla 5 se enlistan los componentes que aparecen en la figura 7, dicha figura muestra una vista de corte que permite apreciar

cómo se comportaría la baldosa de ser pisada por una persona.

Tabla 5. Descripción de componentes de la baldosa presionada (Elaboración Propia)

| | |
|---|--|
| 1 | Punzador cilíndrico presionando el sensor piezoeléctrico |
| 2 | Sensor piezoeléctrico presionado |
| 3 | Orificio de conexión de las zapatas eléctricas |
| 4 | Zapata eléctrica colocada en el sensor |

3.2.1. Bases de la Baldosa. Para el diseño de las bases superior e inferior del proyecto se plantea implementar el uso de una impresora 3D para asegurar que los prototipos se realicen a un bajo costo y con las especificaciones requeridas y en un corto periodo de tiempo.

Entre los materiales considerados para la elaboración de las baldosas piezoeléctricas se consideran plásticos comerciales que se puedan manufacturar tanto en procesos de inyección de plástico como en impresión 3D.

El filamento PETG, además de su dureza, se caracteriza por que al ser sometido a presión se dobla ligeramente en vez de quebrarse, como ocurre con otros filamentos más rígidos y frágiles.

4. Pruebas y Resultados

4.1. Ensayos de Compresión

El objetivo del comportamiento del elemento a ensayar está orientado principalmente a la determinación de los límites de trabajo del elemento en cuestión: fuerza máxima, deformación a rotura, inicio de grieta, etc. Estos valores permitirán verificar que los diseños realizados teóricamente corresponden con los valores empíricos obtenidos en una simulación real de trabajo.

4.1.1. Ensayo de Compresión de elementos piezoeléctricos.

A partir de las necesidades del proyecto y de las fuerzas a las que se someterán los elementos piezoeléctricos se necesitará resolver una de las principales incógnitas la cual es si el piezoeléctrico podrá soportar la carga del tránsito peatonal del día a día por lo que se propuso realizar un ensayo a compresión de los piezoeléctricos.

Se utilizó la máquina de compresión marca Shimadzu Modelo AG-I con una capacidad de carga de 100kN la cual se muestra en la figura 8. A la placa fija se le tuvo que agregar una base de metal que le ayudara al piezoeléctrico a ganar altura para poder realizar la prueba.



Figura 8. Máquina SHIMADZU para ensayos a compresión Modelo AG-I (Elaboración Propia)

El objetivo del Ensayo fue comprobar que un piezoeléctrico podía soportar el peso de 200Kgf y asegurarse que el mismo puede seguir funcionando después de ser sometido a esta carga sin verse afectado su rendimiento en cuanto a la generación de energía eléctrica, ver figura 9.



Figura 9. Punzón presionando el sensor piezoeléctrico en Ensayo a compresión (Elaboración Propia)

En conclusión, las gráficas de cada ensayo tienen la forma combinada de las gráficas de compresión de los metales y de los termoplásticos debido a que éste no es un material 100% cerámico pero tampoco es un metal, al ver la gráfica se puede observar que nunca fallara por compresión, debido a que el material es dúctil y éste aumentara el área al aplicar la carga, de esta manera la parte metálica del piezoeléctrico funciona como amortiguador protegiendo al cerámico, ver la siguiente figura.

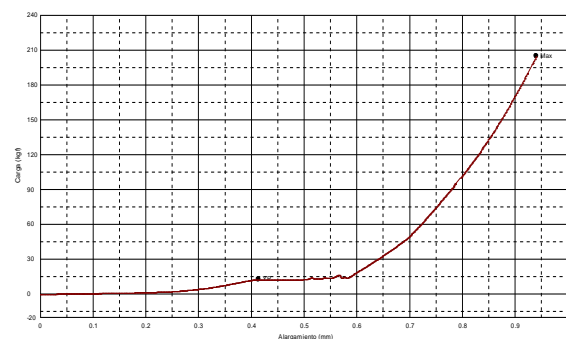


Figura 10. Ensayo de Compresión (Elaboración Propia)

4.1.2. Pruebas de Compresión al PET-G.

Se realizó el prototipo de la baldosa con espacio para un solo sensor piezoeléctrico (ver figura 11), lo que permite conocer cómo se



comportará el material en pequeña escala. Estas baldosas unitarias se fabricaron utilizando impresión 3D y se les realizaron pruebas mecánicas para analizar si el material cumplirá con las expectativas.

