

BALDOSA PIEZOELÉCTRICA PARA ALIMENTAR SISTEMAS DE ILUMINACIÓN DE BAJO CONSUMO ENERGÉTICO

JORGE ANDRÉS CIFUENTES GUTIÉRREZ



**ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA
INGENIERÍA MECATRÓNICA
ENVIGADO
2013**

BALDOSA PIEZOELÉCTRICA PARA ALIMENTAR SISTEMAS DE ILUMINACIÓN DE BAJO CONSUMO ENERGÉTICO

JORGE ANDRÉS CIFUENTES GUTIÉRREZ

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero mecatrónico

Daniel Felipe López Montes



**ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA
INGENIERÍA MECATRÓNICA
ENVIGADO
2013**

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	15
1. PRELIMINARES.....	16
1.1 Planteamiento del problema	16
1.1.1 Contexto y caracterización del problema	16
1.1.2 Formulación del problema	17
1.2 Objetivos del proyecto	17
1.2.1 Objetivo General.....	17
1.2.2 Objetivos Específicos	17
1.3 Marco de referencia.....	17
1.3.1 Antecedentes	18
1.3.2 Marco teórico.....	20
2. METODOLOGÍA DEL PROYECTO	24
3. DISEÑO PRELIMINAR	26
4. SELECCIÓN DEL MATERIAL DE LA BALDOSA	27
4.1 Adoquines de concreto:.....	28
4.2 Baldosa cerámica:	29
4.3 Baldosa de concreto:.....	30
4.4 Gres porcelánico:	31
5. SELECCIÓN DEL MATERIAL PIEZOELÉCTRICO.....	34
6. CRITERIOS DE DISEÑO Y MODELO PIEZOELÉCTRICO	40
6.1 Modelo de un piezoeléctrico generador de energía eléctrica	40
6.1.1 Modelo eléctrico	40

6.2	Comportamiento del piezoeléctrico bajo carga Cuasi-estática	42
6.3	Comportamiento del piezoeléctrico bajo carga dinámica	42
6.4	Características generales de la marcha.....	43
6.5	Conclusiones del modelo.....	44
7.	DISEÑO DE CONCEPTO DEL CONJUNTO BALDOSA - PIEZOELÉCTRICO	46
8.	DISEÑO DE DETALLE DEL CONJUNTO DE LA BALDOSA Y EL PIEZOELÉCTRICO 51	
9.	DISEÑO DE LOS SISTEMAS ELECTRÓNICOS PARA TRANSMITIR Y ALMACENAR LA ENERGÍA GENERADA POR EL PIEZOELÉCTRICO.....	57
9.1	Circuito para transmitir la energía generada por el piezoeléctrico y almacenamiento:.....	58
9.2	Diseño del sensor de foto resistencia:	59
9.3	Circuito electrónico completo:.....	60
10.	SIMULACIONES DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA.....	61
10.1	Simulación de un solo elemento piezoeléctrico.....	63
10.1.1	Circuito del piezoeléctrico con resistencia de carga.....	63
10.1.2	Circuito del piezoeléctrico con resistencia de carga y puente rectificador ...	64
10.2	Simulación del efecto piezoeléctrico del circuito en serie y paralelo y determinación de la resistencia óptima de carga	65
10.2.1	Materiales piezoeléctricos en conexión serie	66
10.2.2	Materiales piezoeléctricos en conexión paralela.....	70
10.2.3	Conclusión resistencia óptima de carga	74
10.3	Respuesta del circuito ante la entrada del paso de una persona (ideal)	74
10.4	Simulación mecánica y eléctrica de la respuesta del sistema ante la entrada del paso de una persona.....	77
11.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES	90

12. BIBLIOGRAFÍA.....	95
ANEXO 1. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS CHANNEL INDUSTRIES, INC.....	99
ANEXO 2. CIRCUITO INTEGRADO LM3588-1	100

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones técnicas del adoquín de concreto “Adoking”. (UNICON)	29
Tabla 2. Especificaciones técnicas de las baldosas cerámicas de marca “Cerámicas Italia” (Cerámica Italia).	30
Tabla 3. Especificaciones técnicas de la línea de baldosas, marca “ROCA” (ROCA).	31
Tabla 4. Matriz de selección del material a utilizar en la baldosa	33
Tabla 5. Aplicaciones comunes de los materiales piezoeléctricos de la empresa Channel Industries (Channel Industries INC).	38
Tabla 6. Matriz de selección del material piezoeléctrico a utilizar	39
Tabla 7. Valores de los coeficientes para la prueba de voltaje generado por el piezoeléctrico. Elaborado por el autor.	48
Tabla 8. Ruta de opciones seleccionadas para el diseño de concepto. Elaborado por el autor.	50
Tabla 9. Propiedades baldosa de concreto (CONCREPAL).	51
Tabla 10. Dimensiones piezoeléctrico seleccionado (Channel Industries INC).	52
Tabla 11. Características generales del piezoeléctrico seleccionado (Channel Industries INC).	61
Tabla 12. Constantes del piezoeléctrico calculadas a partir de sus especificaciones.	62
Tabla 13. Comparación entre diferentes resistencias de carga y sus respectivas potencias para el caso serie más favorable.	67
Tabla 14. Comparación entre diferentes resistencias de carga y sus respectivas potencias para un caso serie menos favorable.	69
Tabla 15. Comparación entre diferentes resistencias de carga y sus respectivas potencias para el caso paralelo más favorable.	71
Tabla 16. Comparación entre diferentes resistencias de carga y sus respectivas potencias para un caso paralelo más desfavorable.	73
Tabla 17. Datos para formar la gráfica del voltaje generado por un piezoeléctrico cuando se le aplica la fuerza de un paso peatonal.	75

Tabla 18. Valores de la fuerza y voltaje de salida para los 4 piezoeléctricos.	85
Tabla 19. Potencia y energía entregadas por el circuito.....	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Prototipo del generador de talón (Howells, 2009).	18
Figura 2. Formas de onda típicas en el circuito electrónico de potencia (Howells, 2009).	19
Figura 3. Carretera de California, EEUU (Gatto, 2011).	20
Figura 4. Efecto piezoeléctrico directo (Salgado Castro & Lugo Rangel).	21
Figura 5. Efecto piezoeléctrico inverso (Salgado Castro & Lugo Rangel).	21
Figura 6. Ilustración de la transformación de la energía eléctrica a mecánica (Salgado Castro & Lugo Rangel).	23
Figura 7. Senderos piezoeléctricos (Egidi, 2012).	26
Figura 8. Adoquines de concreto comunes. El de la izquierda es en forma de corbatín (ACONSTRUCTORAS, 2012), mientras que el de la derecha es rectangular (Díaz, 2012).	28
Figura 9. Baldosa cerámica (CONSTRUMÁTICA).	30
Figura 10. Baldosa de concreto (CONCREPAL).	31
Figura 11. Piso conformado por baldosas gres (Pisos y Gres).	32
Figura 12. Definición de las líneas de los ejes de un material piezoeléctrico (Minazara, Vasic, & Costa).	34
Figura 13. Modo 33 (Minazara, Vasic, & Costa).	34
Figura 14. Modo 31 (Minazara, Vasic, & Costa).	35
Figura 15. Circuito equivalente para un generador piezoeléctrico (Keawboonclinay & Engel, 2003).	40
Figura 16. Voltaje de salida del piezoeléctrico en el experimento bajo carga cuasi-estática (Keawboonclinay & Engel, 2003).	42
Figura 17. Voltaje de salida del piezoeléctrico en el experimento bajo carga dinámica (Keawboonclinay & Engel, 2003).	43
Figura 18. Valores promedio de los parámetros de marcha de un adulto (Nordín & Frankel, 2004).	44
Figura 19. Fuerza de reacción vertical que se genera sobre el suelo al dar un paso, expresado en términos del % de peso corporal (Nordín & Frankel, 2004).	44

Figura 20. Voltajes producidos en open circuit por el piezoeléctrico en función de su diámetro y espesor (espesor 10 veces menor que el diámetro).	48
Figura 21. Baldosa de concreto (CONCREPAL).	51
Figura 22. Tolerancias mecánicas de los piezoeléctricos (Channel Industries INC).	52
Figura 23. Plano y pieza sólida del piezoeléctrico elegido	54
Figura 24. Plano y pieza sólida de la baldosa de concreto elegida.	54
Figura 25. Plano y pieza sólida del soporte para el conjunto.	55
Figura 26. Plano y pieza sólida del conjunto entre las baldosas y los piezoeléctricos.	56
Figura 27. Principio de generación del material piezoeléctrico (Minazara, Vasic, & Costa)	57
Figura 28. Circuito de generación de un solo piezoeléctrico usando el LTC3588-1 (LINEAR TECHNOLOGY).	58
Figura 29. Batería recargable CR123A (Réflex ocasión).	59
Figura 30. Circuito detector de oscuridad.	59
Figura 31. Circuito electrónico completo, el cual consta de 4 integrados LTC 3588-1, un sensor de fotorresistencia, la batería y el LED.	60
Figura 32. Gráfica de la fuerza aplicada en el piezoeléctrico para las simulaciones iniciales.	62
Figura 33. Circuito equivalente de un solo piezoeléctrico y su respuesta ante la fuerza aplicada.	63
Figura 34. Circuito equivalente de un solo piezoeléctrico, conectado a un puente rectificador y su respuesta ante la fuerza aplicada.	64
Figura 35. Circuito de los 4 piezoeléctricos conectados en serie con un puente rectificador y resistencia de carga.	66
Figura 36. Gráfico de la potencia en la carga Vs. Resistencia en la carga para el caso serie más favorable.	67
Figura 37. Respuesta en voltaje del circuito en serie con la fuerza aplicada en el mismo instante (caso más favorable) y la resistencia óptima.	68
Figura 38. Gráfico de la potencia en la carga Vs. Resistencia en la carga para un caso serie menos favorable.	69

Figura 39. Respuesta en voltaje del circuito en serie con la fuerza aplicada en momentos diferentes (caso menos favorable).....	70
Figura 40. Circuito de los 4 piezoeléctricos conectados en paralelo con puentes rectificadores de diodos y una resistencia de carga.....	71
Figura 41. Gráfico de la potencia en la carga Vs. Resistencia en la carga para el caso paralelo más favorable.....	72
Figura 42. Respuesta en voltaje del circuito en paralelo con la fuerza aplicada en el mismo instante (caso más favorable).....	72
Figura 43. Figura 44. Gráfico de la potencia en la carga Vs. Resistencia en la carga para un caso paralelo desfavorable.	73
Figura 45. Respuesta en voltaje del circuito en paralelo con la fuerza aplicada en momentos diferentes (caso más desfavorable).	74
Figura 46. Voltaje generado por un piezoeléctrico cuando se le aplica la fuerza de un paso peatonal VS. Tiempo.	76
Figura 47. Circuito de 4 piezoeléctricos en paralelo conectados a la resistencia óptima hallada.....	76
Figura 48. Voltaje de salida del sistema (Línea azul, Channel B).....	77
Figura 49. Modelo del sistema a simular. Vista isométrica.....	78
Figura 50. Modelo del sistema a simular, vista superior. Se marca cada piezoeléctrico para diferenciarlos posteriormente.....	79
Figura 51. Modelo del sistema a simular. Vista inferior.	79
Figura 52. Modelo del sistema a simular. Vista lateral.	80
Figura 53. Esfuerzos generados sobre el piezoeléctrico #1 ante una carga de 700N. Vista isométrica.	80
Figura 54. Esfuerzos generados sobre el sistema ante una carga de 700N. Vista isométrica.	81
Figura 55. Deformación en el piezoeléctrico #1 bajo una carga de 700N. Vista lateral. ...	82
Figura 56. Deformación en el piezoeléctrico #2 bajo una carga de 700N. Vista lateral. ...	83
Figura 57. Deformación en el piezoeléctrico #3 bajo una carga de 700N. Vista lateral. ...	83
Figura 58. Deformación en el piezoeléctrico #4 bajo una carga de 700N. Vista lateral. ...	84

Figura 59. Gráfica de la fuerza en cada piezoeléctrico Vs Tiempo (superior). Gráfica de voltaje en cada piezoeléctrico Vs Tiempo (inferior). 86

Figura 60. Circuito final, 4 piezoeléctricos en paralelo, con puentes rectificadores y resistencia óptima de carga. 87

Figura 61. Voltaje generado por cada piezoeléctrico en open circuit ante la fuerza del paso peatonal modelado. 87

Figura 62. Respuesta eléctrica del sistema (voltaje de salida en la carga) ante la entrada de un paso peatonal. 88

Figura 63. Gráfica Fuerza Vs. Deformación de cada piezoeléctrico. 89

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS CHANNEL INDUSTRIES, INC.....	99
ANEXO 2. CIRCUITO INTEGRADO LM3588-1	100

RESUMEN

La gran demanda energética en el mundo actual, ha ocasionado que muchos individuos se enfoquen en el estudio y la implementación de tecnologías más modernas para la generación, almacenamiento y utilización de energías renovables. Es por esto que el presente trabajo se centra en el diseño de una baldosa piezoeléctrica, la cual tiene la capacidad de tomar la energía mecánica proveniente de peatones y transformarla en energía eléctrica, la cual pueda ser almacenada en una batería y luego sirva como alimentación para un sistema de iluminación de baja potencia, en este caso, compuesto por LEDs.

El proceso de diseño consta entonces de múltiples etapas, donde lo primero es elegir un material que sea apropiado como baldosa (el cual será instalado en el suelo), posteriormente se realiza un estudio de las características de los materiales piezoeléctricos para elegir así, el más conveniente para el proyecto. Una vez este proceso está listo, se procede a determinar una manera adecuada para fusionar la baldosa y el piezoeléctrico, haciendo que quede como un solo elemento, el cual para nuestro caso es el generador de energía eléctrica.

El siguiente paso describe el diseño de los circuitos electrónicos, los cuales como primera instancia tienen el objetivo de convertir el voltaje alterno generado por el piezoeléctrico, en voltaje directo para que este pueda ser almacenado por una batería. En este paso se incluyen los circuitos de rectificación y almacenamiento, al igual que el circuito completo en el cual se incluye el sistema de iluminación con LEDs.

Una vez concluido el diseño, se pasa a la etapa de simulaciones en donde se observa el comportamiento del sistema. Se empieza desde lo más simple (simulación eléctrica de un solo piezoeléctrico), hasta la simulación final que emula un comportamiento de todo el sistema más aproximado a la realidad, donde se tiene en cuenta la compresión generada sobre cada piezoeléctrico para hallar así, la respuesta eléctrica del circuito.

Palabras clave: Piezoeléctrico, Generador, Baldosa, LED.

ABSTRACT

Nowadays, the great demand for energy in the planet has made a lot of people to focus in the study and implementation of modern technologies to harvest, store and use clean energy. This is why the present work is focused in a piezoelectric tile design, which can take mechanical energy that comes from pedestrians, and transform it into electric energy, with the purpose to store it in a battery and finally use it as an LED power supply.

