

ANALISIS DE VIABILIDAD PARA DESARROLLO DE PROTOTIPO DE ACERA
QUE PRODUCE ELECTRICIDAD

DANIEL R. ZAPATA VALENCIA
GERALDINE BUSTAMANTE RUEDA

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA INDUSTRIAL
MEDELLÍN
2012

ANALISIS DE VIABILIDAD PARA DESARROLLO DE PROTOTIPO DE ACERA
QUE PRODUCE ELECTRICIDAD

DANIEL R. ZAPATA VALENCIA
GERALDINE BUSTAMANTE RUEDA

Proyecto presentado para optar el título de Ingeniero Industrial

Asesor

Diego Mauricio Yepes Maya I.I. M.Sc.

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA INDUSTRIAL
MEDELLÍN

2012

DEDICATORIA

Este trabajo se lo queremos dedicar a nuestros padres; a quienes les debemos todo lo que somos en la vida, gracias a su apoyo y dedicación constante.

Gracias por apoyarnos en nuestras derrotas y por celebrar con nosotros nuestros triunfos.

En los momentos de crisis, sólo la imaginación es más importante que el conocimiento.

Albert Einstein.

AGRADECIMIENTOS

Le queremos agradecer a las personas que creyeron y apoyaron este proyecto. En especial a nuestro asesor Diego Mauricio Yepes Maya, quien nos brindó todo su apoyo y nos hizo creer más en este proyecto, gracias por todo.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	6
1 Estado del Arte	10
1.1 Modelo del caminar.....	10
1.2 Métodos de transducción de energía mecánica a energía eléctrica	11
1.2.1 Transducción Electrostática.....	11
1.2.2 Transducción por Generador de Rotación Electromagnética.....	12
1.2.3 Transducción Piezoeléctrica.....	13
1.3 Características de los materiales Piezoeléctricos.....	14
1.3.1 Fundamentos teóricos	15
1.3.2 Propiedades de los materiales piezoeléctricos.....	16
1.3.3 Modelo eléctrico de materiales piezoeléctricos	18
1.4 Aplicaciones recientes de la tecnología bajo el principio piezoeléctrico	19
1.5 Aplicaciones de los discos como baldosas	21
2 Metodología.....	25
2.1 Modelo Matemático.....	25
2.2 Diseño conceptual.....	28
3. Descripción de la fase experimental.....	34
4. Resultados de la experimentación.....	40
5. Resultados del modelo.....	43
6. Conclusiones.....	44
Bibliografía.....	46
lista de tablas	50
lista de figuras.....	51
lista de graficas.....	52
Anexos	53
Anexo A: Cotización de los discos piezoeléctricos	53
Anexo B: Baldosa con los discos piezoeléctricos	54
Anexo C: Rectificador de onda completa con diodos IN 7004.....	55
Anexo D: Capacitor de 100 micros Faraday y 16 voltios	56

INTRODUCCIÓN

Colombia actualmente cuenta con gran cantidad de recursos y alternativas para la generación energía eléctrica. Las fuentes de energía pueden ser de origen hídrico, eólica, carbonífera o de cualquier otro precursor fósil. Lo que lo ubica como un actor importante en la canasta energética regional.

Dentro del marco de las energías alternativas, se pueden encontrar una gran gama de sistemas para generación de energía, algunos dependen de elementos mecánicos y electrónicos como son las granjas eólicas y los sistemas de aprovechamiento del sol como energía. Sin embargo existen sistemas de menor capacidad pero igualmente funcionales, como en el caso de las celdas piezoeléctricas, que tienen la capacidad de general energía al ser sometidas a un esfuerzo mecánico.

El principio de funcionamiento de las celdas piezoeléctricas, lo que busca es tratar de transformar la energía cinética de los pasos de un individuo que transite sobre la acera en energía eléctrica. La acera que genera energía consta de una serie de baldosas que remplazan las baldosas del piso, con la diferencia de que estas tienen la capacidad de generar energía eléctrica a través de la deformación mecánica de un grupo de discos piezoeléctricos.

Implementar tecnología de transformación de energía basada en el efecto piezoeléctrico en lugares de alto tráfico peatonal, vehicular y hasta sistemas ferroviarios es posible; generar grandes cantidades de energía limpia que puede utilizarse para complementar las necesidades de consumo energético de las edificaciones. En estudios previos (Starner, 1996), se ha calculado que hasta 67 vatios de potencia están disponibles en un golpe de talón durante una caminata a paso ligero (En una persona de 68 kg, a 2 pasos / seg, el talón moviéndose 5 cm). Este nivel de extracción de energía a partir de una caminata, sin duda,

interfiere en gran medida con la propia marcha (Kymissis, Kendall, Paradiso, & Gershenfeld, 1998).

La palabra “piezo” se deriva de la palabra Griega presión que significa estrechar, apretar u oprimir. En 1880, Jacques y Pierre Curie descubrieron que al aplicar presión a un cristal de cuarzo se establecían cargas eléctricas en este; ellos llamaron a este fenómeno “el efecto piezoeléctrico”. Más tarde ellos verificaron que un campo eléctrico aplicado al cristal proporcionaba una deformación al material. Este efecto era referido como “efecto piezo inverso”. Los materiales piezoeléctricos, por lo tanto, pueden ser utilizados para convertir energía eléctrica en mecánica y viceversa (Cúpich & Garza, 2000).

Los piezoeléctricos son fabricados de diversos materiales siendo los cerámicos los más empleados actualmente; los cerámicos son utilizados como vibradores, estos, se pueden observar en osciladores, altavoces y micrófonos, y también se utilizan como actuadores. Otra de las aplicaciones en que se puede aplicar el uso de cerámicas piezoeléctricas pero que aún está en fase de desarrollo es la producción de pequeños motores electromagnéticos que funcionan sin generar fricción entre sus componentes. Los sensores piezoeléctricos de cerámica también son aplicados a la medición de variables cinemáticas y cinéticas en las áreas de biomedicina y biomecánica.

En la actualidad se ha empezado a crear conciencia sobre la problemática de la escases de recursos fósiles para la generación de energía eléctrica, por esta razón se han fomentado iniciativas el caso de Andrew Charalambous; Quien abrió una discoteca en Londres llamada *Club4Climate* ©, la cual posee una pista de baile que funciona bajo el principio de la piezoelectricidad (ecodez, 2011). En Rotterdam, Holanda también se abrió una discoteca sostenible similar a la anterior llamada *Sustainable Dance Club* Derechos reservados (ecodez, 2011).

La tecnología de cerámicas piezoeléctricas no es del todo nueva, su aplicación es cada vez más popular en diferentes áreas de la investigación y el desarrollo tecnológico, lo cual ha despertado un interés generalizado en su implementación como generador de energía alternativa. Tal es el caso de Pavegen Systems © empresa creada por Laurence Kemball-Cook, encargada de fabricar baldosas que acumulan la energía cinética producida por la gente que camina sobre ellas (Pavegen, 2011).

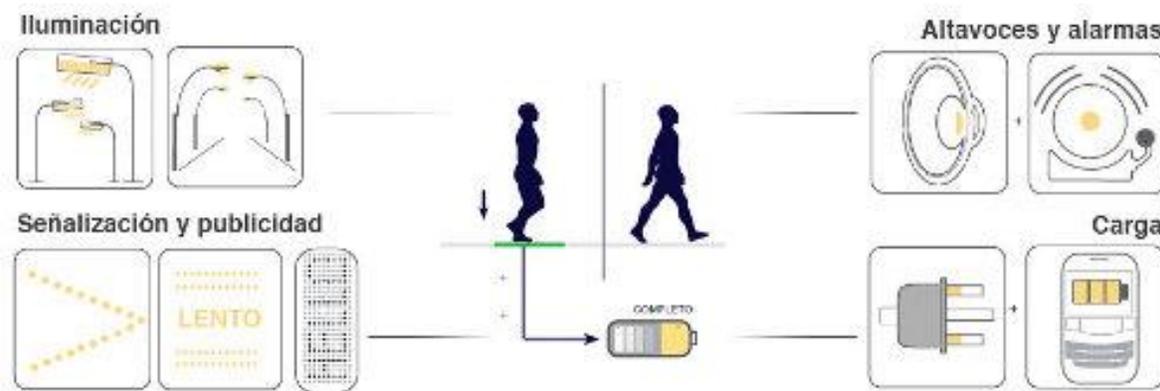


Figura 1 Funcionamiento de las baldosas Pavegen y dispositivos de aprovechamiento de la energía generada. (Pavegen, 2011)

En la figura 1 se puede observar que la energía generada por las baldosas Pavegen puede ser almacenada en baterías o utilizada directamente como alimentación de bajo voltaje en aplicaciones fuera de la red: alumbrado público, señalización, o sistemas de publicidad, entre otros.

Ideas similares al principio de funcionamiento de los piezoeléctricos han empezado a surgir, como lo proponen dos estudiantes de arquitectura del instituto tecnológico de Massachusetts, Estados Unidos (MIT). James Graham y Thaddeus Jusczik “plantan un sistema que genera energía por medio del movimiento de una pequeña dínamo en una determinada dirección, y al levantar su presión del ladrillo (en el momento de dar un paso) esto haría que el dínamo gire en la otra dirección, con lo cual se podría obtener energía gracias a un generador” (Palazzesi, Pardo, Sacco, Benítez, Ferzzola, & Varona, 2010).

Actualmente “la empresa israelí *Innowattech* ©, en colaboración con el Technion-Israel Institute of Technology, ha desarrollado un método para generar electricidad a partir del tráfico, aprovechando la presión de los vehículos sobre el suelo” (Esplandiú, 2009).

Con esta investigación se busca diseñar un prototipo funcional para la transformación de energía con base en el principio de piezoelectricidad, como una opción para generar energía eléctrica a baja escala para aplicaciones en sistemas eléctricos que requieran alimentación de baja tensión. También se busca medir la eficiencia del prototipo en cuanto a la energía generada y la calidad de los materiales empleados.

1 Estado del Arte

1.1 Modelo del caminar

El movimiento humano está controlado por el sistema neuro-muscular. El caminar es un ejemplo básico de los movimientos humanos, éste puede ser entendido como un proceso mecánico pasivo (Garcia, Ruina, Coleman, & Chatterjee, 2010). Caminar es un movimiento que se realiza para desplazarse en el que intervienen los pies, piernas y rodillas; el modelo generalmente aceptado para esta actividad está dado por el modelo del péndulo invertido, ya que la pierna de apoyo se comporta como un péndulo invertido en movimiento sobre el pie postura, y la pierna en movimiento como un péndulo regular de oscilar alrededor de la cadera. (Kuo, Donelan, & Ruina, 2005).