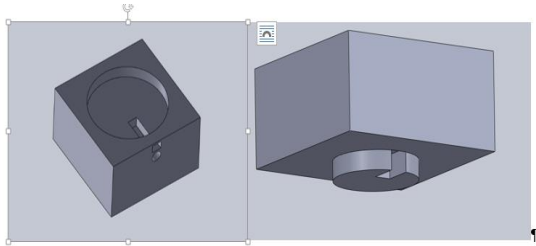


Figura 11. Tapa y Base de la Baldosa Única
(Elaboración Propia)

Las pruebas se realizaron en la máquina Shimadzu, y el objetivo es conocer con qué carga o fuerza ejercida sobre el material éste falla, de las gráficas obtenidas se observa que el material soporta más del peso promedio mexicano el cual es 74Kg según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

Para realizar la prueba se coloca la baldosa en la base de la máquina y se acomoda para que la máquina pueda ejercer la presión a una altura aceptable para que la máquina tenga un amplio rango de movimiento.

En la gráfica 12 se aprecia el punto donde está el límite de la zona elástica y donde comienza la zona plástica. En el caso de esta prueba, la baldosa se deforma de manera permanente a partir de los 350 Kgf.

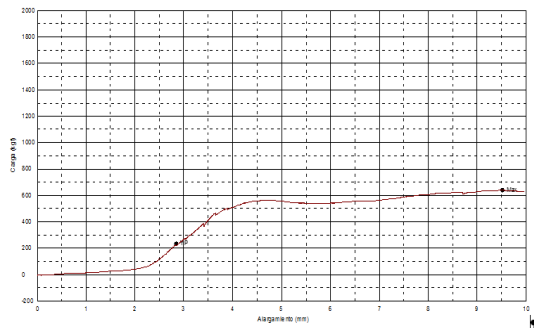


Figura 1: Gráfica de Compresión de la
Baldosa Única (Elaboración Propia)

4.1.3. Pruebas de compresión de la baldosa unitaria y el sensor piezoeléctrico.

Al igual que en las pruebas anteriores se utilizaron las baldosas unitarias para realizarles el ensayo de compresión, la diferencia con la prueba anterior recae en que en esta prueba se inserta el piezoeléctrico muy parecido a como estaría colocados en la baldosa completa a excepción de las zapatas, esta prueba tiene como objetivo poder analizar el comportamiento del piezoeléctrico en conjunto con el punzón de la baldosa.

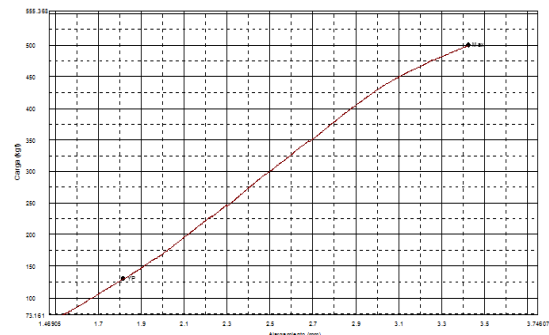


Figura 2. Gráfica de compresión de la
baldosa única junto a un piezoeléctrico
(Elaboración Propia)

Lo que nos indican las gráficas es que necesitan una gran fuerza para que éstas se fracturen, y los daños que presentaron las piezas son mínimos, por lo que se llega a la conclusión que el material es correcto y soporta sin problema 300Kgf sin fracturarse, por tanto una baldosa más grande de 30*30 cm con todos los componentes podrá resistir fácilmente incluso más peso,

4.2. Prototipo Final

El prototipo fue fabricado con el uso de una impresora 3D, éste es una versión más pequeña de la baldosa completa ya que cuenta con un total de 9 ranuras para sensores



piezoeléctricos, tiene ranuras para así poder conectar los cables a las zapatas y un orificio para permitir que todos los cables salgan para ser conectados al circuito del harvesting, el cual está montado provisionalmente en un protoboard junto a la batería recargable y la serie de leds que se energizarán con la energía producida por los piezoeléctricos.