The design process has multiple stages. The first one consist into choose an appropriate material for the tile (the one that will be installed in the floor), later, a study of piezoelectric material characteristics has to be made with the aim of choosing a piezoelectric that suits with the project requirements. Once this process is done, the procedure is to determine how to fusion the tile and the piezoelectric in a good manner, to turn them into one unique element, which in our case is the electric generator.

The next step describes electronic circuits design. Those circuits are made with the objective of converting the alternating voltage produced by the piezoelectric, into direct voltage so it can be stored in a battery. In this stage, the rectification and storage circuits are included, as well as a complete LED illumination system circuit.

Finally, there is a simulation stage where the system behavior can be observed. At first, the simplest simulation is made (a unique piezoelectric material). Later, there are multiple others simulations until reaching to the last one which emulates a more real result, in which the piezoelectric materials deformation may be seen, as well as the electrical circuit response.

Key words: Piezoelectric, Generator, Tile, LED.

INTRODUCCIÓN

El presente escrito se suma a los esfuerzos de muchos individuos por generar energía de una forma limpia, que no perjudique al planeta. Más específicamente, el trabajo de grado se centra en el campo de los materiales piezoeléctricos cuando se usan como generadores de energía eléctrica. El problema surge entonces de la pregunta ¿Cómo aprovechar la energía que diariamente transfieren los peatones al suelo cuando caminan? La respuesta se puede encontrar con el uso de los materiales piezoeléctricos. La idea del trabajo consiste en desarrollar una baldosa que pueda recolectar dicha energía y transformarla para que pueda ser usada en sistemas de iluminación de baja potencia.

Se empieza entonces por determinar un material que sea adecuado para usar como baldosa, teniendo en cuenta que se planea usar en ambientes exteriores y en senderos de alto flujo peatonal.

Posteriormente, se elige un material piezoeléctrico que cumpla con los requerimientos del proyecto. Es decir, que tenga especificaciones adecuadas en cuanto a generación de energía eléctrica. Lo anterior ya que existen muchas aplicaciones para los piezoeléctricos y algunos son más eficientes para ciertas tareas que otros.

Una vez se tengan los materiales seleccionados, se elabora el modelo equivalente de un piezoeléctrico. Esto se hace con el fin de comprender su funcionamiento, y por ende, tener criterios más sólidos a la hora de continuar con el diseño. Además se investigan ciertos datos importantes de la marcha humana para este proyecto.

Una vez que se tiene claro lo anterior, se pasa entonces a realizar un diseño de concepto y un diseño de detalle para determinar la forma en que quedarán ensamblados los piezoeléctricos y la baldosa, el tamaño de los materiales piezoeléctricos, cual es el mejor tipo de conexión eléctrica entre ellos, entre otros. Se aclara que no se realizó el montaje físico de la baldosa, el trabajo de grado consta únicamente de simulaciones y análisis.

En el capítulo 9 se elabora el circuito electrónico para el sistema, el cual cuenta con una sección para la generación y otra para el almacenamiento de la energía. Adicionalmente se introdujo un sensor de oscuridad al circuito.

Finalmente, se encuentra el capítulo destinado a las simulaciones del sistema que empiezan con el análisis de un solo piezoeléctrico, luego se añaden varios y se evalúa la conexión serie y paralelo. Como última simulación se encuentra la deformación que sufren los piezoeléctricos al ser sometidos a la fuerza de marcha de un peatón y su respuesta eléctrica ante tal estímulo.

Antes de finalizar, se realizan las conclusiones obtenidas del trabajo, se resumen también una serie de pasos que el autor elabora con el fin de agilizar el proceso de diseño para quien desee hacer una aplicación similar, y por último, se dan recomendaciones para trabajos futuros.

1. PRELIMINARES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1 Contexto y caracterización del problema

El ser humano requiere de energía para poder subsistir, manejar su entorno y producir bienes (Román L, 2006). Casi todos los tipos de energía que conocemos provienen directa o indirectamente del sol. Por ejemplo, el viento (potencia eólica) es causado por la energía cinética de la radiación solar la cual produce una diferencia de presión entre las diferencias de temperaturas de las masas de aire. Los combustibles fósiles o hidrocarburos provienen de la energía transmitida por el Sol y el proceso de descomposición en ausencia de oxígeno de especies vegetales, que poblaron la tierra hace millones de años (Colmenar & Castro).

Se pueden abarcar dos grandes grupos de fuentes energéticas las cuales son: renovables y no renovables.

La energía convencional o no renovable proviene de fuentes que se agotan, como puede ser el uranio, gas de yacimientos, carbón y petróleo. Una vez agotadas no se pueden regenerar o tardan demasiado tiempo en hacerlo (Centro Argentino De Energías Alternativas [CADEA]).

Las energías renovables son aquellas que no se agotan, como puede ser la energía del sol, la energía eólica, la energía producida por la atracción gravitatoria de la luna (energía mareomotriz), la energía de la tierra (energía geotérmica), etc. [CADEA]

Después de la revolución industrial, los seres humanos se volcaron en gran medida hacia el uso de los combustibles fósiles (gas natural, carbón y petróleo), los cuales se empezaron a utilizar en alta cantidad debido a su gran eficiencia en lo que a transformación de energía se refiere. Sin embargo, muchos de estos combustibles presentan graves problemas ambientales, ya que emiten gases tóxicos o contaminantes a la atmósfera terrestre perjudicando la vida (Colmenar & Castro). Adicionalmente, a medida que los combustibles fósiles empiecen a escasear en el futuro, estos subirán de precio de acuerdo con la ley de oferta y demanda.

Muchos países han intentado disminuir su dependencia a los combustibles fósiles por medio de investigaciones en fuentes de energía “verdes” o renovables, que disminuyan la gran contaminación que existe hoy en día, sin embargo hoy por hoy los combustibles fósiles son la fuente de energía que más se utiliza en el planeta (Colmenar & Castro).

En el ámbito mundial, el conjunto de estos combustibles: petróleo, carbón y gas natural representa el 78% del consumo total. Aproximadamente un tercio de la energía primaria se destina a la producción de electricidad. El 40% de la electricidad proviene del carbón, mientras que el petróleo y la energía nuclear sólo cubren entre un 12% y 15% cada una. En términos de energía consumida, la electricidad representa el 12% del total y su destino es, por igual, los sectores industrial y residencial (Colmenar & Castro).

La cuarta parte de la población mundial consume las tres cuartas partes del total de energía primaria en el mundo. Estas desigualdades son más significativas cuando se considera el consumo de electricidad. Los países pobres (caracterizados por un hábitat muy disperso) exhiben grandes carencias de electrificación rural (Colmenar & Castro).

En el mundo actual, contamos con una enorme población que demanda grandísimas cantidades de energía, es necesario entonces realizar ciertos cambios que generen desarrollo, pero que estos a su vez estén de la mano con la sostenibilidad del planeta.

Esta propuesta de trabajo de grado pretende profundizar en el tema de la generación de energía por medio de materiales piezoeléctricos, en los cuales se ha venido trabajando en los últimos años. Estos son una fuente de energía mucho más limpia que los combustibles fósiles, además, presentan la ventaja de que no se agotan.

1.1.2 Formulación del problema

¿Cómo desarrollar un generador piezoeléctrico en baldosas para senderos de gran tráfico peatonal, de modo que la energía eléctrica generada por la carga dinámica de los peatones, sea aprovechable en la alimentación de sistemas de iluminación de bajo consumo?

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.2.1 Objetivo General

Diseñar un prototipo de baldosa con características piezoeléctricas, que pueda aprovechar la carga dinámica de peatones con el fin de generar energía eléctrica para alimentar sistemas de iluminación de baja potencia.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Seleccionar el material para la fabricación física de la baldosa soporte y el componente piezoeléctrico que genere la mayor cantidad de energía bajo condiciones de carga dinámica.
- Diseñar el conjunto formado por la baldosa y el piezoeléctrico.
- Diseñar los sistemas electrónicos para transmitir y almacenar la energía generada por el piezoeléctrico.
- Evaluar mediante simulación, el desempeño bajo carga compresiva de los circuitos electrónicos que alimentan el sistema de iluminación LED.

1.3 MARCO DE REFERENCIA

1.3.1 Antecedentes

Investigadores del área de ingeniería mecánica de varias universidades, entre las que se encuentran la universidad de Florida, la universidad técnica de Estambul, la universidad de selcuk y la universidad de marmara, en el año 2010 realizaron un trabajo que buscaba diseñar y probar un recolector de energía eficiente y compacto usando materiales piezoeléctricos (Korla, Leon, Tansel, Yenilmez, Yapici, & Demetgul, 2011).

En el trabajo, los investigadores construyeron recolectores de energía compactos, con un tamaño equivalente al de una batería AA. Cada uno de los recolectores contó con un circuito rectificador de 4 diodos y un capacitor. Una serie de recolectores piezoeléctricos con secciones circulares y cuadradas fueron construidos y probados a diferentes frecuencias y amplitudes (Korla et al. 2011).

Una vez fueron construidos los recolectores, se observó su comportamiento en un osciloscopio digital, y se pudo determinar que los voltajes llegaban a 16V en la sección circular y a 25V en la sección cuadrada a 50Hz. La salida de potencia más alta que se logró fue de 625 uW (Korla et al. 2011).

Entre las conclusiones obtenidas, se detectó que la salida de los dos tipos de recolectores (circulares y cuadrados) es muy similar a bajas amplitudes. Sin embargo, a medida que la amplitud aumenta, se observa que la sección cuadrada brinda una mejor interacción entre los elementos piezoeléctricos y la capa del colector, trabajando con una mayor eficiencia, a mayores amplitudes sin presentar una falla inmediata (Korla et al. 2011).

En Estados Unidos de Norteamérica durante el año 2008 se realizó otro estudio relacionado al tema planteado del anteproyecto. Esta vez se produjeron 4 prototipos de prueba que fueron construidos con materiales piezoeléctricos. La idea era que tuvieran la forma para poder introducirlos dentro de una bota, haciendo que cuando la persona que usa los zapatos camine, genere energía eléctrica por medio de su propia energía mecánica (Howells, 2009).

En la Figura 1 se puede observar la imagen del prototipo generador de talón, el cual debe tener un tamaño apropiado para caber dentro de una bota, y además debe cumplir con el objetivo de generar energía eléctrica usando la energía de los pasos del peatón.



Figura 1. Prototipo del generador de talón (Howells, 2009).

Básicamente el dispositivo consta de dos componentes importantes: el generador de talón y los circuitos electrónicos de potencia (Howells, 2009).

El funcionamiento consiste en que cuando una persona da un paso, el elemento piezoeléctrico envía impulsos eléctricos a los circuitos de potencia, los cuales rectifican dichos pulsos, los almacenan en un capacitor y luego convierten dicha energía en una salida de 12 V de corriente directa (Howells, 2009).

En la Figura 2 que se presenta a continuación, se pueden observar las formas de onda del circuito:

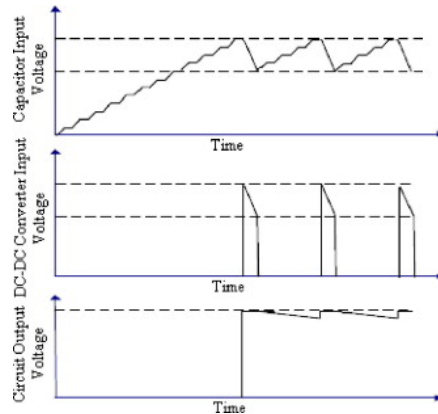


Figura 2. Formas de onda típicas en el circuito electrónico de potencia (Howells, 2009).

Luego de terminar con el estudio, se concluyó que para una persona promedio de 68 Kg, el dispositivo podía generar mucha menos potencia de la meta que plantearon al principio de 0.5W. Esto pudo ser atribuido a varios problemas que se detectaron posteriormente al diseño del generador del talón, en el cual las fuerzas resultantes de la oscilación del cristal no se cancelaban por completo, haciendo que reduzca la eficiencia en cuanto a transformación de energía se refiere (Howells, 2009). Las tecnologías que tienen que ver con la implementación de piezoeléctricos para la generación de energía, se están usando actualmente para realizar muchos proyectos alrededor del globo terrestre. Por ejemplo, en California, Estados Unidos de Norteamérica, se propuso a principios del 2011, implementar este tipo de tecnologías en una autopista para los automóviles (Gatto, 2011).

La idea es utilizar tecnología que ya se encuentra en uso en países como Italia e Israel. Se desean poner sensores piezoeléctricos relativamente baratos por debajo de las carreteras, los cuales puedan generar energía a partir de las vibraciones producidas por los vehículos cuando transitan sobre estas. El objetivo del proyecto es poder generar energía que pueda ser usada para alimentar las luces de la carretera, cabinas telefónicas y hasta las comunidades vecinas (Gatto, 2011)

“Una fuente mayor de energía esta justo debajo de nuestros pies, o mejor dicho, de nuestras llantas. California es la capital de los carros en el mundo. Tiene todo el sentido convertir en electricidad, la energía perdida por los automóviles cuando estos transitan por nuestras carreteras” (Gatto, 2011).



Figura 3. Carretera de California, EEUU (Gatto, 2011).

Como se dijo anteriormente, estas tecnologías han sido ya usadas en países como Israel en donde ya se tienen piezoeléctricos instalados debajo de las autopistas, y en Italia, en donde se firmó un contrato para usar esta tecnología en la autopista que conecta a Venecia con Trieste Autostrada (Gatto, 2011).

Varios puntos a favor acerca de estos avances son que al instalar los elementos piezoeléctricos, no se afecta el desplazamiento de los automóviles a través del camino, en términos de la sensación de conducción, eficiencia del combustible o en emisiones contaminantes (Gatto, 2011).

De acuerdo con un reporte generado en el 2009, cuando la tecnología fue instalada en las calles de Israel, el gobierno de ese país aseguró que se encontraban en capacidad de generar 2000 Watts-hora de electricidad, únicamente por el hecho de implementar el sistema a lo largo de 10 metros de autopista (Gatto, 2011).

1.3.2 Marco teórico

La evolución tecnológica de los materiales cerámicos suplantó a los materiales piezoeléctricos naturales, y expandieron en variedad la siguiente generación de materiales piezoeléctricos, usados en aplicaciones para la acústica, óptica, medicina y comunicación inalámbrica (Pisando y generando).

Los elementos piezoeléctricos son fabricados de simples cristales de niobato de litio (LiNbO_3), cuarzo sintético, y otros materiales que pueden exhibir propiedades piezoeléctricas significativamente superiores, en relación a los elementos poli cristalinos.