En la figura 2 se muestra el diagrama esquemático del modelo del péndulo invertido simple en el caminar, que no requiere energía para el movimiento pendular, sino más bien para redirigir el centro de masa (CDM) del cuerpo entre los pasos. En el momento del soporte individual (cuando solo una pierna hace contacto con el suelo), el péndulo rígido conserva su energía mecánica y el CDM puede ser mantenido sin ninguna fuerza muscular. Las fases del soporte individual son separadas consecutivamente con la fase de soporte doble (comenzando con el golpe del talón) cuando una pierna de apoyo es sustituida por la otra.

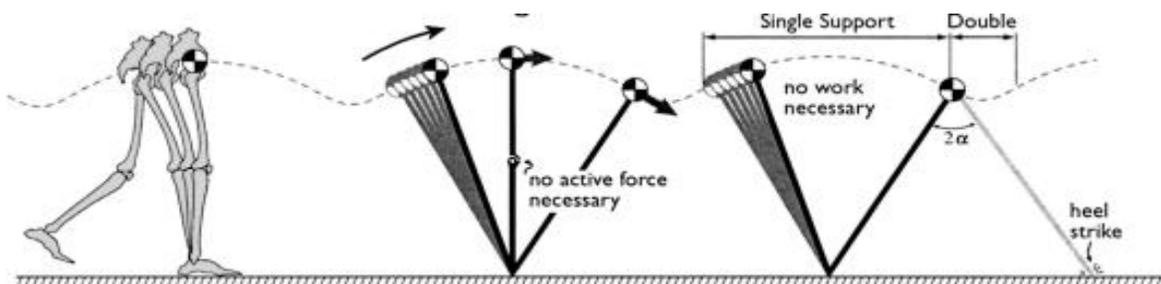


Figura 2 Modelo del caminar como Péndulo invertido. (Kuo, Donelan, & Ruina, 2005)

1.2 Métodos de transducción de energía mecánica a energía eléctrica

La capacidad de ciertos dispositivos de transformar una forma de energía en otra ha sido siempre objeto de estudio (Escalera Siles, 2012). Existen tres mecanismos básicos por los que las vibraciones se pueden convertir en energía eléctrica: electro-magnético, electrostática, y piezoeléctrico (Roundy, Wright, & Rabaey, 2002).

1.2.1 Transducción Electroestática

La Transducción electrostática es la generación de energía a pequeña escala, los generadores electrostáticos son capacitores variables, los cuales se basan en un condensador de placas paralelas que pueden alejarse o acercarse como consecuencia de una onda sonora o de la aplicación de una tensión variable (Miyara, 2003). La transducción electroestática es poco práctica e ineficiente en el funcionamiento de máquinas grandes, pero se adaptan bien a los sistemas micro-electro-mecánicos (MEMS), ya que estos funcionan a escala relativamente pequeña (Mitcheson, Yeatman, Rao, Holmes, & Green, 2008).

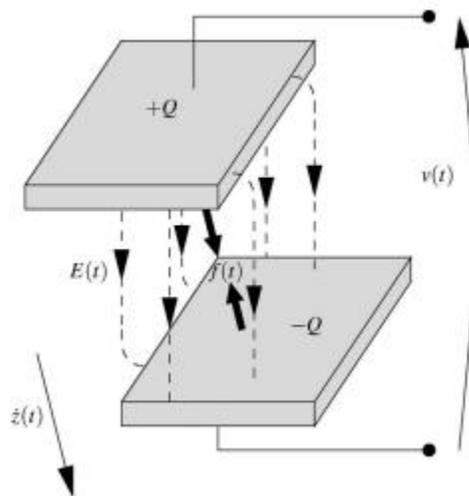


Figura 3 Principio de Funcionamiento del Transductor Electrostático. **(Mitcheson, Yeatman, Rao, Holmes, & Green, 2008)**

La figura 3 ilustra una estructura de placas paralelas con separación variable y superposición constante y con un desplazamiento mínimo en el campo, la fuerza del campo es proporcional a la carga constante, así la densidad del campo eléctrico es independiente de la separación de las placas (Mitcheson, Yeatman, Rao, Holmes, & Green, 2008).

1.2.2 Transducción por Generador de Rotación Electromagnética

En 1831, luego de una larga serie de experimentos, Michael Faraday encontró una relación nueva entre efectos eléctricos y magnéticos (Universidad de Antioquia , 2000). Faraday estaba convencido de la simetría en las leyes de la naturaleza, y de la observación de la inducción electrostática y la "inducción" de efectos magnéticos por corrientes eléctricas, creía que un campo magnético debía crear efectos eléctricos (Fernández, 2004).

La transducción por generador de rotación electromagnética es de pocos vatios, su funcionamiento en resumen es la variación en el tiempo del flujo magnético encerrado por un circuito que produce sobre él una fuerza electromotriz, que tiende a hacer circular una corriente que a su vez, genera un flujo magnético que se opone a los cambios del flujo original, el cambio temporal de flujo magnético se puede deber a que el campo de inducción magnética original cambia en el tiempo (Fernández, 2004).

1.2.3 Transducción Piezoeléctrica

La generación de energía eléctrica a partir de energía procedente del entorno ha permitido aprovechar en los últimos años el efecto piezoeléctrico en la alimentación de dispositivos de baja potencia (Roundy, Wright, & Rabaey, 2002). Los materiales piezoeléctricos se pueden utilizar como un medio para transformar las vibraciones del entorno en energía eléctrica, esta puede ser almacenada o utilizada para alimentar otros dispositivos como microscopía, scanner de espejo rápido, sintonización de láser, dispositivos micro dispensadores, estimulación de audio fisiología, entre otros. Con el reciente aumento de los dispositivos de escala micro, la generación de energía piezoeléctrica puede proporcionar una alternativa conveniente a las fuentes de energía tradicionales que se utilizan para operar ciertos tipos de sensores, actuadores, y dispositivos MEMS (Sodano & Inman, 2005).

Los materiales piezoeléctricos poseen la capacidad de generar energía eléctrica cuando se ven sujetos a un esfuerzo mecánico (efecto piezoeléctrico directo). Éstos también ven afectada su forma, si en el caso inverso, (efecto piezoeléctrico inverso) se ven sometidos a una carga eléctrica (Escalera Siles, 2012).

En la figura 4 se observa que cuando una fuerza externa es aplicada a un transductor piezoeléctrico, una parte del trabajo mecánico realizado se almacena como energía potencial elástica, y otra parte en el campo eléctrico asociado con la polarización inducida del material. Si se proporciona un patrón de conducción externo a través de la carga, resulta una corriente que neutraliza la carga neta (Mitcheson, Yeatman, Rao, Holmes, & Green, 2008).

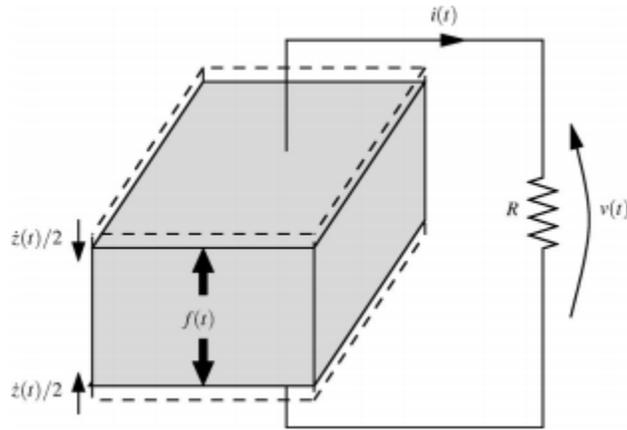


Figura 4 Principio de Funcionamiento del Transductor Piezoeléctrico. (Mitcheson, Yeatman, Rao, Holmes, & Green, 2008).

1.3 Características de los materiales Piezoeléctricos

Los materiales piezoeléctricos presentan la propiedad única conocida como el efecto piezoeléctrico. Cuando estos materiales se someten a un esfuerzo de compresión o de tracción, un campo eléctrico se genera a través del material creando un gradiente de voltaje y un flujo de corriente subsiguiente. Este efecto se debe a la naturaleza asimétrica de su celda unitaria, cuando se aplica un esfuerzo. (Katz, 2004)

La celda piezoeléctrica contiene una pequeña partícula cargada positivamente en el centro Fig.5 (a), cuando se aplica un esfuerzo esta partícula se desplaza en una dirección que crea una distribución de carga y un campo eléctrico posterior Fig.5 (b). Los materiales piezoeléctricos vienen en formas diferentes, el más común son cristales pero también se encuentran como plásticos y cerámicas (Katz, 2004).

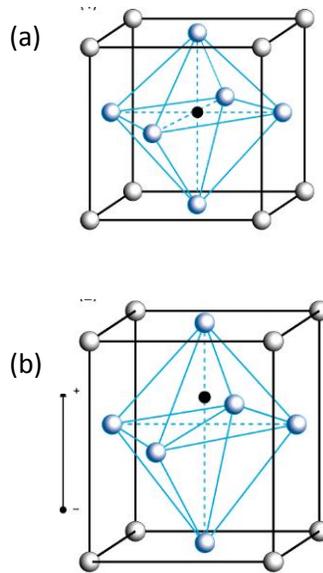


Figura 5. Celda piezoeléctrica (a) antes de polarizarse (b) Después de polarizarse. **(Katz, 2004)**

1.3.1 Fundamentos teóricos

Dependiendo de la disposición de los electrodos y de la dirección de polarización en el elemento piezoeléctrico se obtendrá una señal eléctrica proporcional al esfuerzo en una determinada dirección. La ecuación 1 representa el efecto de acoplamiento debidos a la variación en la deformación y el campo eléctrico en las tres direcciones ortogonales. La notación de tensores que se adopta y los ejes de referencia son evidenciados en la figura 6. Definiendo la dirección de polarización de la cerámica como el eje 3, se tiene una relación entre la tensión mecánica experimentada por el material, el campo eléctrico aplicado y el desplazamiento eléctrico resultante, dado por:

$$D_i = \varepsilon_i E_i + d_{ij} T_j \quad (1)$$

Donde d_{ij} es el tensor de constantes piezoeléctricas de carga, habitualmente denominadas simplemente constantes piezoeléctricas, D_i es el vector de

desplazamiento eléctrico, E_i es el vector campo eléctrico, ϵ_{ij} es el tensor permeabilidad eléctrica y T_j es el tensor de esfuerzos mecánicos.

Por convención, el primer subíndice de las constantes piezoeléctricas indica la dirección del campo y el segundo la dirección del esfuerzo aplicado. Un cerámico piezoeléctrico tiene sólo un tipo de matriz de constantes piezoeléctricas, sea cual sea la simetría de los mono cristales constituyentes. Como todo material polí cristalino, el cerámico piezoeléctrico es inicialmente isotrópica, es decir que las propiedades físicas de los piezoeléctricos no dependen de la dirección. Pero esta isotropía es destruida en la dirección del campo de polarización, manteniéndose en el plano perpendicular a esté (Moreno, y otros, 2004).