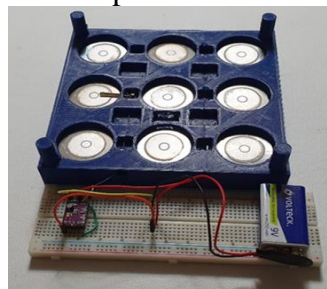
En la figura 14 se puede observar la baldosa cerrada, ésta sería su posición de uso típico o diario, esta viene con una separación que es necesaria para que se compriman de manera eficiente los sensores piezoeléctricos.



*Figura 14. Prototipo de Baldosa
(Elaboración Propia)*

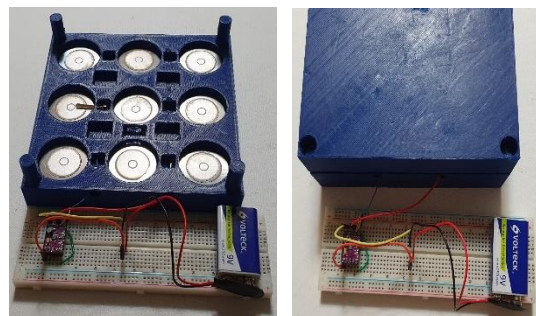
En la figura 15 se muestra como estarían posicionados los piezoeléctricos en la base de la baldosa, estos se colocarán sobre una zapata eléctrica que se tomará como el polo negativo mientras que en la parte de arriba tal y como lo muestra el primer piezoeléctrico de la segunda fila, la zapata presiona el cerámico volviéndose en el polo positivo del piezoeléctrico, se planea colocar en la orilla del piezo un material aislante para que la zapata superior sólo presione el material cerámico y no tenga contacto con la parte metálica que sería el polo negativo. Además se puede observar cómo salen los cables por las ranuras de la base hasta llegar al circuito de Harvesting, el cual es

encargado de almacenar la energía en la batería, la cual es recargable, esta batería se seleccionó simplemente para la realización de las pruebas.



*Figura 15. Vista del prototipo armado
(Elaboración Propia)*

Finalmente, en la figura 16 se puede observar la conexión del circuito Integrado de Harvesting al prototipo, el cual ya tiene los piezoeléctricos. A su vez éste va conectado a la batería recargable, la cual será cargada en su totalidad por la baldosa y posteriormente se usará esta energía para alimentar una serie de leds de baja potencia. La baldosa armada fue sometida a una prueba muy corta de generación de energía eléctrica.



*Figura 16. Vista superior del prototipo
conectado al circuito Harvesting y Batería
recargable (Elaboración Propia)*

La baldosa completamente armada se le realizaron una serie de pruebas para determinar el voltaje que la baldosa en su totalidad genera, la tabla 6 muestra que el voltaje generado por un sólo piezoeléctrico. El



valor máximo obtenido es de 50.07V, mientras que el mínimo es de 20.05V el problema de esta forma de generación de energía como se puede observar, es que el voltaje es sumamente que genera el sensor es alto pero la corriente es mínima, además que el voltaje no es continuo por lo que no podrían energizar de forma constante los focos LEDS.

El voltaje después de pasar por el Circuito Integrado de Harvesting es de 3.3 V, además de que se obtiene una corriente aproximada de 99mA, por lo que se comprueba que el uso del circuito integrado de Harvesting hace el voltaje constante aunque no llega a los niveles de voltaje iniciales (50.07 V), sin embargo se logra que el voltaje sea de CD, además de incrementar la corriente significativamente, por lo que se puede considerar en energizar algo más potente que los LEDS.

Tabla 6. Resultados de Voltajes producidos por el prototipo (Elaboración Propia)

| Medición ^a | Voltaje-generado-solos-(AC) ^a | Voltaje-CD-usando-LTC-3588-1 ^a |
|-----------------------|--|---|
| 1 ^a | 20.05 ^a | 3.33 ^a |
| 2 ^a | 47.3 ^a | 3.33 ^a |
| 3 ^a | 24.6 ^a | 3.33 ^a |
| 4 ^a | 29.7 ^a | 3.33 ^a |
| 5 ^a | 30.09 ^a | 3.33 ^a |
| 6 ^a | 32.32 ^a | 3.33 ^a |
| 7 ^a | 50.07 ^a | 3.33 ^a |
| 8 ^a | 32.17 ^a | 3.33 ^a |
| 9 ^a | 22.79 ^a | 3.33 ^a |
| 10 ^a | 32.12 ^a | 3.33 ^a |
| 11 ^a | 45.13 ^a | 3.33 ^a |
| 12 ^a | 48.78 ^a | 3.33 ^a |
| 13 ^a | 24.56 ^a | 3.33 ^a |
| 14 ^a | 43.22 ^a | 3.33 ^a |