Relativa insensibilidad a la temperatura, factores elevados de conversión de energía eléctrica y energía mecánica, entre otros atributos, hacen que ha estos materiales se les pueda dar un gran uso (Pisando y generando)

La forma en la que funciona básicamente un elemento piezoeléctrico se muestra en la Figura 4:

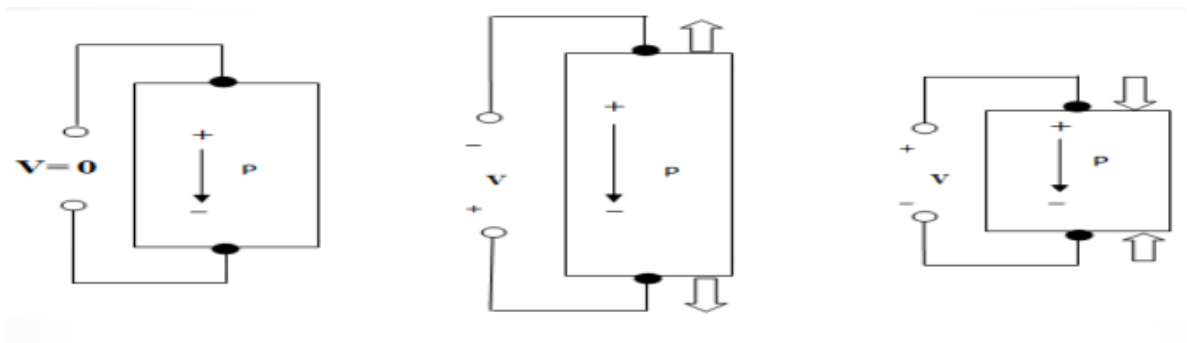


Figura 4. Efecto piezoeléctrico directo (Salgado Castro & Lugo Rangel).

Se pueden observar tres circuitos básicos que representan un elemento piezoeléctrico. En el primero, se observa que no existe ninguna carga en el elemento, por lo que no se genera voltaje alguno a la salida (Salgado Castro & Lugo Rangel).

Por otro lado, cuando el elemento es sometido a una carga o presión, se genera un diferencial de potencial en el cual la polaridad depende del sentido en que se aplique la fuerza (Salgado Castro & Lugo Rangel).

También se puede obtener el efecto inverso, como se muestra a continuación mediante la Figura 5:

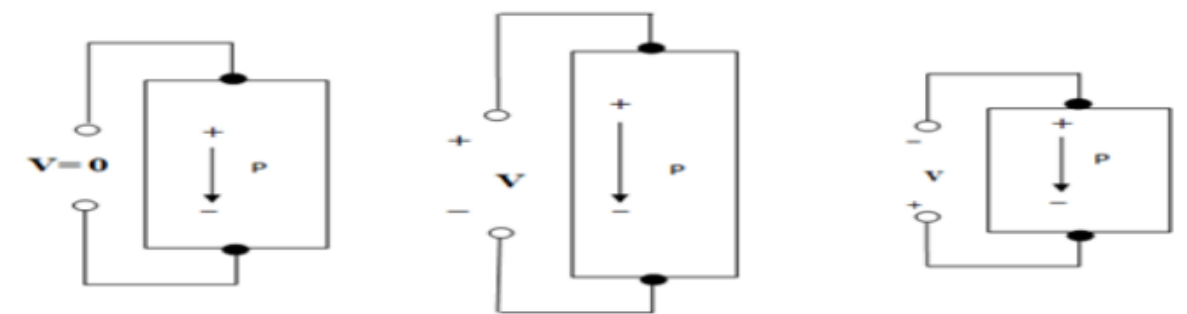


Figura 5. Efecto piezoeléctrico inverso (Salgado Castro & Lugo Rangel).

Ante una entrada de voltaje igual a cero, el elemento piezoeléctrico sigue sin cambio alguno. Sin embargo, cuando se aplica una tensión en la entrada, el elemento se deforma dependiendo de la polaridad y la intensidad de la corriente aplicada (Salgado Castro & Lugo Rangel).

Las ecuaciones que rigen la piezoelectricidad en una dimensión son (Universidad de Navarra):

$$P = Zd + \epsilon_0 \chi E \quad (1)$$

$$e = Zs + Ed \quad (2)$$

$$d = \left(\frac{\delta P}{\delta Z} \right)_E = \left(\frac{\delta e}{\delta E} \right)_Z \quad (3)$$

$$g = \left(\frac{-\delta E}{\delta Z} \right)_P = \left(\frac{\delta Z}{\delta E} \right)_e \quad (4)$$

Dónde (Universidad de Navarra)

P: Polarización [C/m^2]

Z: Tensión mecánica [N/m^2]

d: Coeficiente de deformación piezoeléctrica [m/V]

g: Coeficiente de tensión piezoeléctrica [m^2/C]

E: Campo eléctrico [V/m]

χ : Susceptibilidad eléctrica

e: Deformación elástica

s: Coeficiente de elasticidad [m^2/N]

ϵ_0 : Permisividad en el vacío o constante eléctrica, donde: $\epsilon_0 \approx 8.854 * 10^{-12} \left[\frac{F}{m} \right]$

(The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1988)

Las ecuaciones anteriores describen:

- La polarización eléctrica que aparece en el material al aplicar una tensión mecánica (Universidad de Navarra).
- La aparición de una deformación elástica en el material al aplicar un campo eléctrico (Universidad de Navarra).

Ahora, si se consideran las tres dimensiones del espacio, la definición general de coeficientes piezoeléctricos es (Universidad de Navarra):

$$d_{ik} = \left(\frac{\delta e_k}{\delta E_i} \right)_Z \quad (5)$$

$$g_{ik} = \left(\frac{\delta Z_k}{\delta E_i} \right)_Z \quad (6)$$

Dónde (Universidad de Navarra):

$$i \equiv x, y, z$$

$$k \equiv xx, yy, zz, yz, zx, xy$$

En el capítulo 5 (selección del material piezoeléctrico) se explican más detalladamente las definiciones y ecuaciones que rigen a los materiales piezoeléctricos, tanto en las constantes propias de sus especificaciones, como en notación de ejes coordenados.

Una propiedad importante de los piezoeléctricos en aplicaciones prácticas es la efectividad de convertir energía eléctrica en mecánica y viceversa. Este hecho queda reflejado en el coeficiente de acoplo k definido como (Universidad de Navarra):

$$k^2 = \frac{\text{Energía eléctrica convertida en energía mecánica}}{\text{Energía eléctrica de entrada}} \quad (7)$$

En la Figura 6, se presenta en forma resumida un esquema de la transformación de energía eléctrica a mecánica, que toma lugar en un material piezoeléctrico.

Transformación de la energía eléctrica a mecánica

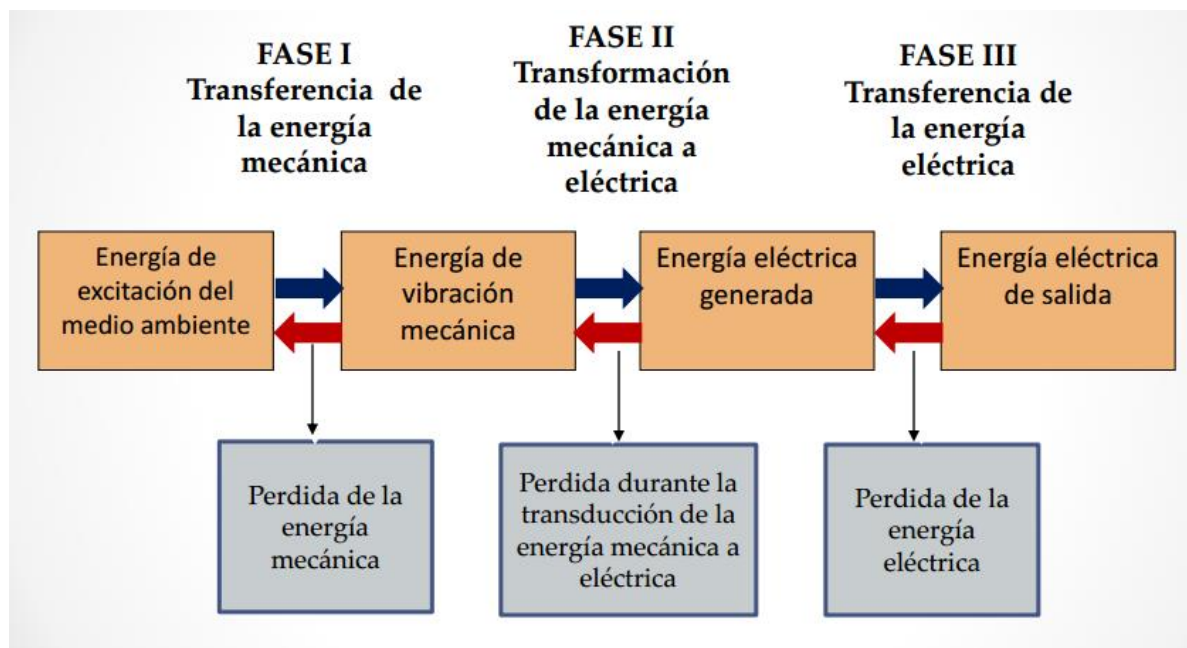


Figura 6. Ilustración de la transformación de la energía eléctrica a mecánica (Salgado Castro & Lugo Rangel).

2. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

El procedimiento que se llevará a cabo para desarrollar el trabajo, se dividirá en las siguientes etapas:

- **Recopilación de información:** es muy importante obtener información de diferentes fuentes confiables, con el objetivo de tener un soporte fundamentado, y así lograr un correcto desarrollo del proyecto.

Consiste básicamente en la consulta e investigación en revistas o publicaciones como Science Direct o Ebsco, que permitan obtener datos relevantes para el proyecto. También es posible realizar búsquedas complementarias provenientes de video casts como Youtube, Vimeo o TeacherTube.

La recopilación de información es un trabajo que se lleva a cabo durante todo el desarrollo de la tesis de grado, ya que esta, es una actividad que va de la mano con todas y cada una de las etapas que se proponen en cualquier proyecto.

- **Etapla 1: Determinación del material para la fabricación de la baldosa y el componente piezoeléctrico.**
 - **Identificación del material más apropiado para la baldosa:** es importante seleccionar el mejor material para la baldosa teniendo en cuenta consideraciones de rigidez, deformación bajo carga dinámica e interacción con el entorno en caso de instalarlo en ambientes abiertos. Para esto, es necesaria la consulta de libros de materiales, en donde se puedan encontrar datos esenciales como el módulo de Young, módulo de rigidez, esfuerzo de fluencia y resistencia a la abrasión, que permitan conocer el material más apropiado para el proyecto. Se deben realizar consultas a distintos libros de materiales de la EIA y además es necesario obtener asesoría de profesores que se desempeñen en dicha área.
 - **Selección del dispositivo piezoeléctrico:** se debe identificar el piezoeléctrico más apropiado para generar una energía eléctrica suficiente para alimentar un sistema de lámparas LED de bajo consumo. En esta actividad es fundamental la revisión de proveedores o fabricantes de piezoeléctricos, para poder así, obtener fichas técnicas y especificaciones de los mismos, y seleccionar en últimas, el que mejor encaje a las necesidades requeridas. También se debe consultar a profesores que tienen experiencia en el tema del proyecto.

- **Etapla 2: Diseño del conjunto formado por la baldosa y el piezoeléctrico.**

- **Generación del diseño conceptual:** se deben plantear varias alternativas de solución para el ensamble entre la baldosa y el piezoeléctrico. Luego de analizarlas y compararlas por medio de matrices de selección, se debe elegir la que mejor encaje a lo requerido en el proyecto.
- **Generación de los planos de detalle:** una vez esté concluido el diseño conceptual, se debe realizar el diseño en detalle del sistema, con el fin de optimizar la solución para que sea lo más eficiente posible. Dentro de esta actividad es importante elaborar modelos CAD en programas como Solid Edge o Inventor.
- **Etapas 3: Diseño de los sistemas electrónicos para transmitir y almacenar la energía generada por el piezoeléctrico.**
 - **Diseño del circuito para transmitir la energía generada por el piezoeléctrico:** es en esta etapa en donde se debe diseñar, con la ayuda de un software como Proteus, el circuito electrónico que regule la potencia generada por el piezoeléctrico y que lo lleve a un sistema de almacenamiento como una batería.
 - **Diseño del circuito de almacenamiento:** en esta actividad se busca diseñar el circuito de almacenamiento de energía del sistema por medio de baterías, de donde saldrá finalmente la energía hacia los LED's. Se realizará en el software Proteus.
 - **Diseño del sensor de foto resistencia:** se pretende diseñar un sensor de foto resistencia, que permita que el sistema se encienda automáticamente cuando haya ausencia de luz en el ambiente. Así mismo, este se debe apagar en el caso de que el medio se encuentre iluminado. Para esta actividad también es necesario el uso de un software como Proteus.
- **Etapas 4: Evaluación del desempeño mecánico de la baldosa y de los sistemas electrónicos.**
 - **Simulación del funcionamiento de los circuitos electrónicos:** que permita visualizar la potencia media e instantánea del sistema cuando es sometida a la carga de un peatón. Esta actividad es fundamental para determinar la eficiencia del sistema lo que en últimas, significa que tan viable sería construir el sistema en el futuro, en términos de su funcionamiento.
- **Redacción y entrega de informes de avance intermedio y final:** debido a que el trabajo se realizará en dos semestres académicos, es necesario entregar dos informes, uno al final de cada periodo, y así, dar a conocer los avances y resultados. La redacción de los informes se hace conjuntamente con todas las etapas del proyecto, pero únicamente se entregan en sus fechas respectivas, semana 14 informe intermedio y semana 28 informe final.

3. DISEÑO PRELIMINAR

Antes de empezar con el diseño, es necesario plantear ciertos criterios que se deben tener en cuenta durante todo el proceso. Se buscan definir características concretas del uso de la baldosa o de los lugares donde esta se podría instalar, que permitan direccionar mejor el diseño.

Baldosa piezoeléctrica

La idea principal del sistema consiste en aprovechar senderos peatonales de alto tráfico de personas, ya que allí se transforma energía constantemente. Lo que se pretende, es transformar parte de esa energía mecánica (la cual es disipada normalmente), en energía eléctrica que se pueda utilizar para alimentar lámparas de bajo consumo, como se muestra en la Figura 7.

Baldosas piezoeléctricas



Figura 7. Senderos piezoeléctricos (Egidi, 2012).

Es importante tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La baldosa estará sometida a desgaste debido a la gran cantidad de peatones que circularán sobre ella, por lo tanto debe ser hecha de un material resistente a la abrasión.
- La baldosa se instalará en ambientes exteriores, por lo que no debe ser de un material de fácil oxidación y/o corrosión.
- Es importante que la baldosa sea rígida ya que la idea es que la energía se transmita directamente del pie de la persona al piezoeléctrico, más no que sea disipada por la baldosa.

4. SELECCIÓN DEL MATERIAL DE LA BALDOSA

Para llevar a cabo la selección del material de la baldosa se realiza una matriz de decisión con la cual es posible determinar la mejor alternativa para este caso.