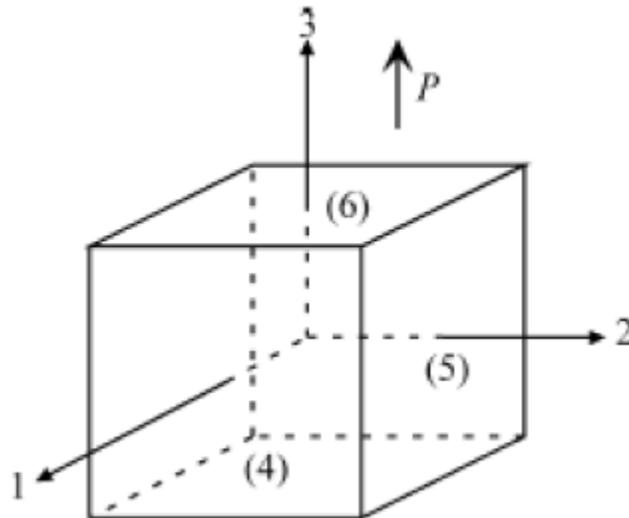


Figura 6. Convención para la expresión de las ecuaciones constitutivas del medio piezoeléctrico. (Moreno, y otros, 2004).

En la figura 6 se reflejan los ejes de referencia que definen la dirección de polarización del material piezoeléctrico.

1.3.2 Propiedades de los materiales piezoeléctricos

El efecto piezoeléctrico se descubrió en materiales naturales como el cuarzo, la turmalina, la sal de Rochelle y el topacio; con el tiempo se han descubierto

materiales como los cerámicos y los policristalinos, obteniendo mejores propiedades como la rigidez, la ductilidad, entre otras. Los materiales más utilizados hoy en día son el titanato de bario (BaTiO_3) y el (PZT) Zirconato Titanato de Plomo (Cúpich & Garza, 2000).

El desplazamiento de los cerámicos PZT es función de la intensidad del campo eléctrico aplicado E , del material utilizado y de la longitud L del cerámico PZT, las propiedades de este material pueden ser descritas por los coeficientes piezoeléctricos de deformación unitaria d_{ij} . Estos coeficientes describen la relación entre el campo eléctrico aplicado y la deformación mecánica producida. El desplazamiento D_L de un piezoactuador de una sola capa, sin carga, puede ser estimada por medio de la ecuación 2 (Cúpich & Garza, 2000).

$$D_L = \pm E * d_{ij} * L_o \quad (2)$$

Dónde:

L_o = longitud del cerámico

E = intensidad del campo eléctrico

D_{ij} = coeficiente piezoeléctrico de deformación unitaria

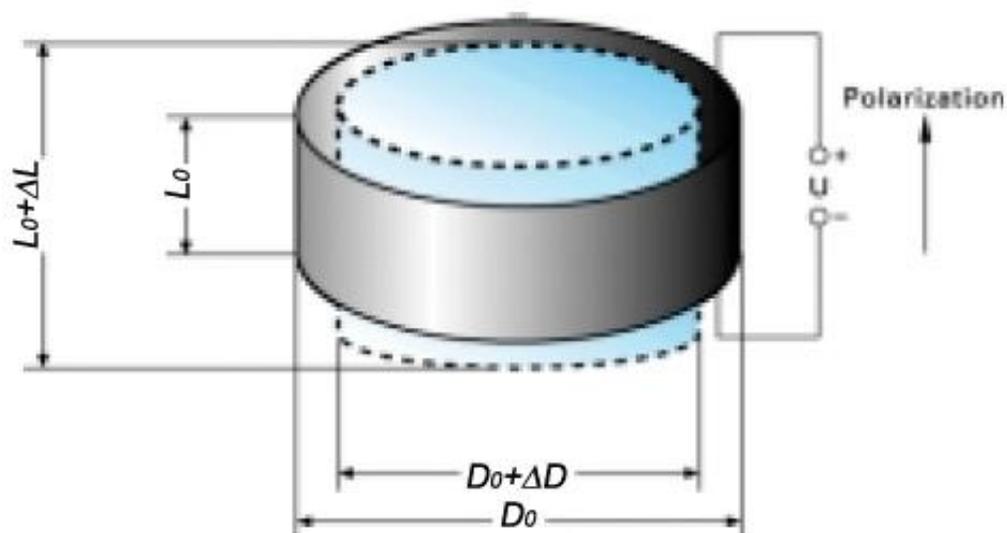


Figura 7. Elongación y contracción de un disco de PZT cuando se le aplica un voltaje.
(Cúpich & Garza, 2000)

La figura 7 muestra la polarización de un disco piezoeléctrico dependiendo del nivel de deformación y el sentido de la misma, al deformar el disco en una dirección el cerámico se polariza con respecto al material metálico. Al regresar el disco a su estado de reposo o invirtiendo el sentido de la deformación, de igual manera cambia el sentido de la polarización dando como resultado una corriente alterna. En el capítulo 2 se especifican las cantidades de voltaje y corriente que se obtienen dependiendo de las dimensiones del transductor.

1.3.3 Modelo eléctrico de materiales piezoeléctricos

El efecto piezoeléctrico es reversible, es decir que la aplicación de un potencial eléctrico a un cristal piezoeléctrico produce deformación. Los piezoeléctricos son dispositivos de alta impedancia, por esto solo pueden suministrar corrientes muy pequeñas (Jiménez, 1995)

Las tensiones mecánicas que aparecen en un dieléctrico isótropo que se encuentra en un campo eléctrico constituyen un efecto que es cuadrático respecto del campo. Este mismo efecto se observa en los cristales. Sin embargo para ciertos tipos de simetrías de la estructura cristalina esta dependencia tiene un carácter esencialmente distinto. Las tensiones internas que aparecen en los cristales son aproximadamente lineales con el campo. Despreciando las contribuciones de orden mayor, como se muestra en la ecuación 3 (Honoré & Mininni, 1996).

$$\varepsilon = d * E \quad (3)$$

Donde ε es el tensor de deformaciones, d es el tensor piezoeléctrico y E es el campo eléctrico.

De la misma forma, frente a deformaciones del dieléctrico aparece un campo lineal con las tensiones mecánicas internas, como se indica en la ecuación 4 (Honoré & Mininni, 1996).

$$P = d * \sigma \quad (4)$$

Donde P es el vector polarización y σ el tensor de tensiones. Este fenómeno es llamado efecto piezoeléctrico (Honoré & Mininni, 1996).

1.4 Aplicaciones recientes de la tecnología bajo el principio piezoeléctrico

Hoy en día se han promovido diferentes iniciativas empresariales e institutos de investigación que se centran en la búsqueda de aplicaciones útiles para las fuentes de energía mediante el uso de piezoeléctricos.

James Graham y Thaddeus Juscik llevaron a cabo un proyecto, el cual consistía en alinear en la parte inferior de un zapato transductores piezoeléctricos, utilizaron dos materiales piezoeléctricos, que fueron fluoruro de polivinilideno (PVDF) y zirconato titanato de plomo (PZT). Sus primeros resultados fueron que el material PVDF generaba 1,3 mW por el impacto del pie. El PZT produjo alrededor de 8,4 mW (Katz, 2004).

MicroStrain Inc ©, es una compañía que desarrolló un experimento en donde transductores piezoeléctricos se adjuntan a las vigas de soporte de una estructura, a medida que la estructura era sometida a una tensión. La tensión creada por los materiales piezoeléctricos se almacena en un condensador. Una vez que el voltaje del condensador alcanza un cierto nivel, la potencia se transfiere a un transmisor que envía una señal inalámbrica a algunos receptores. Se informó de que el

tiempo de ciclo fue de aproximadamente 20 a 80 segundos para almacenar hasta una carga de 9,5 V en el condensador, el tamaño del piezoeléctrico fue de 17 cm² (Katz, 2004).

J. Paradiso y N. S. Schenk incorporaron un generador piezocerámico al talón de un zapato, que permitiera a través de circuitos adicionales cargar una pequeña batería mientras se camina o se corre. El dispositivo implantado en el zapato logró obtener un eficiencia del 11%. Los dispositivos piezoeléctricos pueden ser colocar en lugares donde existan movimientos mecánicos, golpes y vibraciones como vehículos y maquinaria en general. (Ricardo, 2010) .

La compañía Alemana EnOcean, se especializa en la tecnología de enlaces de RF con fuentes de potencias autogeneradas, crea productos que utilizan transductores piezoeléctricos para alimentar transmisores de RF. Los productos EnOcean, sensores e interruptores de radio, se han diseñado para funcionar sin necesidad de baterías; los sensores e interruptores se pueden transmitir sin necesidad de cables a una distancia de hasta 300 metros y tienen una vida útil hasta 50.000 operaciones (Katz, 2004).

Continuum de Control Corp es una empresa que fabrica dos productos diferentes, uno es llamado el PiezoFlex™ y el otro generador de iPower© .El PiezoFlex™ es un nuevo tipo de material piezoeléctrico que es flexible y robusto, resulta ser económico de fabricar que la mayoría de los otros materiales piezoeléctricos. El segundo producto es el generador de iPower©, el cual contiene un transductor piezoeléctrico que convierte la energía mecánica en eléctrica. Este producto fue utilizado como una fuente de energía de respaldo en una expedición en la antártica hace varios años (Katz, 2004).

1.5 Aplicaciones de los discos como baldosas

La empresa Israelí *Innowattech*® desarrolló un método de generación de electricidad que utiliza la energía mecánica producida por automóviles, trenes y peatones y la convierte en electricidad. Esta tecnología utiliza unos nuevos tipos de generadores piezoeléctricos, que se instalan debajo de las calles y aceras a través de los cuales se puede generar electricidad sin ninguna alteración notoria del ambiente (Esplandiú, 2009).

En enero de 2010, *Innowattech*® llevó a cabo una primera prueba de esta tecnología, se utilizó un método de implementación industrial de losas de hormigón armado en donde los generadores fueron embebidos y colocados debajo de la superficie de una autopista a unos 20cm de profundidad. Se calculó que con esta nueva tecnología será posible generar hasta 500 Kwt en una hora de tráfico por cada kilómetro de cualquier autopista transitada. Esto además de producir electricidad para el consumo, se utilizaría para mantener encendidas todas las señales luminosas en las autopistas. *Innowattech*® ya firmó un lucrativo contrato con la multinacional italiana Impregilo, por 225 millones de euros, para instalar esta tecnología en la autopista que conecta Venecia con Trieste (Paz, 2012).

Otra implementación de los discos piezoeléctricos la realizó Andrew Charalambous en el 2008, un promotor urbanístico Inglés, quien abrió las puertas de un local que denomina “la primera discoteca ecológica de Reino Unido”, llamada *Club4Climate*®. Esta discoteca se encuentra ubicada en Londres, en Pentoville Road. El secreto está en la pista de baile de su eco-discoteca, que utiliza cristales de cuarzo y cerámica piezoeléctricos para transformar cada salto o golpe de zapato en electricidad (Mendoza, 2012). El sistema recarga una serie de baterías conectadas al suelo, que en conjunto proporcionan al menos un 60% de la energía necesaria para llenar el local de luz y sonido (ecodez, 2011) .