4.3. Conclusiones

Al analizar las propiedades de los materiales piezoeléctricos de generar energía eléctrica al comprimir su estructura, se propusieron distintos diseños de baldosas piezoeléctricas en los que se buscaba optimizar la energía mecánica producida por las pisadas de la gente de tal forma que el uso de esta tecnología pudiera aprovecharse en generar energía eléctrica capaz de ser utilizada en alguna aplicación práctica.

Aunque ha sido ampliamente estudiado este efecto, el problema principal de los piezoeléctricos es la calidad del material que se utiliza para su fabricación, ya que el material del que están hechos afecta de gran manera la tensión producida por los mismos.

En este proyecto se utilizaron piezoeléctricos genéricos de una calidad aceptable, pero económicos para demostrar las propiedades eléctricas con las que cuentan y debido a esta calidad baja en su fabricación difiere mucho las tensiones resultantes de los piezoeléctricos, al analizar estos llegamos a la conclusión que utilizando los piezoeléctricos seleccionados en el capítulo 3 se puede establecer un patrón con valores de tensión y corrientes mayores por lo que generarían más potencia que se utilizara para energizar un mayor número de leds de alta potencia.

El proyecto está enfocado a áreas que requieran poca iluminación, ya que la generación de energía de los piezoeléctricos aún está en desarrollo, así como mejores formas de recolección y aumento de la energía producida por estos mismos, para poder utilizar esta tecnología a gran escala.

A pesar de los ensayos realizados el tiempo de vida de los materiales es incierto, debido al desgaste que estos pueden presentar a escala microscópica, así como la diferencia de calidad de fabricación que pudimos observar en los piezoeléctricos usados.

Las mayores ventajas observadas en este proyecto es que el mantenimiento que requiere es mínimo e implica un tiempo mínimo debido al diseño logrado, ya que consiste en reemplazar la pieza del sensor deteriorada o dañada y la revisión periódica de las baterías, esto aunado a que el gasto de instalación solo se realiza una vez, por lo que puede ser usado como una fuente de generación alterna limpia y práctica.



4.4. Bibliografía

Abee, J. M. (Octubre de 2012). *Electronic Design*.
Obtenido de
<https://www.electronicdesign.com/power/what-piezoelectric-effect>

Anteroinen, J. (7 de Septiembre de 2016). *Smart Memphis*. Obtenido de <http://www.smart-memphis.eu/project-news/2016/world-class-pzt-thin-film-solutions-at-mems-foundry-silex>

B. Jaffe, W. R. (1971). *Piezoelectric Ceramics*.
Londres: Academic Press London and New York.

Baena, O. J. (2011). *Baldosas cerámicas y gres porcelánico: un mundo en permanente evolucion*.
Obtenido de
<http://bdigital.unal.edu.co/40184/1/71680768.201113.pdf>

Baena, R. (2011). *Baldosas Ceramicas y un gres porcelánico: un mundo en permanente evolucion*.
Medellin: O.

Bourzac, K. (08 de Noviembre de 2010). *MIT Technology Review*. Obtenido de
<https://www.technologyreview.com/s/421577/nanogenerator-powers-up/>

Clasificación de las baldosas según su uso. (3 de Septiembre de 2018). Obtenido de Bigmastimaeltello.com:
https://www.bigmastimaeltello.com/catalogo/catalogo08_09.pdf [Accessed 3 Sep. 2018].