Matriz de selección

Los pasos llevados a cabo para elaborar la matriz de selección son los siguientes (Pimentel Villalaz, 2002):

1. Definir las alternativas que van a ser jerarquizadas
2. Definir los criterios de evaluación
3. Definir el peso de cada uno de los criterios
4. Construir la matriz
5. Definir la escala de cada criterio
6. Valorar cada alternativa con cada criterio (usando la escala definida anteriormente)
7. Multiplicar el valor obtenido en el lado izquierdo de las casillas, por el peso de cada criterio y anotarlo a la derecha de cada casilla
8. Sumar todas las casillas del lado derecho y anotar el resultado en la casilla Total
9. Ordenar las alternativas de mayor a menor

Planteamiento de alternativas para la selección del material:

Se plantean las siguientes 4 alternativas para el material de la baldosa:

- Adoquines de concreto
- Baldosas cerámicas
- Baldosas de concreto
- Gres porcelánico

4.1 Adoquines de concreto:

Los adoquines son elementos de concreto vibro compactados de alta resistencia. Ideales para la pavimentación de calles, vías, aceras, parques, jardines, estacionamientos, pasos peatonales, industrias pesadas, galpones industriales entre otros (PRODECON C.A, 2008). En la Figura 8, se pueden observar adoquines comunes, los cuales pueden ser conseguidos muy fácilmente.

VENTAJAS

1. Buena resistencia y durabilidad
2. Requiere poco mantenimiento
3. Fácilmente reutilizable
4. Fácil de instalar
5. Menor costo con respecto al asfalto y al vaciado en concreto



Figura 8. Adoquines de concreto comunes. El de la izquierda es en forma de corbatín (ACONSTRUCTORAS, 2012), mientras que el de la derecha es rectangular (Díaz, 2012).

En la Tabla 1, se muestran las características técnicas del adoquín de concreto “Adoking”, las cuales se tomaron para tener una idea de las propiedades generales de este tipo de pisos.

Especificaciones técnicas				
Tipo de unidad		Adoquín de concreto		
Dimensiones		Rectangular u "Holandes"		Estriado o "Londres"
		Ancho	10 cm	Ancho 11.25 cm
		Largo	20 cm	Largo 22.5 cm
		Espesor	4, 6 y 8 cm	Espesor 4 y 6 cm
Absorción		Menor al 5% del peso seco		
Resistencia a la compresión		Tipo I = 31 Mpa (320 kg/cm ²) espesor 4 y 6 cm		
		Tipo II = 41 Mpa (420 kg/cm ²) espesor 6 cm		
		37 Mpa (380 kg/cm ²) espesor 8 cm		
Densidad		Mayor a 2100 kg/m ³		
Usos y aplicaciones		Pavimentos peatonales	4 y 6 cm	
		Vehicular ligero	6 cm	
		Vehiculares pesados	>= 8cm	

Tabla 1. Especificaciones técnicas del adoquín de concreto “Adoking”. (UNICON)

4.2 Baldosa cerámica:

Las baldosas cerámicas son placas de poco grosor, generalmente utilizadas para revestimiento de suelo y paredes, fabricadas a partir de componentes de arcillas y otras materias primas inorgánicas, que se someten a molienda y/o amasado, se moldean y seguidamente son secadas y cocidas a temperatura suficiente para que adquieran establemente las propiedades requeridas (MATERIAS DE CONSTRUCCIÓN SANTA CRUZ). En la Figura 9, se puede observar un ejemplo de baldosa cerámica.

VENTAJAS (CONSTRUMÁTICA)

1. Duraderas
2. Fáciles de mantener
3. Resisten al agua y a las manchas

DESVENTAJAS (CONSTRUMÁTICA)

1. Frías
2. Resbaladizas, sobre todo cuando están húmedas



Figura 9. Baldosa cerámica (CONSTRUMÁTICA).

En la Tabla 2, se pueden observar las características técnicas propias de las baldosas cerámicas de marca “Cerámica Italia”.

Especificaciones técnicas				
Característica Pisos	Prueba	Requerido		Resultado
Absorción de agua	ISO 10545-3	6-10%	Grupo BIIb	Grupo BIIb
Resistencia a la abrasión	ISO 10545-7	3,4 o 5	PEI	3,4 o 5
Módulo de rotura	ISO 10545-4	18	N/mm ²	> 18
Resistencia a la rotura por flexión < 7,5 mm	ISO 10545-5	500	N	> 500
Resistencia a la rotura por flexión > 7,5 mm	ISO 10545-4	800	N	> 800
Longitud y ancho	ISO 10545-2	± 0,5	%	< 0,5
Ortogonalidad	ISO 10545-2	± 0,6	%	< 0,6
Planaridad superficie	ISO 10545-2	± 0,5	%	< 0,5
Coefficiente estático de fricción	ISO 10545-17	Clase 1, Clase 2		Clase 1, Clase 2
Resistencia al ataque químico	ISO 10545-13	Mínimo GB	Sin efectos Vis.	GLA, GHA, GA
Resistencia al manchado	ISO 10545-14	Mínimo 3	Clase	5

Tabla 2. Especificaciones técnicas de las baldosas cerámicas de marca “Cerámicas Italia” (Cerámica Italia).

4.3 Baldosa de concreto:

Tiene características similares al adoquín de concreto con la diferencia de que posee espesores más delgados, algo que la puede hacer más atractiva para el proyecto por tener un menor peso.

La baldosa de concreto es económica y de calidad. Puede ser usada sin ningún problema en áreas interiores o exteriores de viviendas, casa fincas, bodegas, instituciones educativas, religiosas y comerciales. El tráfico debe ser peatonal (ROCA).

VENTAJAS (CONCREPAL)

1. Excelentes cualidades de resistencia
2. Volumen y peso reducido con respecto al adoquín de concreto



Figura 10. Baldosa de concreto (CONCREPAL).

A continuación, en la Tabla 3 se pueden observar las especificaciones técnicas de la línea de baldosas de la compañía “ROCA”. Con ello, se puede tener una idea de las características principales de este tipo de pisos.

Ensayo	Baldosas de ROCA	Icontec 1085
Aristas	< 300 mm ; +/- 0,1% prom. 5 unid.	<300 mm ; + 0,1% ; - 0,4%
	> 300 mm ; +/- 0,2 % prom 5 unid.	>300 mm ; + 0,3mm ; - 0,9 mm
Angularidad	90° +/-0,18°	+/- 0,2 %
Espesor	+/- 1,5 mm prom 5 unid	No definido
Capa de desgaste	3,0 mm, prom 5 unid.	No definido
Flexión	Mínimo 1,2 kn	Mínimo 1,0 kn
Impacto	Mínimo 20 cm	Mínimo 15 cm
Absorción	Entre 8,0 % y 10,0 %	Máximo 7,0 %
Abrasión	Entre 35,0 y 38,0 mm	Máximo 32,0 mm
Compresión	No definido	Mínimo 135 kg/cm ²

Tabla 3. Especificaciones técnicas de la línea de baldosas, marca “ROCA” (ROCA).

4.4 Gres porcelánico:

La familia de los greses o baldosas de gres, constituyen el gran grupo de baldosas de baja o muy baja porosidad, especialmente las esmaltadas para pavimento (PROALSO). Es una familia muy amplia porque abarca un buen número de baldosas cerámicas esmaltadas y no esmaltadas, con texturas lisas o en relieve, decoradas y no decoradas, con el soporte blanco o con diferentes coloraciones (PROALSO). Además, son baldosas cerámicas de capacidad de absorción de agua inferior en todos los casos al 0,5%, estando las producciones actuales por debajo del 0,1%. En todos los casos son baldosas resistentes a la helada (PROALSO).

VENTAJAS (PROALSO)

1. Alta resistencia mecánica
2. Resistencia química
3. Resistencia a la helada



Figura 11 Piso conformado por baldosas gres (Pisos y Gres).

Criterios de evaluación:

- **Rigidez:** este es un factor que se debe tener muy en cuenta en el diseño, ya que la idea de la baldosa es que la mayor parte de la energía que se transmite del peatón hacia el suelo, sea recibida por el piezoeléctrico.

El material de la baldosa debe ser bastante rígido para cumplir con dicho cometido. Si se piensa por ejemplo en una plastilina, al hacerse una fuerza sobre ella, casi la totalidad de la energía impregnada en el movimiento pasaría a convertirse en la deformación de la misma. Dicha analogía es la que se pretende evitar con un material rígido, que permita vía libre para que la energía llegue al piezoeléctrico sin desvanecer. A este punto se le otorga un peso de 30% dentro del total.

- **Resistencia a la abrasión:** como se mencionó anteriormente, el objetivo de la baldosa consiste en que muchos peatones circulen sobre ella, lo cual aumenta el desgaste de la misma. A este punto no se le concede un peso muy grande debido a que en su mayoría, los zapatos son hechos de suelas de caucho, por lo cual no se espera un desgaste excesivo, sin embargo, se debe tener en cuenta este factor en el largo plazo. Se estableció a este punto un peso de 15% dentro de la calificación.
- **Resistencia al deterioro ambiental:** otro factor importante radica en el hecho que la baldosa será instalada en ambientes exteriores. Esto hace que el material deba ser resistente a los agentes externos del medio que puedan hacer que la baldosa

pierda sus propiedades o se deteriore, por ejemplo la oxidación o la corrosión. A este punto se le otorgó un peso de 20% dentro del total.

- **Facilidad de instalación y remoción:** se tiene en cuenta este factor ya que es importante contar con una facilidad para retirar el material en caso de que el sistema requiera mantenimiento o que deba ser cambiado por una nueva baldosa. A este punto se le otorga un peso del 20%.
- **Peso:** siendo coherentes con el punto anterior, se desea que la baldosa sea lo más liviana posible para que se pueda transportar fácilmente en caso de ser necesario. Finalmente, se le otorga a esta variable un peso del 15%.

Matriz de selección:

En la Tabla 4, se observa la matriz de selección que se elaboró para determinar el material más apropiado en el proyecto. Se utilizaron valores del 1 al 5 en la calificación, donde el 5 representa la mejor puntuación mientras que el 1 significa la más baja.

Criterio de selección	Rigidez		Resistencia a la abrasión		Resistencia al deterioro ambiental		Facilidad de instalación		Peso		Total
Peso del criterio	30%		15%		20%		20%		15%		100%
Alternativa	Valor	Total	Valor	Total	Valor	Total	Valor	Total	Valor	Total	
Adoquín de concreto	5	1,5	4	0,6	4	0,8	3	0,6	2	0,3	3,8
Baldosa cerámica	3	0,9	5	0,75	4	0,8	4	0,8	5	0,75	4
Baldosa de concreto	5	1,5	4	0,6	4	0,8	4	0,8	4	0,6	4,3
Gres porcelánico	3	0,9	4	0,6	5	1	4	0,8	4	0,6	3,9

Tabla 4. Matriz de selección del material a utilizar en la baldosa

Según los datos arrojados por la matriz de selección, el material que se escoge para el proyecto es la baldosa de concreto. Esto debido a su buena combinación entre rigidez y resistencia a la abrasión. Adicionalmente, es más liviano y fácil de transportar que el adoquín de concreto. Por último se dice que como el sendero es solo para peatones, no es necesario el adoquín de concreto, ya que el peso que transitará por la baldosa no es el mismo que el de un vehículo, la baldosa de concreto es más que suficiente para soportar estas cargas.

5. SELECCIÓN DEL MATERIAL PIEZOELÉCTRICO

Convención de signos

La convención de signos para los materiales piezoeléctricos se puede generalizar en 2 casos. La primera es llamada configuración de “apilamiento”, la cual opera en el modo 33. La segunda es la configuración “doblada”, que opera en el modo 31. La convención de signos asume que la polarización del material siempre ocurre en la dirección “3”. En la Figura 12, se puede observar con mayor claridad las líneas de las direcciones de las que se está hablando. Los giros están determinados de acuerdo con la regla de la mano derecha (Minazara, Vasic, & Costa):

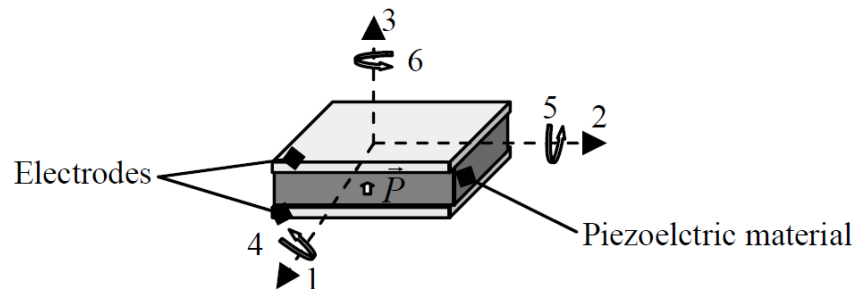


Figura 12. Definición de las líneas de los ejes de un material piezoeléctrico (Minazara, Vasic, & Costa).

En el modo 33 (Figura 13), el voltaje eléctrico es recuperado en la dirección “3” y el material es forzado en la dirección de polarización que es la misma dirección “3”. Por otro lado, en el modo 31 (Figura 14), el voltaje eléctrico se encuentra en la dirección “3”, mientras que el material es forzado en la dirección “1”, la cual es perpendicular a la dirección de polarización. Estos dos modos de operación son muy importantes a la hora de definir los coeficientes de acoplamiento electromecánico como d . Así, d_{31} se refiere al coeficiente para un elemento que se encuentra polarizado en la dirección “3” y forzado a través de “1” (Minazara, Vasic, & Costa).

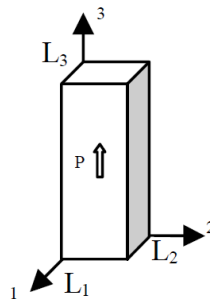


Figura 13. Modo 33 (Minazara, Vasic, & Costa)

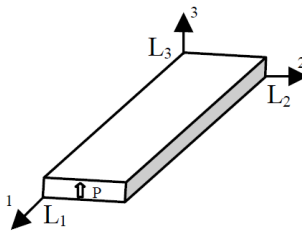


Figura 14. Modo 31 (Minazara, Vasic, & Costa).

Teniendo claro el concepto anterior, se debe decir entonces que para la baldosa piezoeléctrica del proyecto, se trabajará con el modo 33, ya que al recibir la presión por el paso de los peatones, la baldosa será forzada en la dirección “3” y a su vez, el material piezoeléctrico se polarizará en la dirección “3”.

Principales constantes

d – Constante de carga piezoeléctrica (ATCP de Brasil, Soluciones Piezoeléctricas, 2004)

Unidad: m/V (metros/Volt) o C/N (Coulomb/Newton)

Qué significa: Informa 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 Angstrom (10^{-10} metros) por Volt aplicado, y de 20 a 800 pico Coulomb por Newton aplicado, para cerámicas piezoeléctricas de PZT.

Cuándo/Dónde es una información indispensable: En el proyecto de posicionadores piezoeléctricos y sensores de fuerza/deformación.

g – Constante de tensión piezoeléctrica (ATCP de Brasil, Soluciones Piezoeléctricas, 2004)

Unidad: Vm/N (Volts x metros/Newton)

Qué significa: Informa cual es la proporción entre la diferencia de potencial generada (en Voltios) y la fuerza aplicada (en Newton) para una cerámica con una longitud de 1 metro.

Valores típicos: De -1 a 60 Volts para cada Newton aplicado (considerando la dimensión del elemento en cuestión de 1 metro), para cerámicas piezoeléctricas de PZT.