La compañía de metro japonesa *East Japan Railway Company*© (JR East), ha instalado en Tokio unas zonas de paso creadas con materiales piezoeléctricos en donde se encuentran ubicados los tornos de entrada, en estas zonas se produce energía, la cual es generada por los pasajeros al caminar sobre ellas. En su fase de prueba esta energía solo se usaba para hacer funcionar un cartel luminoso que indicaba la cantidad de energía generada con este método. Con el paso del tiempo este sistema ha dado buenos resultados y se ha implementado en las máquinas de lectura de los tiquetes de los tornos y en los carteles eléctricos, se espera que este sistema logre superar pruebas de durabilidad de los componentes (tuexperto, 2008).

Con respecto a la cantidad de energía generada, según la compañía, se consiguen obtener 10 vatios por segundo con el sistema funcionando al 90% de su capacidad. El área piezoeléctrica se extenderá a una superficie total de 25 m², situadas en las salidas y otras zonas de paso de la estación Yaesu Kita, se espera conseguir 1.400 KW por segundo, cada día (tuexperto, 2008).

Pavegen Systems©, una nueva empresa inglesa lanzada en 2009 por Laurence Kemball-Cook. Las baldosas de 45 x 60 centímetros, están pensadas para zonas en las que se concentra mucha gente, como estaciones de tren, de metro, de autobús, aeropuertos, colegios y centros comerciales. La energía generada por millones de pisadas puede ser utilizada en múltiples aplicaciones, como iluminación de señales, anuncios digitales o zonas Wi-Fi (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2010).

En Reino Unido y Europa se han llevado a cabo casi 30 proyectos de Pavegen, tanto permanentes como temporales. Desde hace dos años cuatro de estas baldosas, fueron colocadas en la Simon Langton Grammar School, una escuela primaria, cerca de Canterbury. Obtienen energía de las pisadas de sus 1.100 estudiantes para mantener la iluminación del pasillo. También se instalaron veinte baldosas verdes en el centro comercial más grande de Europa, el

Westfield Stratford City, cercano al estadio Olímpico de Londres. Igualmente, han sido de utilidad en festivales de música para cargar teléfonos móviles y encender luces de tecnología LED (Pavegen, 2011).

Una vez que las baldosas Pavegen convierten la energía en electricidad, el 5% se utiliza para iluminar el logo LED de las propias baldosas, y el 95% puede ser directamente utilizado o almacenado para un uso posterior. Pavegen está en la actualidad trabajando en un nuevo sistema que alimentará directamente la red eléctrica. Las baldosas son resistentes al agua, por lo que pueden soportar lluvia, nieve y hielo; y las pruebas efectuadas han demostrado que podrían durar al menos cinco años, pero Kemball-Cook afirma que lo ideal sería que duraran 20 (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2010).

Las baldosas están diseñadas para reducir al mínimo la huella de carbono. El revestimiento superior está hecho de goma reciclada de neumáticos y aproximadamente el 80% de los polímeros utilizados para el resto de los componentes puede ser reciclado. Un paso genera en promedio 7 vatios de electricidad, aunque depende del peso de la persona, y cada paso empuja 5 milímetros hacia abajo la goma (Ecología verde, 2012).

Pavegen se ha asociado con Siemens, la empresa de tecnología alemana, para instalar sus baldosas en la *Federation Square de Melbourne*© (Australia); y tienen planes para una estación de tren en Londres y un centro comercial de Atenas. El interés por esta tecnología también va en aumento en Estados Unidos. Varios colegios están pensando en instalar las baldosas y Kemball-Cook afirma que agencias del gobierno se han mostrado interesadas en su tecnología (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2010).

Actualmente en Colombia se han realizado estudios sobre el principio de los piezoeléctricos, como el desarrollado por Galvis (Galvis, 2010), quien plantea en su trabajo el proceso de captación de energía a partir del ciclo de marcha

humana como una fuente alternativa de energía eléctrica mediante la conversión con un dispositivo de transducción piezoeléctrico. En este trabajo se tuvieron en cuenta tres características importantes para la selección del material piezoeléctrico, estas fueron: flexibilidad, capacitancia y dimensión. El material que cumplió con estas características fue el fluoruro de polivinilo PVDF, este piezoeléctrico hace parte de los piezoeléctrico de polímeros, las propiedades físicas de este material hace que sea el indicado para la aplicación de acoplamiento en zapatos.

La generación de ultrasonido mediante la técnica de piezoelectricidad, es otro tipo de estudio que se ha realizado en Colombia. En esta investigación se determina que el material piezoeléctrico más eficiente es el Titanato de Circonio (PZT), para la generación de ultrasonido. Las aplicaciones tecnológicas del ultrasonido son numerosas, como para el control de procesos y calidad en la industria, ensayos no destructivos en metales y simulación de procesos, entre otras (Martínez Rodríguez, Vitola Oyaga, & Sandoval Cantor, 2007).

2 Metodología

2.1 Modelo Matemático

Los parámetros que se establecen en este apartado serán comparados con los resultados obtenidos en la etapa experimental del desarrollo del producto, con dicha comparación se concluirá sobre aspectos como resistencia, productividad y costos de prototipo.

Para el análisis de comportamiento de la baldosa piezoeléctrica, intervienen distintos parámetros estructurales de los componentes tales como:

1. Tipo de material cerámico.
2. Constante piezoeléctrica.
3. Diámetro del piezoeléctrico.
4. Nivel de deformación.
5. Perdidas de carga.
6. Capacitancia estática del piezoeléctrico.
7. Fuerza ejercida sobre el material.
8. Resistencia de los transductores piezoeléctricos.

Los parámetros o variables de decisión fundamentales para el desarrollo de este proyecto son el diámetro del piezoeléctrico el nivel de deformación alcanzado, la fuerza ejercida sobre el material y la resistencia de los transductores piezoeléctricos.

Con el fin de calcular el potencial o voltaje generado por la deformación del cerámico piezoeléctrico se debe conocer la constante piezoeléctrica correspondiente a dicho material. Esta constante define cuál es la proporción entre la variación dimensional (Δl) del material piezoeléctrico (en metros) y la diferencia de potencial aplicada (en Voltios), y entre la generación de cargas

eléctricas (en Coulombs) y la fuerza aplicada en el material (en Newtons). Valores típicos: De 0,2 a 8 Angstroms por Voltio aplicado, y de 20 a 800 pico Coulomb por Newton aplicado (Gallego, 1989).

La siguiente ecuación define el voltaje generado por una carga mecánica que actúa sobre un área determinada de un piezoeléctrico PZT (Zirconato Titanato de Plomo), con una longitud de deformación del mismo es la siguiente (Johnson Matthey Piezoproducts, 2012).

$$V = -\left(g_{33} * h * \frac{f}{A}\right) = -\left(g_{33} \times h \times \left(\frac{f}{d^2 \times \pi/4}\right)\right) \quad (5)$$

Dónde:

V : es el pico voltaje esperado por la deformación del material

g_{33} : corresponde a la constante piezoeléctrica en unidades de Vm/N (Voltios metro / Newton)

h : hace referencia a la longitud o grosor del piezoeléctrico.

f : es la fuerza que se le imprime al cerámico piezoeléctrico, medida en Newton.

d : es el diámetro efectivo del cerámico piezoeléctrico.

A : área del cerámico piezoeléctrico. A la fuerza aplicada sobre esta área se le denomina también nivel de estrés del material piezoeléctrico.

En este caso para un disco PZT (Zirconato Titanato de Plomo) de 27mm de diámetro y 20mm de espesor del cerámico la constante piezoeléctrica es del orden de $\sim 20 \times 10^{-3}$ Vm/N (Pereira, 2010).

La ecuación número 6, permite calcular a fuerza aplicada a los discos piezoeléctricos, esta se estima teniendo en cuenta el peso tomado de un promedio poblacional global, aproximadamente 80 kilogramos y la fuerza de gravedad de la tierra a nivel del mar. (La Gaceta, 2007).

$$f = m \times g \quad (6) \quad (\text{Serway, 2004})$$

Donde

m : es la masa del objeto que activa el piezoeléctrico, en este caso una persona.

g : corresponde a la constante de gravedad equivalente a $9,81 \text{ m/s}^2$.

$$F = 80Kg \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 784,8N \quad (7)$$

El área efectiva de acción para el disco piezoeléctrico, es aquella área en donde se concentra la participación del material cerámico, en este caso la ecuación número 8 permite calcular dicha área de acuerdo con el diámetro del disco.

$$A = \frac{(0,02m)^2 \times \pi}{4} = 0,000314m \quad (8)$$

Aplicando la ecuación número 5, se obtiene el pico de voltaje de salida esperado para los discos piezoeléctricos.

$$V = 20 \times 10^{-3} \text{Vm/N} \times 1,4 \times 10^{-4}m \times \left(\frac{784,8N}{3,14 \times 10^{-4}m} \right) \quad (9)$$

$$V = 6,9982 \text{ voltios}$$

Los transductores piezoeléctricos tienen un comportamiento similar al de los capacitores electrolíticos, poseen una capacitancia estática inherente al material, esta capacitancia puede verse como la cantidad de energía que puede obtenerse al deformar el material. Para el caso de este estudio la capacitancia estática de cada disco es del orden de $0,019 \mu\text{F}$. Al estar conectados en paralelo el voltaje de salida es igual, independientemente de la cantidad de estos que se encuentren conectados. No obstante la corriente varía dependiendo de la cantidad de discos presentes y de la impedancia de los mismos.

Debido a su naturaleza, los dispositivos utilizados son de alta impedancia aproximadamente 400Ω , esto quiere decir que presentan gran resistividad al flujo

de energía eléctrica, por lo tanto los valores de corriente son muy bajos, tanto como del orden de 1mA. Para evitar esto se debe seleccionar el material con menor resistividad presente.

La potencia generada cada vez que se accione el prototipo, se define como el producto del voltaje de salida registrado de los transductores piezoeléctricos por la intensidad de corriente correspondiente a dicho voltaje medida en amperios. Esta potencia se calcula a través de la ecuación número 10.

$$W = V \times I \text{ (10)}$$

Dónde:

W: es la potencia generada en watts

V: es el voltaje que circula por el circuito en volts

I: es la intensidad de corriente en Amperios

$$W: 7 \text{ volts} \times 0,001 \text{ Amperios} = 7 \times 10^{-3} \text{ Watts}$$

Si bien la potencia esperada no es mucha esta potencia dependerá del tipo de material piezoeléctrico utilizado. Transductores piezoeléctricos con menor resistividad de paso, permiten una potencia de salida mayor.