Davies, G. H. (1 de Noviembre de 2015). *ghdavies*.
Obtenido de
http://www.garethhuwdavies.com/environment/green_tech/pavegens-footstep-energys-advance-faster-than-solar/

Energy Floors. (s.f.). *Energy Floors Inc*. Obtenido de <https://www.energy-floors.com/sustainable-dance-floor/>

Gobierno Federal . (s.f.). *gob.mx*. Obtenido de <https://www.gob.mx/inifed/acciones-y-programas/funciones>

Gonzalez, I. A. (2009). *Materiales Piezoelectricos y Efecto Piezoelectrico*. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza. Obtenido de <http://www1.frm.utn.edu.ar/tecnologiae/apuntes/piezoelectricidad.pdf>

Green Energy. (2007). *Green Energy HelpFiles*.
Obtenido de
<http://www.greenenergyhelpfiles.com/piezoelectriccrystal.htm>

IMPRESORAS 3D. (2018 de ENERO de 23). *IMPRESORAS 3D*. Obtenido de <https://www.impresoras3d.com/filamento-nylon/>

Locker, A. (05 de ENERO de 2019). *ALL3DP*. Obtenido de ALL3DP: <https://all3dp.com/1/petg-filament-3d-printing/#section-petg-filament-explained-and-compared>

Lopez Sancho, J. M., & Moreno Gomez, E. (2014). *Museo Virtual de la Ciencia CSIC*. Obtenido de CSIC:
http://museovirtual.csic.es/csic75/instrumentos/cuarzo_piezoelectrico/cuarzo_piezoelectrico.html

MatWeb. (2009). *MatWeb Material Property Data*. Obtenido de <http://www.matweb.com>

Mecafenix, F. (3 de Julio de 2018). *ingmecafenix*. Obtenido de
<http://www.ingmecafenix.com/automatizacion/sensores/sensor-piezoelectrico/>

Meneu, J. J. (s.f.). *Arrow*. Obtenido de Seiko Epson Corp: <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/piezo-sensors-thrive-under-stress-take-strain-off-users-minds>

MTS Systems Corporation. (2014). *PCB PIEZOTRONICS*. Obtenido de PCB PIEZOTRONICS. Web site:
http://www.pcb.com/Resources/Technical-information/Tech_Force



Mullen, W. (2018). What is Produced in a Piezoelectric crystal? *Quora*, <https://www.quora.com/What-voltage-is-produced-by-a-Piezoelectric-crystal-AC-or-DC>.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY. (2009). *NPL CORPORATION*. Obtenido de <http://www.npl.co.uk/science-technology/advanced-materials/materials-areas/functional/standards-for-piezoelectric-ceramic-materials>

Naylamp Mechatronics. (s.f.). Obtenido de <https://naylampmechatronics.com/actuadores-arduino/361-modulo-energy-harvester-ltc3588.html>

Nikulin, D. y. (1983). Ensayo a la Compresión. En N. y. Drozdov, *Estudio de Materiales Eléctricos*. La Habana: Pueblo y Educación.

Physical Engineering. (s.f.). *ATCP*. Obtenido de ATCP: <https://www.atcp-ndt.com/es>
Piezo Systems. (s.f.). *piezo*. Obtenido de <http://www.piezo.com/>

RESTREPO, S. S. (9 de NOVIEMBRE de 2017). *3DNATIVES*. Obtenido de <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografia-les-explicamos-todo/>

Revista ARQHYS. (2019). *ARQHYS*. Obtenido de <https://www.arqhys.com/articulos/firme-concreto.html>

Rivas, A. (05 de Febrero de 2013). *Mundo Informático*. Obtenido de <http://mundoinformatico321.blogspot.com/2013/02/diagrama-funcional-y-diagrama-de-arbol.html>

Rodriguez, M. C. (2000). Actuadores Piezoelectricos. *Ingenierias*, 22-28.

Ruiz, A. L. (2015). *Transistores web*. Obtenido de rabfis15: http://rabfis15.uco.es/transistoresweb/tutorial_general/otrosDatos.html

Sensor Technology Ltd. (s.f.). *Sensor Technology Ltd*. Obtenido de <https://sensortechcanada.com/wp-content/uploads/2014/03/Piezoelectric-Ceramic-Materials.pdf>

Sunmaster Solar Light Manufacturer. (s.f.). *Sunmaster*. Obtenido de <https://es.solarlightsmanufacturer.com/ventajas-de-las-baterias-de-gel/>

|
r