Disminuyendo la dimensión de la cerámica o aumentando la fuerza, el módulo de la tensión generada también aumenta.

Cuándo/Donde es una información indispensable: En el proyecto de detonadores de impacto y “magic clicks”.

k – Coeficientes de acoplamiento (ATCP de Brasil, Soluciones Piezoeléctricas, 2004)

Unidad: Adimensional.

Qué significa: Eficiencia del material en la transducción/conversión de energía eléctrica en mecánica y viceversa.

Valores típicos: De 0.02 (equivalente a 2% de eficiencia) a 0.75 (equivalente a 75% de eficiencia), para cerámicas piezoeléctricas de PZT.

Cuándo/Dónde es una información indispensable: En el control de calidad de las cerámicas piezoeléctricas y en el proyecto de dispositivos donde no se realiza conversión cruzada de energía, o sea, que una vibración o deformación en un eje no genere cargas eléctricas o diferencia de potencial en otro eje. En este caso, cuanto menor sea el respectivo factor de acoplamiento mejor.

Q – Factor de calidad mecánico (ATCP de Brasil, Soluciones Piezoeléctricas, 2004)

Unidad: Adimensional.

Qué significa: Es una medida relacionada con la disminución mecánica (amortiguamiento) del material. Decir que el factor de calidad mecánico de un dispositivo resonante es 100 (de una campana por ejemplo), significa que, si excitado momentáneamente en su frecuencia de resonancia, irá oscilar $100/2\pi$ veces antes de alcanzar el reposo.

Valores típicos: De 50 a 1500, para cerámicas piezoeléctricas de PZT.

Cuándo/Donde es una información indispensable: En el proyecto de dispositivos dinámicos de alta potencia.

Tan δ - Factor de disipación dieléctrica (ATCP de Brasil, Soluciones Piezoeléctricas, 2004)

Unidad: Adimensional.

Qué significa: Es la medida relacionada con las disminuciones dieléctricas del material. Valores típicos: De 2×10^{-3} a 25×10^{-3} para cerámicas piezoeléctricas de PZT.

Cuándo/Donde es una información indispensable: En el proyecto de dispositivos dinámicos de alta potencia y/o sometidos a altos campos eléctricos.

TC – Temperatura de Curie (ATCP de Brasil, Soluciones Piezoeléctricas, 2004)

Unidad: Grados Celsius

Qué significa: Es la temperatura en la cual la estructura cristalina del material sufre una transición de fase dejando de presentar propiedades piezoeléctricas. Después de superar esta temperatura, el material pierde la polarización remanente inducida tornándose inútil para la utilización como elemento transductor de energía eléctrica en mecánica.

Valores típicos: De 150 a 350 °C, para cerámicas piezoeléctricas de PZT.

Cuándo/Dónde es una información indispensable: En el proyecto de dispositivos deberán funcionar en altas temperaturas y de alta potencia.

Límite de tracción dinámico

Es el límite máximo de tracción a que el material puede ser sometido dinámicamente sin romperse. Este límite debe ser tomado en cuenta principalmente al proyectar transductores de potencia, donde las cerámicas piezoeléctricas son sometidas a altos campos eléctricos que provocan tanto la compresión como la tracción del material (Alves Pereira, 2010).

Constante dieléctrica (K o ϵ_r^3)

La constante dieléctrica relaciona la permisividad dieléctrica del material con relación a la permisividad del vacío, la cual es de aproximadamente $8.85 * 10^{-12} \left[\frac{F}{m} \right]$ (Channel Industries INC).

Tasa de envejecimiento

Es la tasa con que las propiedades piezoeléctricas del material se alteran con el tiempo a medida que la orientación de los dominios de los dipolos, creada por el proceso de polarización, desaparece (Alves Pereira, 2010).

A continuación, se muestra en la Tabla 5 los usos que se le dan comúnmente a los materiales piezoeléctricos que produce la empresa Channel Industries.

CHANNEL MATERIAL	C300	C600	C1300	C5400	C5500	C5600	C5700	C5804
------------------	------	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

NAVY MATERIAL TYPE*			IV	I	II	V	VI	III
Low power sonar	X	X	X	X				X
High power sonar			X	X				X
Ultrasonic cleaners		X		X				X
Depth sounders	X		X	X				
Ultrasonic welders				X				X
Hydrophones, Shallow	X				X	X	X	
Hydrophones, Deep				X				X
Vibration pickups	X				X	X	X	
Accelerometers					X	X	X	
Receiver Transducers	X				X	X	X	
High static motion transducers					X	X	X	
High dinamic motion transducers				X				X
Non-Destructive testing				X	X	X	X	X
High voltage generators				X	X			X
Audible alarms					X	X	X	

Tabla 5. Aplicaciones comunes de los materiales piezoeléctricos de la empresa Channel Industries (Channel Industries INC).

Para este trabajo de grado, se busca implementar un piezoeléctrico capaz de generar voltajes grandes para cargar una o varias baterías, por esta razón el material piezoeléctrico será escogido entre alguna de las 3 opciones que aparecen subrayadas en amarillo en la Tabla 5, los cuales son comúnmente usados como generadores de alto voltaje.

En el anexo 1, se pueden observar las diferentes constantes y coeficientes que presentan los materiales piezoeléctricos que fabrica la empresa Channel Industries.

Criterios de evaluación:

En el anexo 1 se encuentran subrayados en gris los ítems que son elegidos como criterios de evaluación, estos son:

- **Constantes piezoeléctricas g:** esta constante piezoeléctrica relaciona el voltaje generado por el piezoeléctrico a partir de una fuerza aplicada en el mismo. Se requiere entonces que este valor sea lo más grande posible, esto es así ya que una misma fuerza generará mayor voltaje en un material que posea una constante g superior a otro. A este ítem se le asigna un peso del 30%.
- **Coeficiente de acoplamiento electromecánico k:** siendo consecuentes con el ítem anterior, al coeficiente de acoplamiento se le dará un alto valor dentro de la evaluación 30%, ya que es muy importante que la mayor cantidad de la energía mecánica se convierta en energía eléctrica y no sea disipada por la baldosa.

- **Constante dieléctrica:** algo que se explica posteriormente con mayor detalle, tiene que ver con que para el presente trabajo se busca una alta capacitancia del material piezoeléctrico. Esta capacitancia está directamente relacionada con la constante dieléctrica, es decir, a mayor constante dieléctrica, mayor capacitancia. Se desea entonces que la constante dieléctrica sea grande. A este ítem se le asigna un valor del 25%.
- **Módulo de Young:** en capítulos posteriores se habla acerca del circuito eléctrico equivalente de un piezoeléctrico cuando se usa como generador de voltaje. Uno de los componentes del circuito es una fuente de voltaje de alterna que se rige por la ecuación: $V_a = \frac{k_{33} F h_{piezo}}{A} (0.5 Y \epsilon_0 \epsilon_r)^{-\frac{1}{2}}$

Donde V_a corresponde al voltaje generado y Y al módulo de Young del piezoeléctrico (Keawbooncliny & Engel, 2003). Bajo esta premisa se hace entonces necesario que el módulo de Young del piezoeléctrico sea lo más bajo posible para que el voltaje generado sea mayor.

Otra forma de verlo es que a mayor módulo de Young, menor es la deformación del material para una fuerza, área y espesor constantes. Si el material se deforma menos, se esperaría que generara una cantidad de voltaje más reducida. A este ítem se le asigna el 15% del peso de la calificación.

Matriz de selección:

En la Tabla 6, se observa la matriz de selección que se elaboró para determinar el material piezoeléctrico más apropiado en el proyecto. Se utilizaron los valores reales de cada variable donde los más altos representan la mejor puntuación. Para el módulo de Young, se utilizó la inversa del coeficiente ya que se necesita es el que tenga el menor valor.

Criterio de selección	Constantes piezoeléctricas (g33)		Coeficiente de acoplamiento (k33)		Constante dieléctrica		Módulo de Young (Y)		Total
Peso	30%		30%		25%		15%		100%
Alternativa	Valor	Total	Valor (%)	Total	Valor	Total	Valor	Total	
5400, Navy I	26,1	7,83	0,71	0,213	1300	325	0,1538462	0,0230769	333,1
5500, Navy II	25,8	7,74	0,73	0,219	1750	437,5	0,1923077	0,0288462	445,5
5804, Navy III	25,8	7,74	0,66	0,198	1050	262,5	0,1408451	0,0211268	270,5

Tabla 6. Matriz de selección del material piezoeléctrico a utilizar

Según los datos arrojados por la matriz de selección, el material piezoeléctrico que se escoge para el proyecto es el 5500, Navy II. Como se puede observar en las especificaciones, este tiene muy buenas características pues posee el mayor coeficiente de acoplamiento, el menor módulo de Young, la mayor constante dieléctrica, y además, su constante piezoeléctrica es muy similar al Navy I que posee la de mayor valor.

6. CRITERIOS DE DISEÑO Y MODELO PIEZOELECTRICO

Antes de iniciar con el planteamiento de la baldosa, se hace necesario explicar con detalle algunos parámetros importantes que guían el proceso de diseño. Para esto, se realiza el modelo de un piezoeléctrico cuando se usa como generador de voltaje.

6.1 Modelo de un piezoeléctrico generador de energía eléctrica

6.1.1 Modelo eléctrico

El modelo eléctrico del generador piezoeléctrico está representado por un circuito RC tal como se muestra en la Figura 15 (Keawbooncliny & Engel, 2003).

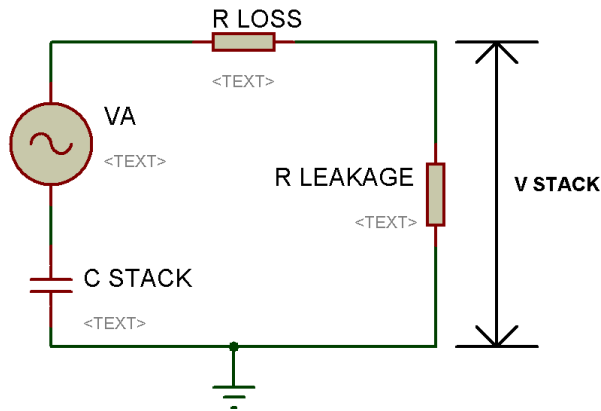


Figura 15. Circuito equivalente para un generador piezoeléctrico (Keawbooncliny & Engel, 2003).

Dónde:

C_{stack} : Capacitancia de apilamiento

R_{loss} : Resistencia por pérdidas

$R_{leakage}$: Resistencia por fuga

V_a : Voltaje en circuito abierto producido en el piezoeléctrico como resultado de una fuerza aplicada

Modelando el sistema eléctrico, se puede expresar la capacitancia de apilamiento como (Keawbooncliny & Engel, 2003):

$$C_{stack} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{h_{piezo}} \quad (8)$$

Dónde:

ε_0 : Permisividad libre del espacio = $8.85 \times 10^{-12} \left[\frac{F}{m} \right]$

ε_r : Permisividad relativa del material piezoeléctrico

A : Área transversal del piezoeléctrico

h_{piezo} : Espesor del piezoeléctrico

Además de lo anterior, el material piezoeléctrico presenta una resistencia serie, que es la pérdida dieléctrica interna del material que se expresa como (Keawboonclinay & Engel, 2003):

$$R_{loss} = \frac{\tan \delta}{\omega C_{stack}} \quad (9)$$

Dónde:

ω : Frecuencia angular de operación del generador

$\tan \delta$: Factor de disipación

Existe una resistencia paralela, que representa pérdidas por fugas en el material y es del orden de $10^6 \Omega$ (Keawboonclinay & Engel, 2003).

Se puede expresar entonces la energía eléctrica almacenada en el piezoeléctrico como resultado de la compresión mecánica así (Keawboonclinay & Engel, 2003):

$$W_{eléctrica} = \frac{q^2}{2C_{stack}} \quad (10)$$

Dónde:

$q = C_{stack} V_a$; Es la carga eléctrica almacenada en el material.

Por último se tiene una ecuación general para expresar V_a (Keawboonclinay & Engel, 2003):

$$V_a = \frac{k_{33} F h_{piezo}}{A} (0.5 Y \varepsilon_0 \varepsilon_r)^{-\frac{1}{2}} \quad (11)$$

Por otra parte, en el documento "Electrical Power Generation Characteristics of Piezoelectric Generator Under Quasi-Static and Dynamic Stress Condition" (el cual fue ampliamente citado durante la elaboración del modelo del piezoeléctrico), se desarrolla una conclusión muy importante y crítica para este proyecto.

En el trabajo realizado por (Keawboonclinay & Engel, 2003) se elaboran dos pruebas diferentes a un material piezoeléctrico; la primera es bajo carga cuasi estática y la segunda bajo carga dinámica. Estos dos se refieren al tiempo que dura la fuerza que se le aplica al piezoeléctrico con relación a la constante de carga del capacitor. Dicho en otras palabras, recuerde el lector que el circuito eléctrico equivalente de un piezoeléctrico es RC (resistivo, capacitivo), esto hace que exista una constante de tiempo de carga o descarga del capacitor. En el trabajo desarrollado por Keawboonclinay Et. Al, en el primer experimento (carga cuasi estática) la fuerza que se le aplica al piezoeléctrico tiene una duración mayor a la constante de carga del condensador. Por otra parte en el segundo experimento (carga dinámica) la duración del impacto es de menor duración que el tiempo que el condensador toma en completar su carga.

En los dos experimentos se utilizan fuerzas de compresión muy similares (490 N y 500 N respectivamente). Los resultados se muestran a continuación:

6.2 Comportamiento del piezoeléctrico bajo carga Cuasi-estática

En el primer experimento se halló que cuando se le aplica al piezoeléctrico una fuerza de mayor duración que la constante de carga del capacitor, se producen dos picos de voltaje, uno positivo en el momento en que se empieza a aplicar la fuerza, y uno negativo cuando se retira la fuerza. El resultado se muestra en la Figura 16.

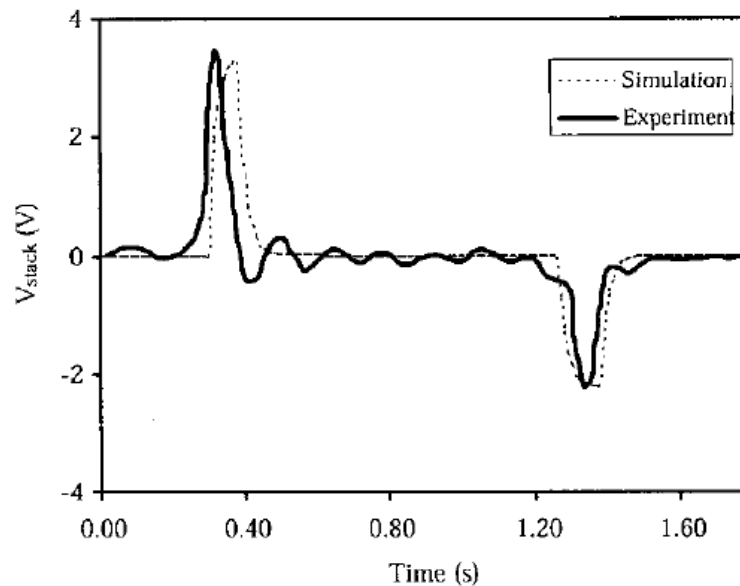


Figura 16. Voltaje de salida del piezoeléctrico en el experimento bajo carga cuasi-estática (Keawboonclinay & Engel, 2003).