2.2 Diseño conceptual

El diseño de la baldosa se realiza teniendo en cuenta dos factores principales: resistencia de los materiales, ajuste en geometría definida.

2.3.1 Resistencia y evaluación de materiales

Para efectos experimentales la baldosa se construyó con dos láminas cuadradas de madera aglomerada conocida en el mercado como tablero de densidad media o mdf, de 30 centímetros de cada lado y 0,8 centímetros de espesor, útil para

realizar ensayos destructivos y para desarrollar el diseño final por su facilidad de trabajo, ligereza y bajo costo.

Otro material a evaluar en la construcción de las baldosas es La paulownia, esta posee un módulo de ruptura (resistencia a la flexión) de alrededor 28 Mega Pascales o 286 Kg/cm^2 (Alibaba, 2012), a pesar de poseer valores inferiores a los de las baldosas cerámicas que en promedio resisten alrededor de 39 a 40 Mega pascales, unos 398 Kg/cm^2 con un grosor de entre 9mm y 11mm, aún son valores de flexión altos, suficientes para soportar la presión promedio que ejercería una persona sobre el material. Si se tiene en cuenta que el una persona promedio 80 Kg, parada sobre el área total de sus pies 200cm^2 genera una presión de $0,4 \text{ Kg/cm}^2$ (Cabrera, 2012)

También se pueden utilizar materiales sintéticos como goma de neumáticos reciclados, acrílicos, materiales cerámicos o baldosas de vinilo. Sin embargo la madera sigue siendo la opción más favorable debido al bajo costo, durabilidad y resistencia. La paulownia por ejemplo tiene un costo de entre \$920.000 – 1'094.400 / Metro cúbico del cual se pueden extraer hasta 810 piezas de 30x30 centímetros de lado y 1 cm de espesor, esto es alrededor de 10933 pesos por metro cuadrado, sin tener en cuenta los costos de preparar el material para que quede con las medidas y demás especificaciones para esta aplicación. Estos datos están basados en los costos por metro cubico de la madera de paulownia para el año 2012 (Alibaba, 2012)

Comparado con un piso cerámico que puede costar entre 20.000 y 25.000 pesos el metro cuadrado, las baldosas en madera tienen a favor el precio y la resistencia.

Sin embargo la madera tiende a perder su forma original a medida que se somete a esfuerzos direccionales, tales como son las pisadas; por este motivo

para zonas de tráfico pesado se debe ajustar el sistema a pisos de concreto, cerámicos o de vinilo, que si bien tienden a ser más costosos, ofrecen una mejor durabilidad que la madera frente a uso muy agresivo.

Para el desarrollo del proyecto, se decidió utilizar madera debido a su fácil trabajabilidad y bajo costo, tanto de materia prima como de maquinación y o modificación. Las características de resistencia y costo de este material se especificaron al comienzo de este capítulo.

Los discos piezoeléctricos utilizados, fueron seleccionados por su fácil acceso y bajo costo, en promedio una docena de discos piezoeléctricos de 2,7 cm de diámetro pueden obtenerse a un valor de 10.000 pesos Colombianos. Sin embargo este tipo de piezoeléctrico no es el más adecuado para la implementación en un modelo definitivo, puesto que son elementos de muy alta impedancia y baja resistencia a la compresión, para efectos experimentales de cálculos y ensayos destructivos son una buena opción. Entre los elementos anexos, al final de este trabajo, se encontrara una cotización del tipo de transductor utilizado y su costo unitario.

2.3.2 Ajuste a geometrías definidas

Por ajuste a geometrías definidas, se hace referencia a las condiciones que debe cumplir el producto para que sea de fácil implementación en cualquier entorno ya estructurado.

Para determinar el tamaño de la baldosa, se escogieron aleatoriamente 5 centros comerciales de la ciudad de Medellín, los cuales fueron: El Centro Comercial Los Molinos, Oviedo, San Diego, Camino Real y Monterrey. En estos centros comerciales se analizó el tamaño de las baldosas en los lugares de mayor tráfico, como las plazoletas de comidas, corredores de acceso y las zonas donde

se encuentran ubicados los almacenes más importantes. Con una muestra de 20 observaciones, 4 por cada centro comercial, se obtuvo una media de 43,15 cm, una desviación estándar de 20,20 cm. Además se apreció que la moda y la media son de 30 cm. Se llegó a la conclusión de que las dimensiones de las baldosas son iguales o cercanas a 30x30 centímetros. Por este motivo el diseño y la distribución de los diferentes elementos se basaron en esta medida. A continuación, en la tabla número 1, se muestran los resultados del estudio estadístico para ajustes a geometrías definidas.

Tabla 1. Datos de muestreo estadístico para ajuste a geometrías definidas, y su resultado

Ubicación	Baldosas de área cuadrada, valores en cm	<i>Resultados</i>	
Camino Real	25		
	30	Media	43,15
	30	Error típico	4,518544
	60	Mediana	30
San Diego	44	Moda	30
	30	Desviación estándar	20,20754
	90	Varianza de la muestra	408,3447
	30	Curtosis	0,964342
Monterrey	90	Coefficiente de asimetría	1,373532
	30	Rango	65
	60	Mínimo	25
	44	Máximo	90
Centro Comercial Los Molinos	30	Suma	863
	60	Cuenta	20
	30		
	30		
Oviedo	30		
	30		
	30		
	60		

Este tamaño de baldosa permite ajustarse a distribuciones de 60x60 cm y 90x90 cm que son otros de los tamaños más comunes de pisos, según descrito en el párrafo anterior. Sin embargo construir una baldosa de dichos tamaños entorpecería el funcionamiento de los discos, ya que el peso se distribuiría sobre un área mucho mayor.

El grosor de cada baldosa no debería ser de más de 1 cm esto con el fin de que no haya necesidad de modificar drásticamente el sitio donde se instale el sistema, reduciendo costos y acortando el tiempo de ejecución de la instalación. El diseño experimental consta de 2 capas de 0.8 cm de espesor más 1 centímetro de separación entre placas. Esto se hace de esta manera con el único propósito de estudiar la manera óptima de activar los transductores piezoeléctricos, no obstante no es necesario que el modelo este compuesto por 2 láminas sino más bien una sola lamina que puede hacer contacto contra el suelo.

La geometría seleccionada para la distribución de los discos es un patrón cuadrado de filas y columnas 5x5 cm, de esta manera es más probable captar la energía en cualquier sector de la baldosa en caso de que esta no sea pisada en el centro, además un patrón cuadrado facilita la realización de las conexiones y el montaje de los transductores. Las conexiones se hacen por filas, esto con el fin de poder realizar reparaciones fácilmente y como las conexiones son en paralelo, el modelo por filas, permite que la baldosa siga funcionando así exista un problema en alguna de las filas de discos.

La independencia operativa que posee cada fila de discos permite que no se pierda la funcionalidad de los discos restantes en la baldosas decir, cada fila se encarga de enviar la energía generada a un canal común para todas las conexiones de la baldosa, de esta manera se evitan los problemas de depender de una sola línea de transmisión de energía eléctrica. En caso de que solo se tuviese una línea, si llegara a fallar un disco que este cerca de la salida de voltaje, este único disco inhabilitaría el sistema completo, en cambio al estar

ubicados en filas de cinco unidades, la mayor cantidad de discos que se pueden ver afectados por la falla operativa de uno solo es cuatro discos a lo sumo. El resto de transductores de la baldosa seguirán enviando la energía a la conexión de recolección común.

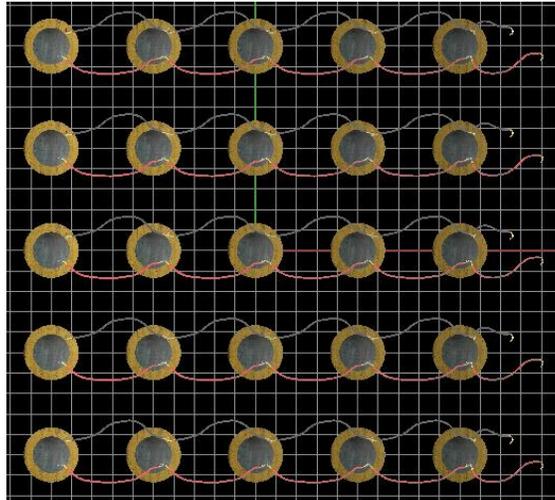


Figura 8. Vista superior distribución cuadrada de 5x5 cm de discos piezoeléctricos.

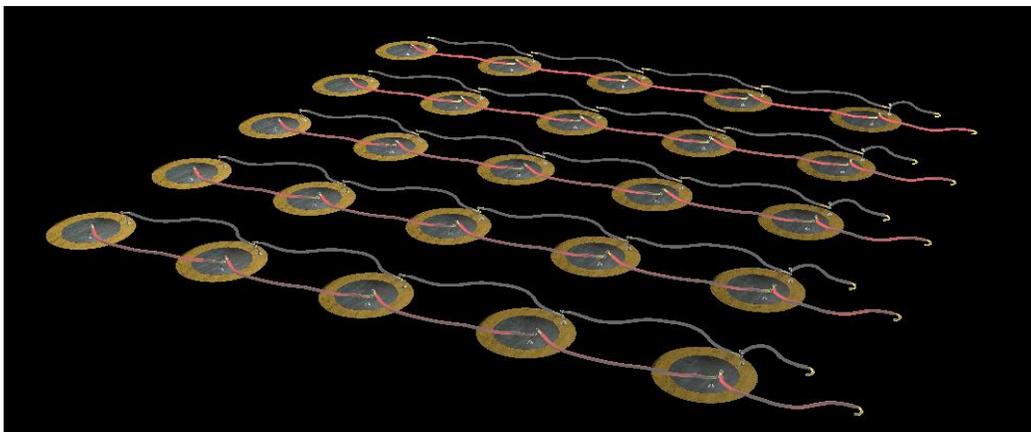


Figura 9. Vista en perspectiva de distribución cuadrada de 5x5 cm de discos piezoeléctricos.

En las figuras 8 y 9 se aprecia la manera como se ubican los discos bajo la baldosa, las conexiones se realizan en paralelo en cinco filas independientes, estas filas se conectan a una línea común para toda la baldosa que luego desemboca en el acumulador de energía.

3. Descripción de la fase experimental.

Para poner a prueba el modelo físico del proyecto, se establecieron tres factores a analizar, voltaje generado, corriente y economía de los materiales con el objetivo de comparar dichos resultados con el modelo matemático y concluir cuales son las condiciones ideales para implementar este prototipo a gran escala.

Los ensayos que se realizaron fueron

- Medición de voltaje de salida
- Medición de corriente de salida
- Peso mínimo y máximo para activar el sistema.
- Peso máximo soportado por cada disco.

A continuación se especifican algunas normas vigentes, que rigen los tipos de ensayo a realizar, para determinar la resistencia de los pisos tanto para superficies de tráfico pesado como tráfico medio, sin embargo estas normas no se aplican al desarrollo del prototipo de baldosa generadora de energía en una etapa inicial. Aun así dichas normas pueden servir para avances futuros en el desarrollo de prototipos más avanzados que sean implementados para estudios en áreas de alto tráfico.

Las normas que rigen el diseño de pisos o baldosas de concreto, para interiores y exteriores, tanto para tráfico pesado como liviano son las ASTM WK17790 (ASTM, 2008), también están las normas europeas UNE 127021 y 127022 AENOR asociación española de normalización y certificación (Tecnopavimento, 2012). Estas normas estipulan el tipo de pruebas y los valores mínimos a registrar para el desarrollo de pisos de hormigón para tráfico pesado.

Como los transductores piezoeléctricos utilizados para este proyecto son diseñados para aplicaciones de diferente tipo, tales como actuar como

generadores de sonido o vibraciones, no son utilizados normalmente para ser sometidos a esfuerzos físicos, ni mucho menos soportar cargas en su superficie, por este motivo durante la fase de experimentación del prototipo se decidió crear una serie de pruebas con el fin de evaluar las capacidades de dichos transductores actuando como generadores de electricidad.

Las herramientas utilizadas para la etapa experimental del proyecto son las siguientes:

Un multímetro marca U-NIT, referencia UT 107, este dispositivo cuenta con una precisión para medir el voltaje en una corriente directa de $\pm 0,5\% + 2$ del valor medido, el valor +2 corresponde al error generado por la respuesta de la pantalla digital. (Uni-Trend Group Limited, 2008)

También se utilizó una báscula marca Tooluxe, con capacidad de medir pesos desde 2,5 kg hasta 250 kg, con un intervalo entre graduado de 0,1 Kg. (Tooluxe Tools, 2012)

La prueba de resistencia se realiza ubicando 4 bloques paralelos, que sirven de soporte alrededor de todo el disco, para luego aplicarle a este una carga progresiva en el centro donde no tiene apoyo. La medición de la carga se realiza apoyando todo el conjunto sobre una báscula, como se muestra en la figura 9.

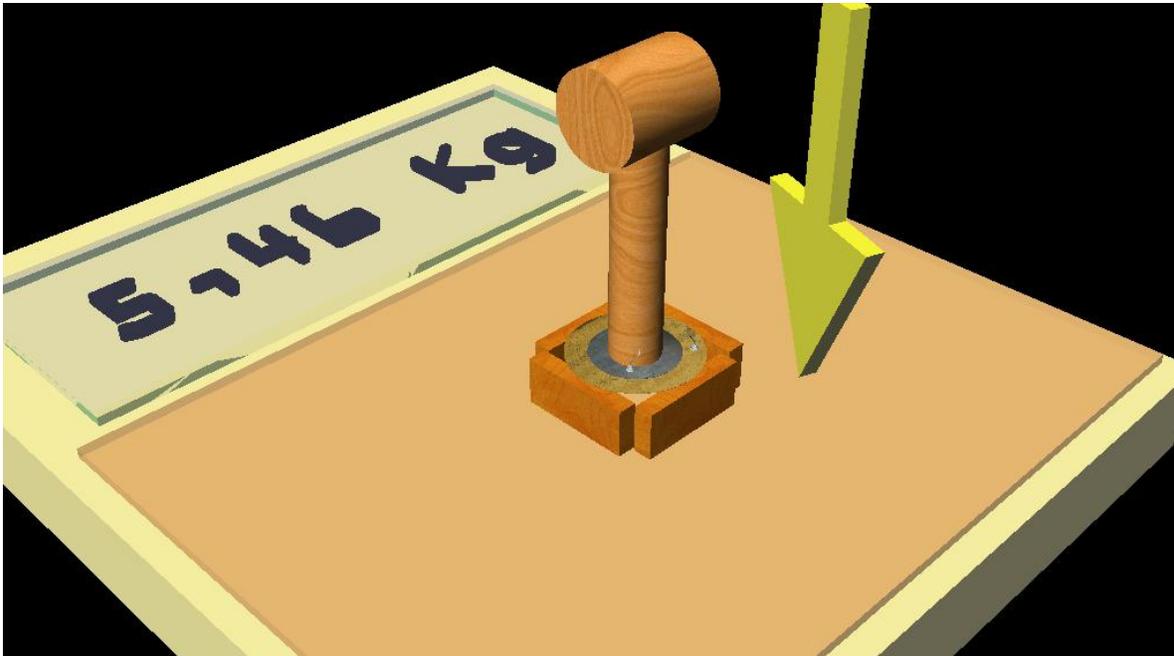


Figura 10. Vista descriptiva del ensayo de resistencia de discos.

Con la prueba anteriormente descrita, en la figura 10, es posible determinar el límite de carga que es capaz de soportar cada disco antes de fracturarse. A continuación se presenta, en la tabla número 2, la relación de rangos de peso con su correspondiente efecto adimensional.

Tabla 2. Peso aplicado al disco piezoeléctrico, efecto observado sobre el mismo. Datos obtenidos durante la experimentación de este proyecto.

Peso aplicado en Kg	Efecto
1Kg a 4,5 Kg	Deformación
Aproximado 4,8 kg	fractura de material cerámico
Aproximado 6,4 Kg a 7Kg	fractura de metal del disco

En la tabla 2 se muestran los resultados del ensayo de resistencia de discos, los datos aquí mostrados hacen parte de un promedio de 2 pruebas destructivas que se realizaron.

El límite de fractura de cada disco se da alrededor de los 4,7 Kg, de esta manera es posible establecer un rango óptimo para la operación de los transductores permitiéndole cierta holgura antes de estos se fracturen. Operando los discos en un intervalo entre 0 y 4,5 Kg se evita la ruptura del material.,

Con el único propósito de evitar que se generen estas fracturas por fatiga o sobreesfuerzo, se adecuan al modelo un conjunto de 4 toques de goma ubicados en las esquinas de la baldosa. Dichos toques no permiten un desplazamiento mayor a 2 mm de la superficie total de la baldosa con respecto a la posición inactiva de los discos.

De manera similar se ejecutan los ensayos para determinar el peso mínimo y máximo para activar el prototipo, es decir a partir de qué punto de fuerza aplicada se genera una diferencia de voltaje medible y cuál es el peso máximo en el cual se llega al pico de voltaje del transductor piezoeléctrico.

Ubicando la baldosa sobre una báscula, se conecta a un multímetro que permita la medición de voltaje generado a la vez que se toma nota del peso aplicado para dicho voltaje, el voltaje medido no es sostenido como lo son los pasos, el pico de voltaje se registra por una fracción de segundo cercana a los 0,4 segundos.

Los valores obtenidos para los intervalos de peso correspondientes se encuentran especificados en la tabla número 3.

Tabla 3. Relación de peso aplicado y picos de voltaje generado sin acumulador conectado. Datos obtenidos durante la experimentación de este proyecto.

Peso aplicado en Kg	Voltaje aproximado (volts)
1 a 5	~0,45 a ~3,40
5 a 10	~3,40 a ~5
10 a 25	~5 a ~16
25 a 40	~16 a ~ 30
40 en adelante	no más de 35 voltios

La tabla 3. Muestra el potencial generado por los transductores piezoeléctricos a partir de la experimentación realizada. Los intervalos de peso se tomaron, teniendo en cuenta los momentos en los cuales se observaban los aumentos más sustanciales en la energía generada por la baldosa.

La prueba especificada en la tabla número 3, se realizó sobre el montaje de discos completos, 25 discos más los topes de goma que se ubican en las esquinas de la baldosa, de esta manera el peso se distribuye sobre la superficie total, como máximo se tiene que cada disco soporta alrededor de 1,7 Kg valor que está bastante alejado de los límites de fractura anteriormente mencionados en este mismo capítulo.

En total se realizaron 3 mediciones; en la tabla número 3 se muestran los valores promedio tomados en cada intervalo de peso, estos valores de peso son los más representativos debido que en estos puntos se muestran diferencias de voltaje más amplias que en el resto del intervalo, además el valor mínimo indicado por la báscula utilizada comienza a partir de 2,5 kg. Dichas diferencias de voltaje dependerán del nivel de deformación que alcancen los discos a un respectivo peso, sin embargo los topes de goma utilizados para proteger los transductores de sufrir sobreesfuerzos, evitan desplazamientos de la baldosa mayores a 2 mm de longitud. Por ende el sistema no genera mayor diferencias de voltaje más altas, luego de aplicar cargas superiores a 40 kilogramos.

A continuación, en la tabla número 4, se puede apreciar las muestras tomadas, el valor promedio de los picos de voltaje en cada intervalo de peso, el valor de desviación estándar fue de 0,0650 volts, y el margen de error típico de 0,037564759 volts.

Tabla 4. Mediciones de voltaje obtenido para intervalos de peso controlados

Peso en Kg	Medición 1 (voltios)		Medición 1 (voltios)		Medición 1 (voltios)		Promedio (voltios)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
1 a 5	0,45	2,40	0,52	3,6	0,39	4,20	0,45	3,40
5 a 10	2,52	3,3	3,6	5,2	4,2	6,7	3,44	5,07
10 a 25	6,4	12,7	4,1	18,3	5,7	15,2	5,40	15,40
25 a 40	19,1	32	14,8	26,4	16,5	33,2	16,80	30,53
40 en adelante		34,5		29,7		35,2		33,13

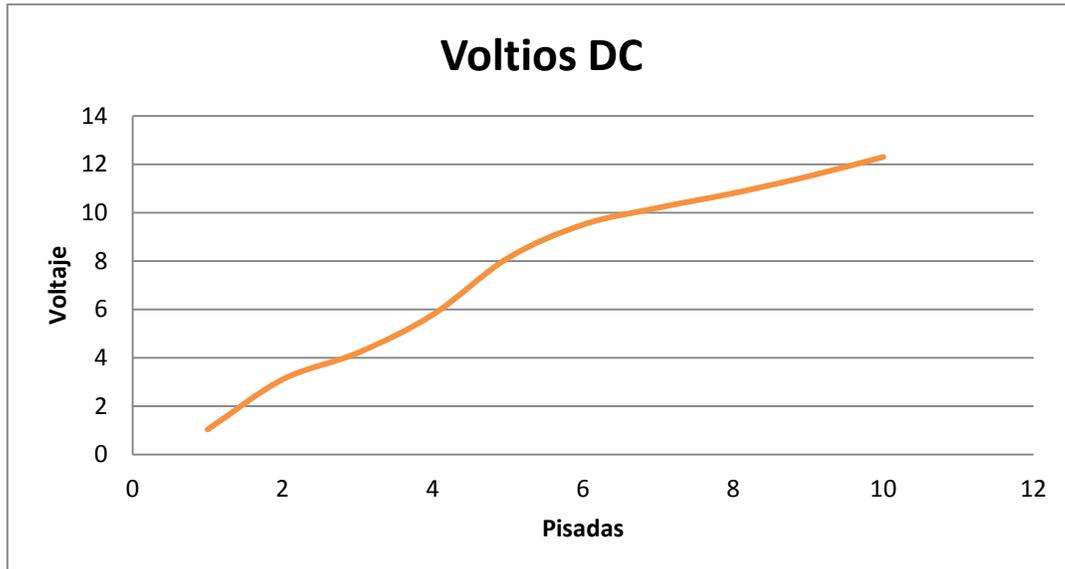
Estas mediciones se realizaron teniendo en cuenta que los límites de soporte del sistema de discos, el pico máximo que es posible generar es de alrededor de 50 voltios, sin embargo someter el disco a un esfuerzo suficiente para alcanzar estos valores provoca la ruptura del mismo.