6.3 Comportamiento del piezoeléctrico bajo carga dinámica

En este experimento, en el cual la duración de la fuerza es menor que la constante de carga del capacitor, se encontraron 2 conclusiones que son de gran importancia. Primero, la respuesta del piezoeléctrico consta de únicamente un pico de voltaje positivo. Segundo, debido a que el condensador no se alcanza a cargar por completo, se obtiene que el voltaje generado por el piezoeléctrico es unas 10 veces mayor al obtenido en la prueba anterior. El resultado se muestra en la Figura 17.

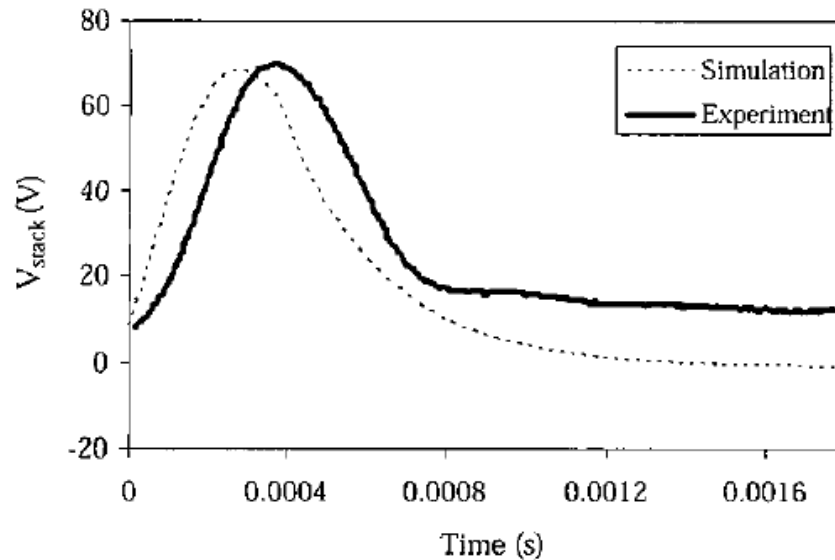


Figura 17. Voltaje de salida del piezoeléctrico en el experimento bajo carga dinámica (Keawboonclinay & Engel, 2003).

6.4 Características generales de la marcha

Otro aspecto muy importante en el proyecto es el relacionado con la marcha humana. Si bien no es necesario profundizar mucho en este tema, es muy importante conocer la duración de un paso promedio y la fuerza que se ejerce sobre el suelo en el momento de efectuarlo.

En la Figura 18, se pueden observar las características generales de la marcha (Nordín & Frankel, 2004).

Rango de valores normales para los parámetros de tiempo-distancia de la marcha de los adultos a una velocidad de marcha libre	
Zancada o ciclo de tiempo	1.0 a 1.2 m/s

Zancada o ciclo de longitud	1.2 a 1.9 m
Longitud del paso	0.56 a 1.1 m
Anchura del paso	7.7 a 9.6 cm
Cadencia	90 a 140 pasos/minuto
Velocidad	0.9 a 1.8 m/s

Figura 18. Valores promedio de los parámetros de marcha de un adulto (Nordín & Frankel, 2004).

La cadencia normal se encuentra entre los valores de 90 y 140 pasos por minuto. Por lo tanto para este proyecto se toma un valor medio. Se utiliza una cadencia de 120 pasos por minuto, es decir, cada paso con una duración promedio de 0.5 segundos.

Por otro lado, es importante conocer la fuerza que se genera sobre el suelo cuando una persona realiza un paso. El tiempo que dura cada pie apoyado sobre el suelo es aproximadamente un 60% del total del ciclo, para este caso, unos 0.3 segundos. En la Figura 19, se muestra la fuerza vertical generada sobre el piso en un paso normal (Nordín & Frankel, 2004).

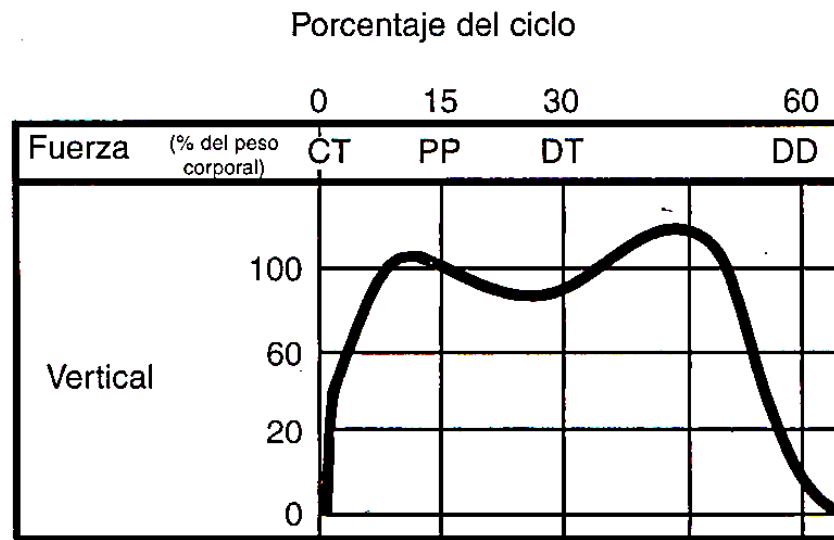


Figura 19. Fuerza de reacción vertical que se genera sobre el suelo al dar un paso, expresado en términos del % de peso corporal (Nordín & Frankel, 2004).

6.5 Conclusiones del modelo

Inicialmente se pensó que lo más apropiado era usar los piezoeléctricos en rango dinámico, pues como se vio anteriormente, es un rango que presenta condiciones mucho más óptimas que el rango cuasi-estático (se genera más voltaje y adicionalmente solo existen picos positivos de voltaje por lo que no habría necesidad de rectificar la onda).

Se optó por modificar los parámetros de resistencia y capacitancia del circuito con el fin de hacer que este se comportara dentro del rango de carga dinámica. Dichos valores se pueden modificar ya que estos dependen del área, espesor y otras características del piezoeléctrico. Sin embargo, se llegó a la conclusión de que no es posible asegurar que el piezoeléctrico trabaje bajo rango dinámico (por lo menos no para esta aplicación).

Teniendo el circuito eléctrico equivalente del piezoeléctrico, es posible modificar el valor de la resistencia y capacitancia del circuito, con el fin de aumentar el tiempo de carga del condensador lo que más se pueda. Por otro lado, el tiempo de la fuerza de entrada no se puede cambiar ya que para esta aplicación, la duración promedio de un paso en la marcha ya está determinada, es cierto que todos los pasos no durarán exactamente lo mismo, pero estos no deberían tener variaciones demasiado grandes.

Entonces, se puede optar en primera instancia por aumentar la capacitancia del piezoeléctrico para que también crezca el tiempo de carga, sin embargo, si se hace esto aumentando el tamaño del elemento, el voltaje producido por el material será mucho menor con respecto a uno que tenga tamaño reducido. Lo anterior no es lo que se desea para el sistema, por el contrario, lo que se busca es que el voltaje producido sea el máximo posible, por lo tanto la opción expuesta no se puede llevar a cabo. Esto se muestra más claramente en la Figura 20.

Como segunda instancia, se podría disponer de una resistencia de carga muy grande para compensar la baja capacitancia del condensador, sin embargo, esto no tiene sentido ya que se debe encontrar una resistencia de carga equivalente en la cual se disipe la mayor cantidad de potencia (el objetivo es que la mayor cantidad de energía mecánica sea convertida en energía eléctrica, por lo tanto si no se usa una óptima resistencia de carga equivalente, gran parte de la energía sería disipada al ambiente). De acuerdo a las simulaciones del numeral 10.2, la una óptima resistencia de carga equivalente es crucial pues con ella se logra una mayor generación de energía eléctrica.

Se puede ver entonces que para que se cumplan los requerimientos que busca el trabajo: la capacitancia debe ser pequeña; la resistencia equivalente de carga debe ser la óptima (es decir no se puede aumentar indefinidamente) y la duración de la fuerza aplicada en un paso tampoco se puede modificar pues es un promedio. Bajo las anteriores afirmaciones se concluye entonces que para esta aplicación no es posible hacer trabajar el sistema bajo carga dinámica de acuerdo a los requerimientos necesarios para un buen funcionamiento. Esto únicamente sería posible en situaciones donde la duración de aplicación de la fuerza fuera muy corta, algo que en este proyecto no es posible cambiar.

Se descarta la opción dinámica y se apunta el diseño hacia un sistema que funcione bajo una carga cuasi estática, se deben elaborar entonces criterios para el diseño de la baldosa que sean acordes al funcionamiento del piezoeléctrico.

7. DISEÑO DE CONCEPTO DEL CONJUNTO BALDOSA - PIEZOELÉCTRICO

En este capítulo se desarrolla una ruta con distintas opciones tanto para la baldosa como para el dispositivo piezoeléctrico. La idea entonces es seleccionar las más adecuadas para proceder así a un diseño en detalle en el capítulo posterior.

Criterios a evaluar

- **Forma geométrica del dispositivo piezoeléctrico:** Se desea definir si es mejor una forma cuadrada o circular para el material piezoeléctrico.
- **Tipo de conexión entre los piezoeléctricos:** la baldosa debe contar con más de un piezoeléctrico, ¿es más adecuado entonces conectarlos en serie o en paralelo?
- **Definir si es mejor tener piezoeléctricos con área pequeña o grande:** la idea de este numeral es determinar de forma concreta si es más adecuado utilizar elementos piezoeléctricos de tamaño reducido, o de mayor tamaño. Teniendo definido este numeral, en el siguiente capítulo se decide el número y tamaño exacto de los piezoeléctricos a utilizar.
- **Forma de ensamblar la baldosa con los piezoeléctricos:** por último se plantean dos alternativas para ensamblar la baldosa y los piezoeléctricos. La primera consiste simplemente en anclar los piezoeléctricos sobre el suelo y poner sobre ellos una única baldosa como protección. La segunda opción consiste en 2 baldosas que lleven los piezoeléctricos en su interior (como un tipo de sánduche).

Una vez definidos los criterios, se puede empezar a evaluar para determinar los más apropiados:

- **Forma geométrica del material piezoeléctrico:** para este punto se decidió utilizar piezoeléctricos de forma circular por 2 razones. Primero porque se puede notar que los cristales piezoeléctricos circulares son más comunes en la industria (los piezoeléctricos usados en Buzzer por ejemplo, o en relojes de cuarzo, son circulares), esto hace que puedan ser más fáciles de conseguir en caso de que se desee construir la baldosa en un futuro.

La segunda razón se debe a una entrevista realizada al profesor Yesid Montoya Goez, de la Escuela de Ingeniería de Antioquia, quien brindó la siguiente información:

Cuando a un elemento se le aplica una carga axial vertical, en este caso la fuerza de compresión generada por un peatón, se generan esfuerzos en el material, los cuales se pueden calcular en cualquier punto como (Montoya Goez, 2013):

$$\sigma_y = \frac{F}{A} \quad \text{ó} \quad \sigma_y = \frac{dF}{dA} \quad (12)$$

Lo que sucede entonces es que si se toma un elemento que sea irregular, para nuestro caso un cuadrado, el esfuerzo en las puntas sería mayor al esfuerzo producido en la zona central. Esto hace que la distribución de esfuerzos σ_y , no sea homogénea en toda la sección transversal (Montoya Goez, 2013).

Por otro lado, si la sección es circular, se puede garantizar que el esfuerzo es el mismo en cualquier punto de la superficie (Montoya Goez, 2013). Por lo anterior, se definió entonces utilizar materiales circulares para este trabajo, esto permite que los cálculos sean más simples y confiables.

- **Tipo de conexión entre los piezoeléctricos:** inicialmente se pensó en usar los piezoeléctricos en una conexión serie con el fin de que los voltajes producidos por cada uno fueran sumados y obtener así uno mayor. Sin embargo, debido a que el sistema funciona bajo carga cuasi estática, cada piezoeléctrico desarrollará picos de voltaje positivos o negativos dependiendo del ciclo del paso en que se encuentren.

Es posible entonces que en un momento dado un piezoeléctrico se encuentre generando un voltaje positivo, y al mismo tiempo que otro esté generando un voltaje negativo. Bajo esta premisa, si los piezoeléctricos se encuentran conectados en serie los voltajes no se van a sumar para obtener un mayor voltaje, si no que por el contrario se restarán perdiendo así eficiencia el sistema.

Una vez que este problema fue detectado, se optó entonces por usar un tipo de conexión en paralelo en la cual cada piezoeléctrico tenga conectado un diodo Schottky (o puente de diodos) en serie, con el fin de que si alguno produce un voltaje negativo, la corriente no pueda fluir debido al diodo, evitando así que los voltajes se resten como en el caso de la conexión serie.

El problema que tiene este tipo de configuración reside en que como cada piezoeléctrico tiene un diodo Schottky, el circuito solo dejara pasar corriente al piezoeléctrico que tenga la mayor polarización en cada instante de tiempo, es decir, en cada momento solo 1 de los piezoeléctricos estará generando la carga que ira a la batería. Si bien esto no es bueno del todo, se decide utilizar esta forma en vez de la serie en la cual es posible que los voltajes se resten en algunos instantes de tiempo.

En el capítulo 9 se explica con más detalle el circuito en paralelo usado para el sistema.

- **Definir si es mejor tener piezoeléctricos con área pequeña o grande:** para responder este numeral, se debe tener en cuenta la fórmula del voltaje producido por un piezoeléctrico. En ella se puede observar que el diferencial de potencial que se genera en el material depende directamente del grosor de este e inversamente del área, por lo tanto, entre mayor sea el área, menos voltaje se genera. En la Figura 20, se muestra el voltaje generado por un piezoeléctrico cuando se varía su área y espesor. En este caso el diámetro es 10 veces mayor que el espesor. El resto de variables como fuerza, módulo de Young, entre otros, se mantienen constantes.

Coefficiente	Unidad	Valor
Y33	N/m ²	5,2E+10
e0	F/m	8,85E-12
er		1750
k33		0,73
F	N	1000

Tabla 7. Valores de los coeficientes para la prueba de voltaje generado por el piezoeléctrico. Elaborado por el autor.