Cabe anotar que cada medición se realiza directamente de la salida del rectificador de corriente, o sea que se obtiene un valor de corriente directa, el acumulado de la corriente alterna de salida de los transductores piezoeléctricos.

Para aplicar los pesos sobre la baldosa, simplemente se aplicaba fuerza con la pierna sobre el montaje para el experimento hasta alcanzar un valor o incremento notable en el valor de voltaje medido en el multímetro digital. La carga para el ensayo de resistencia mecánica de los discos, se aplica con un elemento de madera que cubra la misma área que los topes que activan los discos en el prototipo de la baldosa.

4. Resultados de la experimentación.

Las mediciones de voltaje obtenido y corriente se analizan desde el modulo del acumulador, para el cual se utiliza un capacitor electrolítico de 100 μF a 16V de capacidad. Para esta prueba se realizaron tres repeticiones para cada uno de los valores de pisadas, las mediciones entre número de pisadas fueron no consecutivas, con el fin de permitir que los discos recuperaran su elongación normal para tomar la siguiente medida. En la gráfica número 1. Se muestra el promedio de voltaje acumulado obtenido de las tres mediciones en relación a la cantidad de pisadas aplicadas al prototipo.

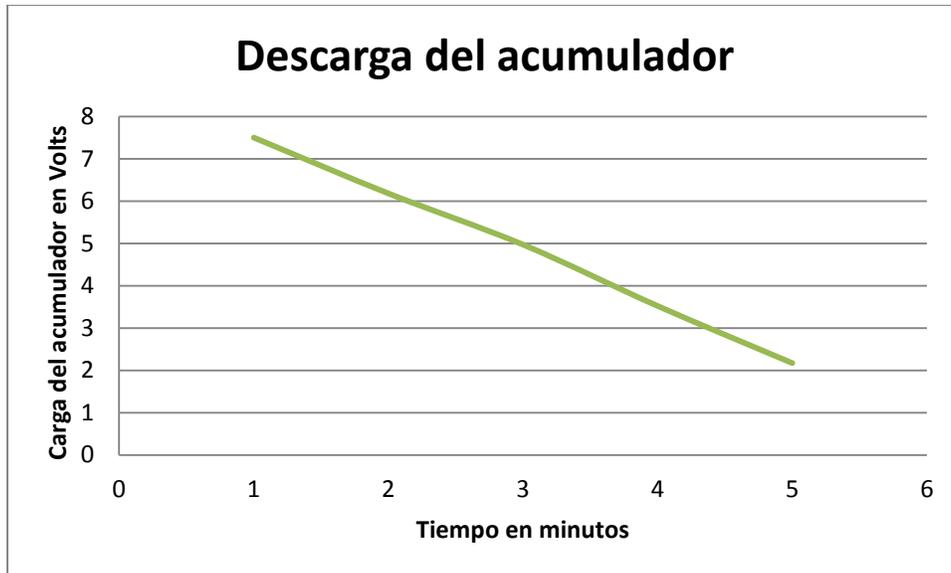


Gráfica 1. Relación entre pisadas continuas aplicadas y voltaje acumulado

Analizando la gráfica 1. Es posible apreciar que en un comienzo se tiene un comportamiento casi lineal, entre las pisadas 1 a 4, luego esta relación tiende a estabilizarse en un voltaje casi fijo, esto se da entre las pisadas 4 a 10 entre los 10 y 13 voltios, esto es debido a la pérdida de energía del capacitor. De este comportamiento se puede concluir que no es ideal usar capacitores electrolíticos para el almacenamiento de energía debido a que la descarga de los mismos es técnicamente inmediata a la carga. Entre más energía se desee acumular más

potencia es necesaria para aumentar el nivel de energía almacenado en el condensador. (Electronica Unicrom, 2002)

A continuación se muestra la relación entre el tiempo y la descarga del capacitor, para esta prueba se realizaron tres ensayos siempre llevando el voltaje inicial de la descarga desde 7,5 voltios.



Grafica 2. Relación entre tiempo y descarga del acumulador

En la gráfica 2. Es posible apreciar que la descarga del acumulador es lineal, esta descarga lineal se da mientras la baldosa se encuentra en reposo; en promedio se pierde 1 voltio cada 45 segundos es decir 1,33 voltios cada minuto. También es visible que aunque sea posible generar picos de hasta 40 voltios con los transductores piezoeléctricos, la energía que realmente se puede almacenar por cada pisada no supera el medio voltio. Esto es debido a que un condensador electrolítico no tiene la capacidad de captar y almacenar dichos picos para valores de corriente tan bajos como los que se manejan con transductores piezoeléctricos (Electronica Unicrom, 2002).

La intensidad de corriente de salida registrada fue del orden de 1mA lo que concuerda con el modelo teórico, ver capítulo 2, el pico de voltaje es difícil de comparar con respecto al modelo calculado, ya que el nivel de deformación inducido al transductor piezoeléctrico y los tiempos en que se registran dichos picos varían demasiado, dependiendo de las características de la pisada, es decir si la fuerza se aplica en el centro o de manera desviada.

La potencia obtenida experimentalmente fue aproximadamente del orden de.

$$W: 3,4volts \times 0,001 Amperios = 3,4 \times 10^{-3}Watts$$

Este valor de potencia es muy bajo, lo cual lo hace difícil la aplicación inmediata bajo estas condiciones, sin embargo este estudio demuestra la funcionalidad del concepto, y abre las puertas para desarrollar materiales, transductores piezoeléctricos, más aptos para esta aplicación. Una vez existan estos materiales pensados para esta aplicación, la generación de energía con transductores piezoeléctricos será una de las tecnologías para fuentes de energía no convencionales más viables.

5. Resultados del modelo.

El modelo experimental se ejecutó netamente a través de pruebas análogas que son posibles de apreciar en el capítulo 3 descripción de la fase experimental, no se realizaron comparaciones con modelos digitales ni simulaciones debido a que no es posible validar el modelo para los valores de corriente, voltaje y potencia obtenidos con los transductores piezoeléctricos utilizados y las herramientas de medición utilizadas. Para tener una medición más certera se deben usar transductores de menor impedancia, que permitan una mayor salida de corriente, además de elementos de medición de alta precisión como osciloscopios digitales y amplificadores de señal. Sin embargo, basándose en el objetivo de comprender el comportamiento del prototipo y desarrollar unas bases para evolucionar el mismo, no es necesario aplicar pruebas tan complejas en una etapa temprana del desarrollo del mismo. Los resultados obtenidos de las pruebas se contrastaron con los calculados en el modelo teórico.

6. Conclusiones

Si bien los niveles de energía producidos con el prototipo son muy poco útiles para una aplicación práctica, son lo suficientemente valederos para pensar en un sistema a gran escala ubicado en lugares de alto tráfico donde pueden ser utilizados para operar artefactos eléctricos de bajo consumo, mantener los sistemas de luminaria local, o prestar servicios adicionales como cargar celulares o sistemas de ventilación e iluminación por LED's.

El sistema de acumulación, que en este caso se basó en un capacitor de 100 μF y 16V, puede reemplazarse por baterías de ion de litio, ya que estas no pierden carga a la misma velocidad de los capacitores electrolíticos, la capacidad de las baterías a utilizar dependerá directamente de la cantidad de baldosas y la aplicación para la cual se destinara la energía generada.

Para efectos de experimentación el modelo demuestra funcionar como concepto, sin embargo hace falta implementar materiales que permitan tanto generar mayores cantidades de energía, como permitir una vida útil prolongada. Esto se puede lograr cambiando los transductores piezoeléctricos, de discos piezoeléctricos a láminas piezoeléctricas de tipo T215-A4-503X estas poseen menor impedancia que los discos piezoeléctricos y son maleables, lo que permite trabajar en un diseño de distribución más simple que permita aprovechar la energía aplicada al sistema.

Los materiales con los cuales se conforme la estructura de la baldosa también deben de ser reevaluados, en el caso de realizar una implementación a gran escala, ya que deben de resistir tráfico pesado, pero también deben de ser fáciles de trabajar con el fin de simplificar el ensamble de la baldosa. Durante el desarrollo de este proyecto se presentaron grandes inconvenientes buscando un equilibrio entre estas dos características del modelo, el objetivo del diseño siempre debe estar enfocado en lograr el mayor provecho de los transductores con el diseño más simple posible. No es posible concluir frente al material ideal

para la baldosa, sin embargo la madera impermeable, de bajo costo, fácil de trabajar, con alta rigidez y facilidad de producción masiva podría abrir ventanas a mejora de materiales. Actualmente una de las maderas que cumple con estas características es la madera de paulownia un árbol de rápido crecimiento y madera resistente. Si bien este material no fue probado en el desarrollo del prototipo, existen datos que demuestran la capacidad de este para ser implementado en este tipo de aplicación, (Alibaba, 2012)

El diseño asistido por computador del prototipo, permitió simplificar los pasos a seguir para el ensamble del mismo, el tipo de distribución y conexiones que son posibles de realizar. De esta manera se ahorró tiempo y materiales al evitar tener que realizar correcciones del diseño sobre la marcha.

Bibliografía

- La Gaceta*. (15 de Agosto de 2007). Recuperado el 3 de Noviembre de 2012, de <http://www.lagaceta.com.ar/nota/230726/informacion-general/>
- Alibaba*. (2012). Recuperado el 9 de Noviembre de 2012, de <http://spanish.alibaba.com/products/paulownia-board-533523830.html>
- Johnson Matthey Piezoproducts*. (2012). Recuperado el 4 de Noviembre de 2012, de <http://www.piezoproducts.com/index.php?id=144&L=0>
- Alibaba*. (2012). Recuperado el 7 de Diciembre de 2012, de http://www.alibaba.com/products/574314970/paulownia_wood_prices.html?s=p
- ASTM. (Marzo de 2008). *ASTM*. Recuperado el 7 de Noviembre de 2012, de http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPMA08/tile_spma08.html
- Cabrera, R. (10 de Septiembre de 2012). *Ricardo Cabrera*. Recuperado el 13 de Noviembre de 2012, de http://neuro.qi.fcen.uba.ar/ricuti/No_me_salen/FLUIDOS/flu_002.html
- Cúpich, M., & Garza, F. (2000). Actuadores piezoeléctricos. *Ingenierías*, 22-28.
- ecodez. (07 de 01 de 2011). *ecodez*. Recuperado el 25 de Octubre de 2012, de <http://www.ecodez.es/tag/club4climate/>
- ecodez. (7 de Enero de 2011). *ecodez*. Recuperado el 15 de Octubre de 2012, de <http://www.ecodez.es/tag/club4climate/>
- Ecología verde. (21 de Mayo de 2012). Recuperado el 27 de Octubre de 2012, de <http://www.ecologiaverde.com/pavegen-el-proyecto-triunfador-de-keep-walking-project/>
- Electronica Unicrom. (2002). *Electronica Unicrom*. Recuperado el 7 de Diciembre de 2012, de http://www.unicrom.com/Tut_energia_almacenada_condensador.asp
- Electronica Unicrom. (2002). *Electronica Unicrom*. Recuperado el 7 de Diciembre de 2012, de http://www.unicrom.com/Tut_capacitor-electrolitico.asp
- Escalera Siles, J. (12 de Julio de 2012). *Simulación de estructuras mecánicas para UAVS*. Recuperado el 25 de Octubre de 2012, de <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/16028/4/memoria.pdf>
- Esplandiú, J. (7 de Octubre de 2009). *Libertad Digital*. Recuperado el 25 de Octubre de 2012, de <http://www.libertaddigital.com/ciencia/una-empresa-israeli-logra-generar-electricidad-gracias-al-trafico-1276372565/>

- Fernández, J. C. (2004). *Electromagnetismo*. Recuperado el 20 de Octubre de 2012, de <http://materias.fi.uba.ar/6209/download/5-Electrodinamica.pdf>
- Gallego, J. (1989). *Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers*. *Scienc Instrument*.
- Galvis, L. (2010). La marcha humana como fuente generadora de energía a pequeña escala. *ITECKNE*, 184-190.
- García, M., Ruina, A., Coleman, M., & Chatterjee, A. (2010). *PASSIVE-DYNAMIC MODELS OF HUMAN GAIT*. Recuperado el 20 de Octubre de 2012, de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.46.185&rep=rep1&type=pdf>
- Honoré, E., & Mininni, P. (1996). *Estudio del comportamiento de un material piezoeléctrico en un campo eléctrico alterno*. Recuperado el 12 de Octubre de 2012, de http://www.fisicarecreativa.com/informes/infor_ondas/piezoelctr96.pdf
- Jiménez, B. (1995). Materiales piezoeléctricos: formas de presentación, ventajas y desventajas en las aplicaciones. *Cerámica y Vidrio*, 272-276.
- Katz, A. (2004). Residential piezoeléctrico Energy Sources. *Delta*.
- Kuo, A., Donelan, J. M., & Ruina, A. (2005). Energetic Consequences of Walking Like an Inverted Pendulum: Step-to-Step Transitions. *American College of Sports Medicine*, 88-97.
- Kymissis, J., Kendall, C., Paradiso, J., & Gershenfeld. (1998). Parasitic Power Harvesting in Shoes. *IEEE International Conference on Wearable Computing*, 1-8.
- Martínez Rodríguez, J., Vitola Oyaga, J., & Sandoval Cantor, S. (30 de Abril de 2007). *Fundamentos teóricos- prácticos del ultrasonido*. Recuperado el 5 de Noviembre de 2012
- Mendoza, R. (28 de Julio de 2012). *Conoce la primera discoteca ecológica*. Recuperado el 23 de Octubre de 2012, de <http://diarioecologia.com/club4climate-conoce-la-primera-discoteca-ecologica/>
- Mercadolibre. (2012). *Mercadolibre*. Recuperado el 12 de Noviembre de 2012, de http://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-403047918-piezo-electrico-mic-excelente-sonido-docena-a-10000-_JM#!/calificaciones
- Mitcheson, P., Yeatman, E., Rao, G. K., Holmes, A., & Green, T. (2008). Energy Harvesting From Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices. *Proceedings of the IEEE* , 1457- 1486.
- Miyara, F. (2003). *Introducción a la Electroacústica*. Recuperado el 15 de Octubre de 2012, de <http://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/audio/electroac.pdf>

- Moreno, J., Fernández, J., Ochoa, P., Ceres, R., Calderón, L., Rocon, E., y otros. (2004). Aplicación de sensores piezoeléctrico cerámicos a la caracterización biomecánica. *Cerámica y Vidrio*, 668-673.
- NATIONAL GEOGRAPHIC. (2010). *Unas baldosas generan energía con nuestras pisadas*. Recuperado el 27 de Octubre de 2012, de <http://www.nationalgeographic.es/noticias/medio-ambiente/energia/baldosas-energia-pisadas>
- Palazzesi, A., Pardo, L., Sacco, M., Benítez, M., Ferzzola, M., & Varona, N. (2010). Recuperado el 27 de Octubre de 2012, de <http://www.neoteo.com/generando-energia-con-el-caminar-de-la-gente>
- Palazzesi, A., Pardo, L., Sacco, M., Benítez, M., Ferzzola, M., & Varona, N. (2010). *neoteo*. Recuperado el 20 de Octubre de 2012, de <http://www.neoteo.com/generando-energia-con-el-caminar-de-la-gente>
- Pavegen. (24 de Octubre de 2011). *Genera tu energía*. Recuperado el 26 de Octubre de 2012, de <http://generatuenergia.com/2011/10/24/baldosas-pavegen-generacion-energia-caminando-apoya-idea-en-facebook/>
- Pavegen. (24 de Octubre de 2011). *Genera tu energía*. Recuperado el 18 de Octubre de 2012, de <http://generatuenergia.com/2011/10/24/baldosas-pavegen-generacion-energia-caminando-apoya-idea-en-facebook/>
- Paz, A. (25 de Enero de 2012). *Electricidad Auto-generada- El tranque en las grandes ciudades podrá ahora generar electricidad*. Recuperado el 24 de Octubre de 2012, de <http://www.clase911.com/CV/index.php/45-technologie/technologie/122-electricidad-autogenerada-el-tranque-en-las-grandes-ciudades-podran-ahora-generar-electricidad>
- Pereira, A. (2010). Cerámicas piezoeléctricas: funcionamiento y propiedades. *ATCP Engenharia Fisica*, 5.
- Ricardo, J. (2010). Recolección de energías ambientales mediante materiales cerámicos y mono cristalinos. *Cerámica y Cristal*, 1-5.
- Roundy, S., Wright, P., & Rabaey, J. (9 de Octubre de 2002). *A study of low level vibrations as a source for wireless senser nodes*. Recuperado el 23 de Octubre de 2012, de http://bwrc.eecs.berkeley.edu/publications/2003/presentations/Low_Power_Elec_Device/ComComRoundy.pdf
- Serway, R. A. (2004). *Física para ciencias e ingeniería*. En R. A. Serway. Thompson.
- Sodano, H., & Inman, D. (2005). Comparison of Piezoelectric Energy Harvesting Devices for Recharging Batteries. *Journal of Intelligent Material Sustersms and Structures*, 799-807.

- Starner, T. (1996). Human-power wearable computing. *IBM SYSTEMS JOURNAL*, 1-12.
- Tecnopavimento. (2012). *Construmatica*. Recuperado el 7 de Noviembre de 2012, de http://www.construmatica.com/construpedia/Caracter%C3%ADsticas_F%C3%ADsticas_y_Mec%C3%A1nicas_de_las_Baldosas._Ensayos
- Tooluxe Tools. (2012). *amazon*. Recuperado el 24 de Noviembre de 2012, de <http://www.amazon.com/Tooluxe-Tools-Precision-Digital-Bathroom/dp/B000VU9LF4>
- tuexperto. (28 de Diciembre de 2008). *En el metro de tokyo los viajeros generan electricidad con sus pisadas*. Recuperado el 28 de Octubre de 2012, de <http://www.tuexperto.com/2008/12/28/en-el-metro-de-tokyo-los-viajeros-generan-electricidad-con-sus-pisadas/>
- Uni-Trend Group Limited. (2008). *Uni-Trend*. Recuperado el 23 de Noviembre de 2012, de <http://www.uni-trend.com/ut107.html>
- Universidad de Antioquia . (2000). *Ley de Faraday*. Recuperado el 20 de Noviembre de 2012, de <http://docencia.udea.edu.co/regionalizacion/irs-404/contenido/capitulo10.html>

Lista de tablas

Tabla 1. Datos de muestreo estadístico para ajuste a geometrías definidas, y su resultado	31
Tabla 2. Peso aplicado al disco piezoeléctrico, efecto observado sobre el mismo. Datos obtenidos durante la experimentación de este proyecto.	36
Tabla 3. Relación de peso aplicado y picos de voltaje generado sin acumulador conectado. Datos obtenidos durante la experimentación de este proyecto.	38
Tabla 4. Mediciones de voltaje obtenido para intervalos de peso controlados.....	40

Lista de figuras

Figura 1 Funcionamiento de las baldosas Pavegen y dispositivos de aprovechamiento de la energía generada. (Pavegen, 2011)	8
Figura 2 Modelo del caminar como Péndulo invertido. (Kuo, Donelan, & Ruina, 2005)	10
Figura 3 Principio de Funcionamiento del Transductor Electrostático. (Mitcheson, Yeatman, Rao, Holmes, & Green, 2008)	12
Figura 4 Principio de Funcionamiento del Transductor Piezoeléctrico. (Mitcheson, Yeatman, Rao, Holmes, & Green, 2008)	14
Figura 5. Celda piezoeléctrica (a) antes de polarizarse (b) Después de polarizarse. (Katz, 2004)	15
Figura 6. Convención para la expresión de las ecuaciones constitutivas del medio piezoeléctrico. (Moreno, y otros, 2004).	16
Figura 7. Elongación y contracción de un disco de PZT cuando se le aplica un voltaje. (Cúpich & Garza, 2000)	18
Figura 8. Vista superior distribución cuadrada de 5x5 cm de discos piezoeléctricos.	33
Figura 9. Vista en perspectiva de distribución cuadrada de 5x5 cm de discos piezoeléctricos.....	33
Figura 10. Vista descriptiva del ensayo de resistencia de discos.....	36

Lista de graficas

Grafica 1. Relación entre pisadas continuas aplicadas y voltaje acumulado	403
Grafica 2. Relación entre tiempo y descarga del acumulador	414

Anexo B: Baldosa con los discos piezoeléctricos



Anexo C: Rectificador de onda completa con diodos IN 7004



Anexo D: Capacitor de 100 micros Faraday y 16 voltios