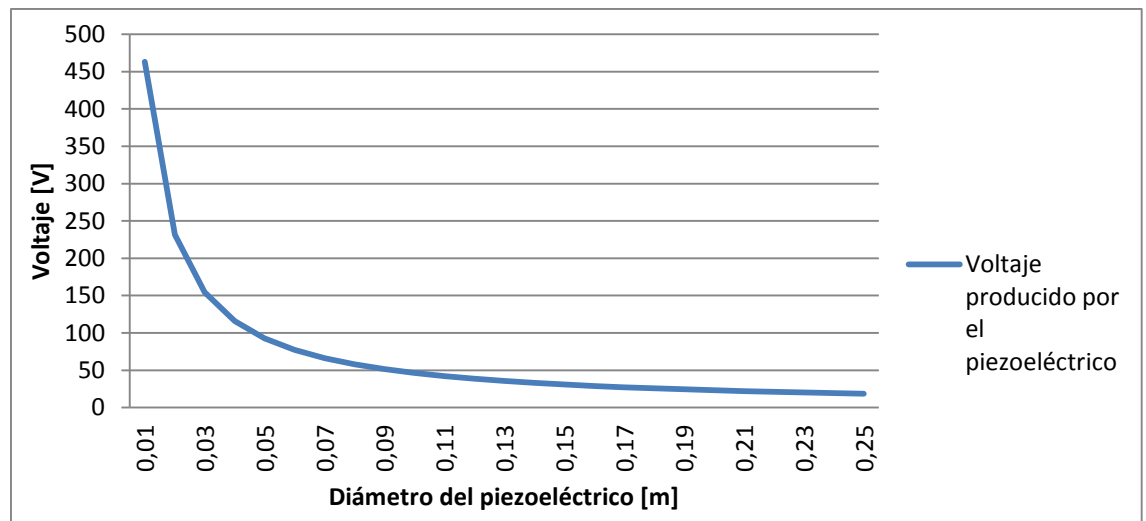


Figura 20. Voltajes producidos en open circuit por el piezoeléctrico en función de su diámetro y espesor (espesor 10 veces menor que el diámetro).

Se puede notar entonces que existe una diferencia muy grande en cuanto al voltaje que produce un piezoeléctrico de área pequeña y otro de área más grande. En este proyecto se busca que se genere la mayor cantidad de energía posible, por lo tanto, lo más sensato consiste en instalar piezoeléctricos que cuenten con un área reducida, esto con el fin de generar la mayor cantidad posible de carga eléctrica.

- **Forma de ensamblar la baldosa con los piezoeléctricos:** para este punto se plantearon 2 opciones. La primera consiste en poner los piezoeléctricos sobre el piso, y encima de estos, la baldosa de concreto que los proteja. La segunda opción consiste en utilizar dos baldosas de concreto de forma que los piezoeléctricos se sitúen entre las dos, formando una especie de sánduche.

Después de evaluar las dos opciones se elige la número 2, debido a que de esta forma se obtiene un objeto único y compacto, con la capacidad de ser transportado con mayor facilidad que el de la opción 1.

La primera opción (una sola baldosa), equivale a un menor peso, sin embargo, su construcción es más complicada pues se debe hacer en el sitio en donde se instalará, mientras que con la opción 2 (dos baldosas), el sistema está conformado de elementos que se unen y forman objeto compacto y fácil de transportar, el cual puede ser fabricado y luego instalado fácilmente en el sitio que se requiere. Las dos baldosas, sirven además como elementos de protección para los piezoeléctricos, entonces, las baldosas son las encargadas de recibir los esfuerzos mecánicos producidos por los peatones y de proteger los piezoeléctricos, mientras que estos últimos quedan con la única tarea de transformar dicha energía mecánica en energía eléctrica.

Se muestran entonces gráficamente las opciones seleccionadas durante este capítulo en la Tabla 8.

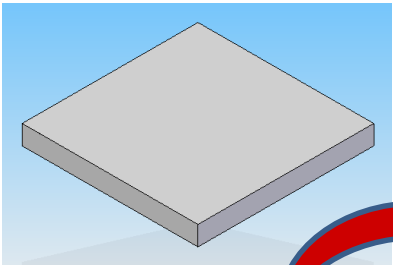
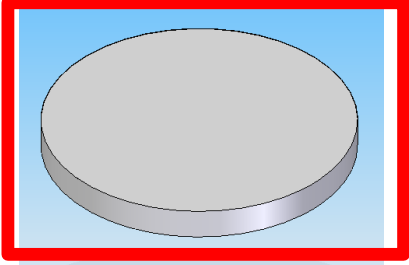
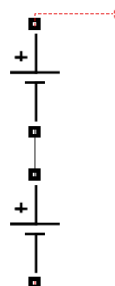
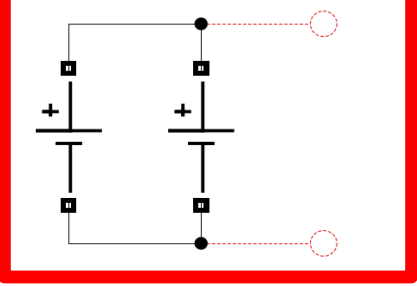
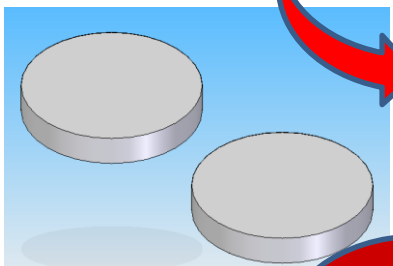
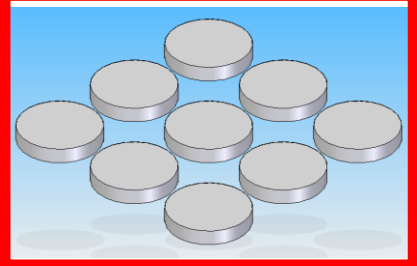

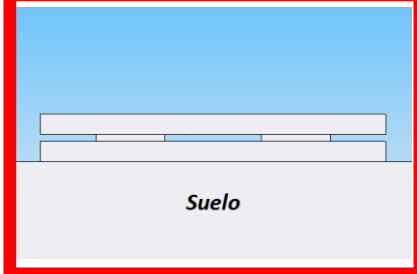
Criterio	Opción 1	Opción 2
Forma geométrica del piezoeléctrico	Rectangular 	Circular 
Tipo de conexión eléctrica	Serie 	Paralelo 
Área relativa de los piezoeléctricos	Grande 	Pequeña 
Forma de ensamble entre baldosa y piezoeléctricos	1 Baldosa (sencilla) 	2 Baldosas (sánduche) 

Tabla 8. Ruta de opciones seleccionadas para el diseño de concepto. Elaborado por el autor.

8. DISEÑO DE DETALLE DEL CONJUNTO DE LA BALDOSA Y EL PIEZOELECTRICO

El objetivo de este capítulo consiste en desarrollar el diseño en detalle del conjunto entre la baldosa y los piezoeléctricos. El método es similar al usado en el capítulo anterior, la diferencia radica en que en este se definirán valores exactos de ciertos criterios para que al final se obtenga el conjunto terminado. Los criterios a evaluar son:

- **Determinar la baldosa comercial a usar**
- **Definir el tamaño de los piezoeléctricos para este proyecto**
- **Elegir la cantidad de piezoeléctricos que se usarán y su distribución en la baldosa**
- **Ensamblar los componentes**
- **Baldosa comercial a usar:** como se vio en el capítulo anterior, el material seleccionado para la baldosa fue el concreto, este material presenta muy buenas características de rigidez. La baldosa comercial elegida para usar es la “Baldosa de concreto de 60 X 60 cm”, de la empresa Concrepal, la cual se muestra en la Figura 21:

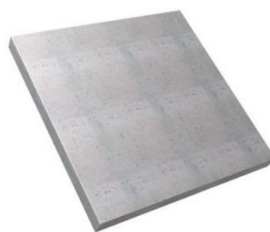


Figura 21. Baldosa de concreto (CONCREPAL).

Baldosa de concreto		
Propiedad	Unidad	Valor
Largo	mm	600
Ancho	mm	600
Profundo	mm	50
Resistencia a la compresión	Kg/cm ²	240
Resistencia a la compresión	MPa	23,54

Tabla 9. Propiedades baldosa de concreto (CONCREPAL).

- **Tamaño de los piezoeléctricos:** para determinar el tamaño que se utilizará de los piezoeléctricos, se remite al fabricante del cual se escogió el material a utilizar, este fabricante es: Channel Industries INC.

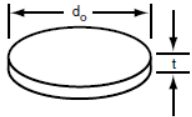
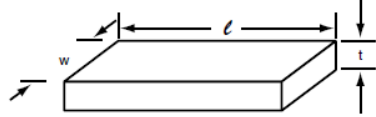
Typical Mechanical Tolerance Levels for Plates and Discs		 	
Disc (dia) Plates (l & w)		Level A Fully Machined (\pm)	Level B Minimal Machining (\pm)
INCH	MILLIMETER	INCH	MILLIMETER
0.125-1.500	3.2-38.1	0.003	0.08
1.500-2.500	38.1-63.5	0.005	0.13
2.500-3.500	63.5-88.9	0.005	0.13
3.500-4.500	88.9-114.3	0.010	0.25
4.500-6.000	114.3-152.4	0.010	0.25
Disc & Plate (thickness) (t)		Level C As Fired (\pm)	Level B Minimal Machining (\pm)
INCH	MILLIMETER	INCH	MILLIMETER
0.010-0.015	0.25-0.38	0.015	0.38
0.015-0.035	0.38-0.89	0.020	0.50
0.035-0.080	0.89-2.03	0.025	0.64
0.080-0.200	2.03-5.08	0.040	1.02
0.200-0.500	5.08-12.70	0.050	1.27
0.500-1.000	12.70-25.40		
Disc & Plate (thickness) (t)		Level A Fully Machined (\pm)	Level B Minimal Machining (\pm)
INCH	MILLIMETER	INCH	MILLIMETER
0.001	0.03	0.002	0.05
0.001	0.03	0.002	0.05
0.002	0.05	0.003	0.08
0.003	0.08	0.008	0.20
0.004	0.10	0.010	0.25
0.005	0.13	0.020	0.50

Figura 22. Tolerancias mecánicas de los piezoeléctricos (Channel Industries INC).

En la columna izquierda de la Figura 22, se pueden observar los diferentes valores para el diámetro y el espesor de los piezoeléctricos producidos por esta empresa, los cuales están dados en pulgadas y en milímetros. El menor diámetro posible es de 3,2 mm, mientras que el máximo es de 152,4 mm. Por otro lado, los espesores varían desde 0,25 mm hasta 25,4 mm.

Se decide entonces usar un diámetro pequeño para generar un voltaje grande como se vio en capítulos anteriores.

Debido a que el piezoeléctrico se debe instalar en la baldosa, se elige un tamaño pequeño, pero no el menor ya que este es muy difícil de manipular. Dicho lo anterior se elige un diámetro de 10 mm, el cual como se vio en la Figura 20, fue el que produjo un mayor voltaje en open circuit. Para el espesor, se debe elegir el más grueso posible, teniendo en cuenta que espesor del disco debe ser igual o menor a 10 veces el diámetro del mismo (según el fabricante). Por lo tanto se elige un espesor de 1mm.

Información Piezoeléctrico		
PZT 5500, Navy II		
Dimensiones	Unidad	Valor
Diámetro (D)	m	0,01
Espesor (h)	m	0,001

Tabla 10. Dimensiones piezoeléctrico seleccionado (Channel Industries INC).

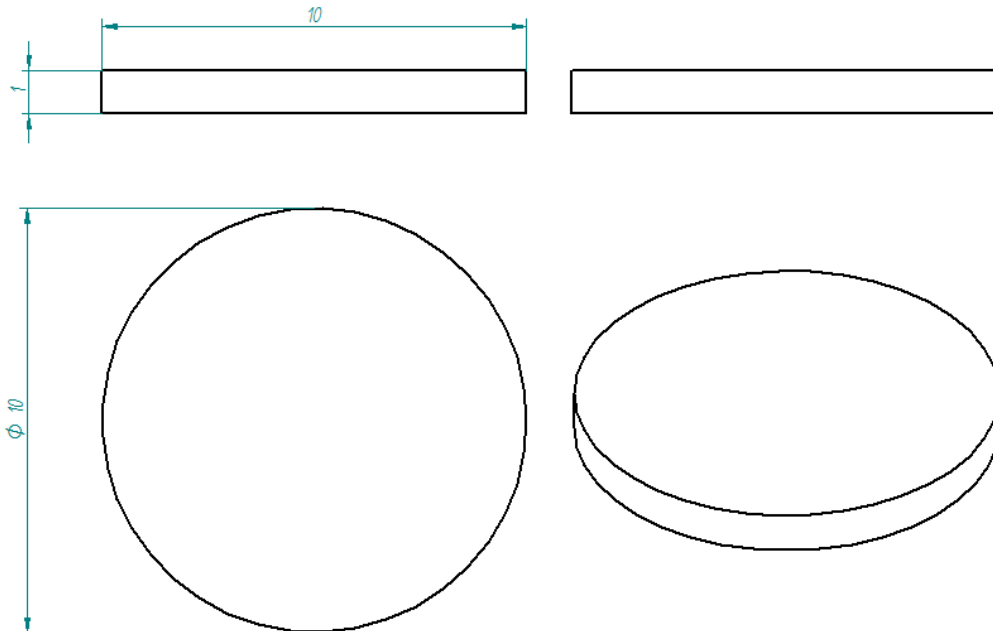
- **Cantidad y distribución de los piezoeléctricos:** para este punto, se retoma el concepto de la conexión en paralelo que se utiliza en el circuito. Recuerde el lector que el voltaje que genera el piezoeléctrico depende directamente de la fuerza aplicada en él. Por lo tanto, cuando un peatón realiza un paso, no se puede asegurar que la fuerza llegue a todos los piezoeléctricos en el mismo instante de tiempo. Al ser entonces una conexión en paralelo, en cada instante de tiempo solamente generará carga el piezoeléctrico que tenga la mayor presión instantánea.

Bajo la anterior premisa, se hace innecesario poner una gran cantidad de piezoeléctricos, ya que esto sería subutilizarlos. Solamente un piezoeléctrico genera carga en cada instante de tiempo, mientras que los otros no deberían generar carga alguna.

Sería bueno por ejemplo poner muchos piezoeléctricos, pero solo en el caso de que se pudiera asegurar que la fuerza llega exactamente al mismo tiempo a todos los elementos, algo que no se puede asegurar en el presente trabajo.

Se define por lo tanto una cantidad reducida de piezoeléctricos, los cuales permitan que el dispositivo siga funcionando, pero que su precio no se acreciente mucho. Se elige un total de 4 piezoeléctricos que serán distribuidos uniformemente en las esquinas de la baldosa cuadrada.

- **Ensamble entre baldosa y piezoeléctricos:** la baldosa de concreto y el piezoeléctrico elegido quedan de la siguiente forma:



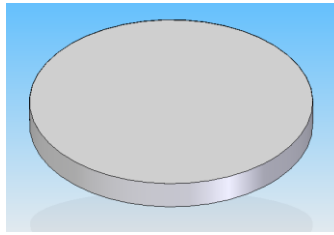


Figura 23. Plano y pieza sólida del piezoeléctrico elegido

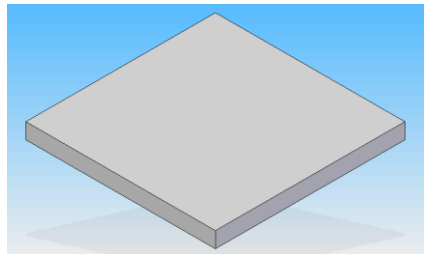
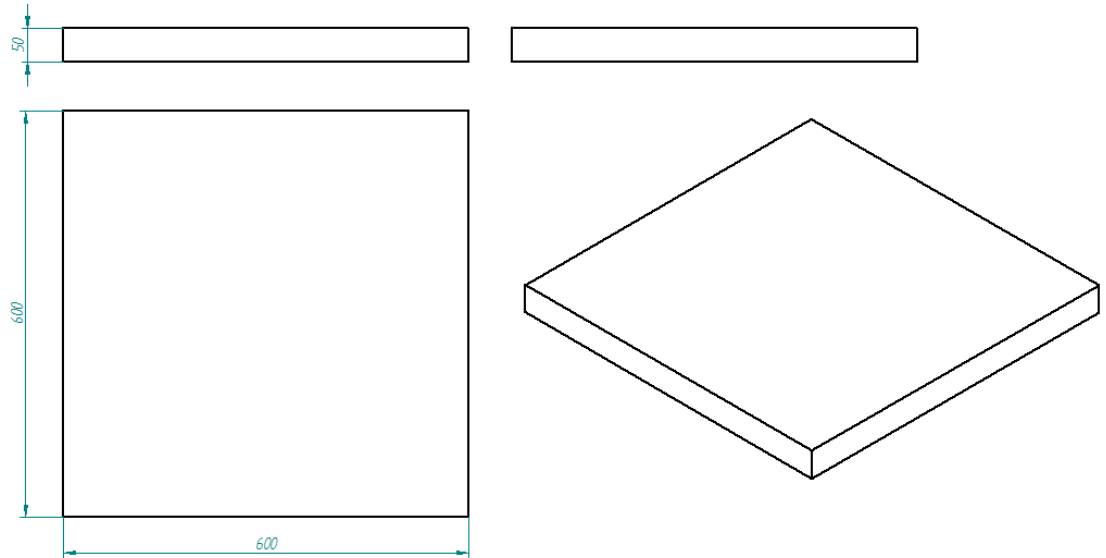
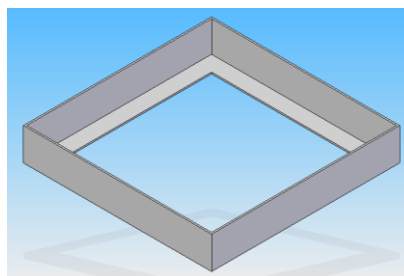


Figura 24. Plano y pieza sólida de la baldosa de concreto elegida.

Adicionalmente, se diseña un soporte en acero galvanizado para introducir las dos baldosas y mantenerlas unidas.



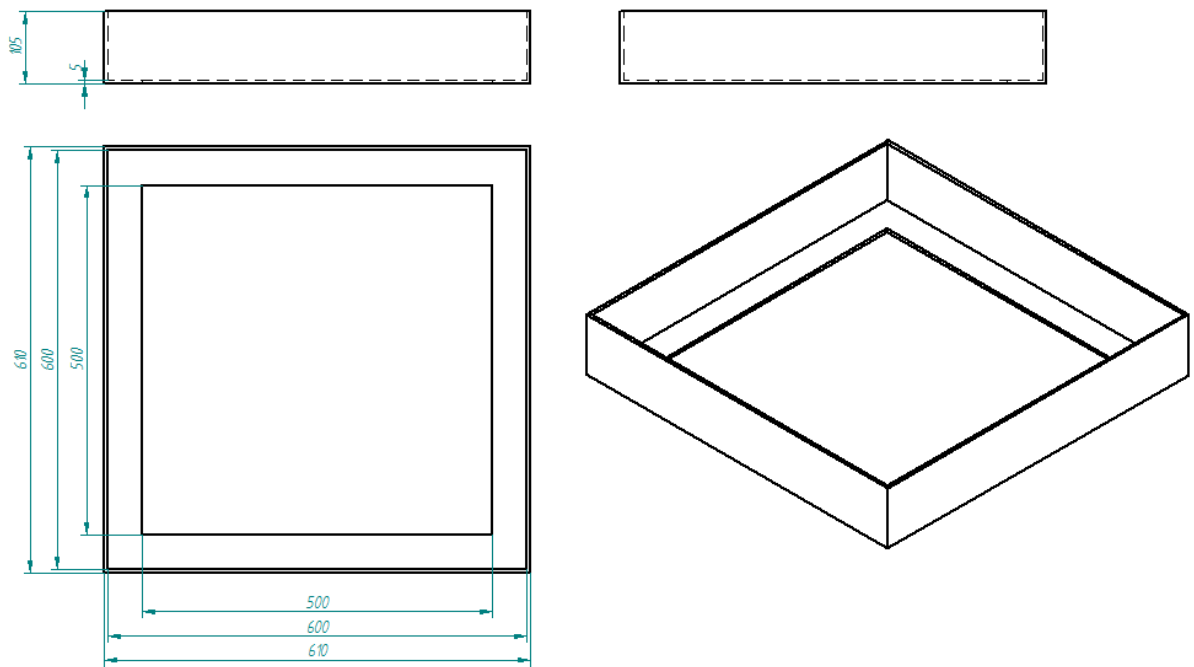
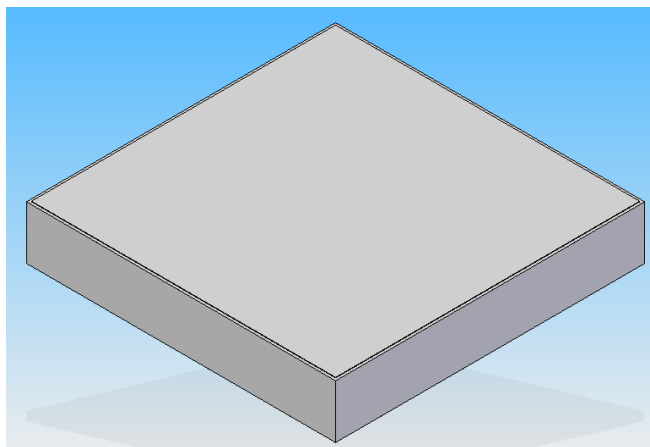


Figura 25. Plano y pieza sólida del soporte para el conjunto.

Una vez con las piezas, se procede a realizar el ensamble. Los 4 elementos piezoeléctricos son situados en las esquinas de las baldosas, formando una especie de “columnas” pequeñas, con el fin de que la baldosa superior no gire en caso de ser pisada en algún borde. El soporte sirve como un “cajón en el cual se ingresan todos los elementos para que queden compactos”. Se debe aclarar que en las simulaciones posteriores no se tuvo en cuenta la fricción generada entre la baldosa y el soporte cuando la baldosa se pisa



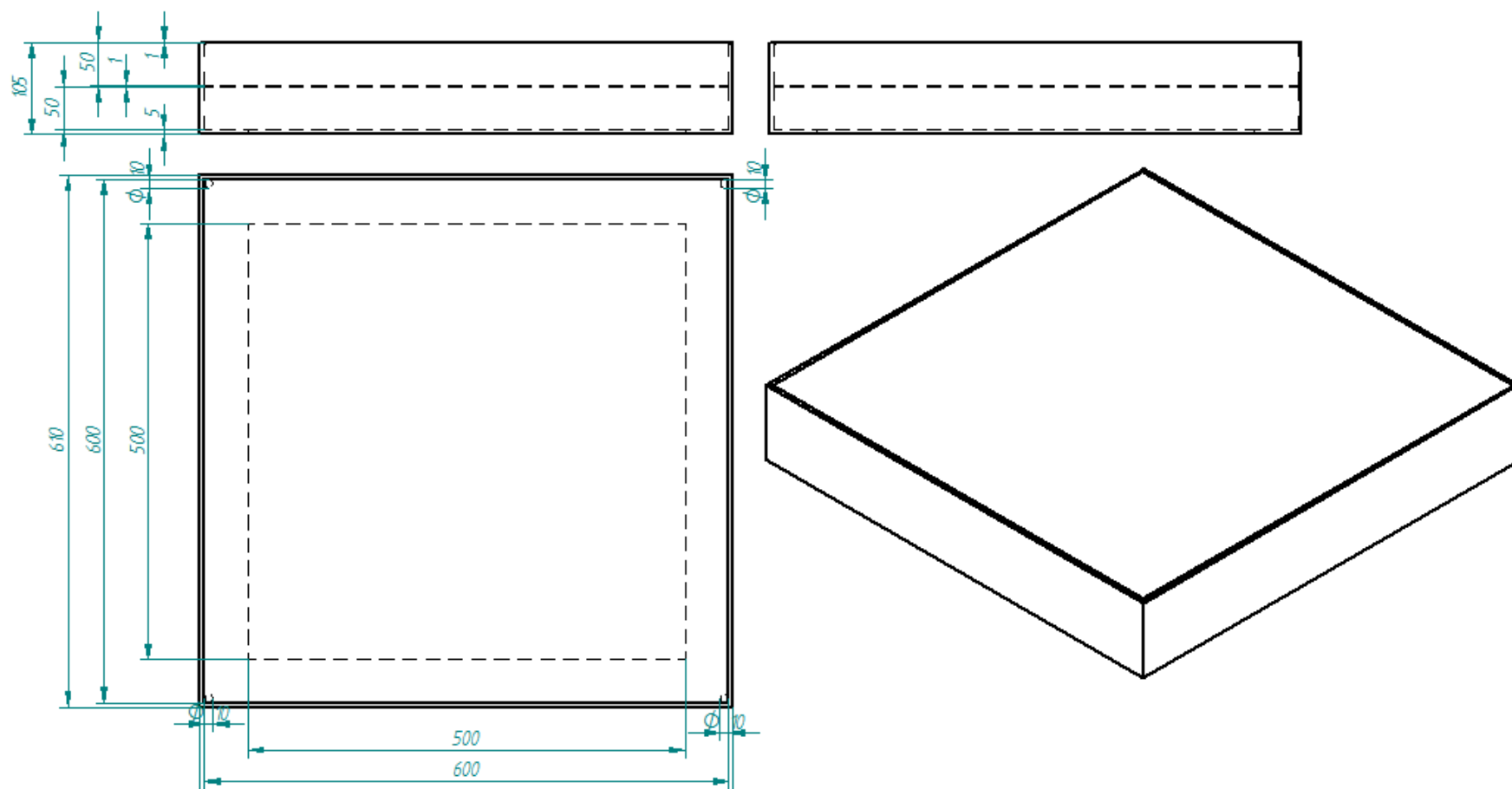


Figura 26. Plano y pieza sólida del conjunto entre las baldosas y los piezoeléctricos.

9. DISEÑO DE LOS SISTEMAS ELECTRÓNICOS PARA TRANSMITIR Y ALMACENAR LA ENERGÍA GENERADA POR EL PIEZOELECTRICO.

Cuando se usan materiales piezoeléctricos para recoger energía de los alrededores, es necesario (en la mayoría de los casos) que la energía que será usada, sea primero almacenada. Sin que se acumule una cantidad significativa de energía, el sistema de cosecha no sería una fuente de poder suficiente para la mayoría de los aparatos electrónicos (Sodano, Inman, & Park, 2004).

En la Figura 27, se puede observar el principio de generación de energía eléctrica para nuestro caso en particular, cabe anotar que el esquema fue rediseñado de la fuente inicial (Minazara, Vasic, & Costa).

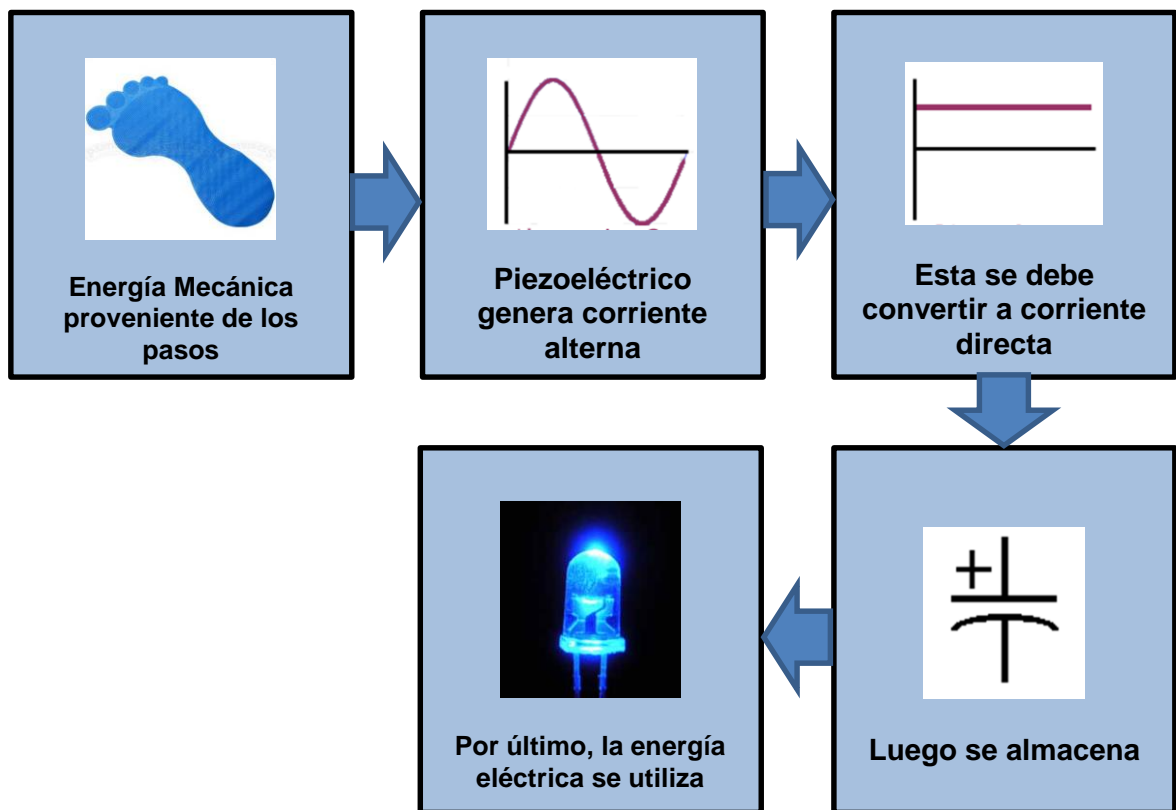


Figura 27. Principio de generación del material piezoeléctrico (Minazara, Vasic, & Costa)

9.1 Circuito para transmitir la energía generada por el piezoeléctrico y almacenamiento:

Para el circuito electrónico, se plantea usar el circuito integrado LTC3588-1 de la marca Linear Technology, el cual está diseñado específicamente para la cosecha de energía mediante piezoeléctricos (LINEAR TECHNOLOGY). El circuito integrado, posee internamente un puente de diodos para la rectificación, un regulador de voltaje, y adicionalmente, un control inteligente que modifica la impedancia en todo momento para obtener la mayor transferencia de energía a la carga (LINEAR TECHNOLOGY).

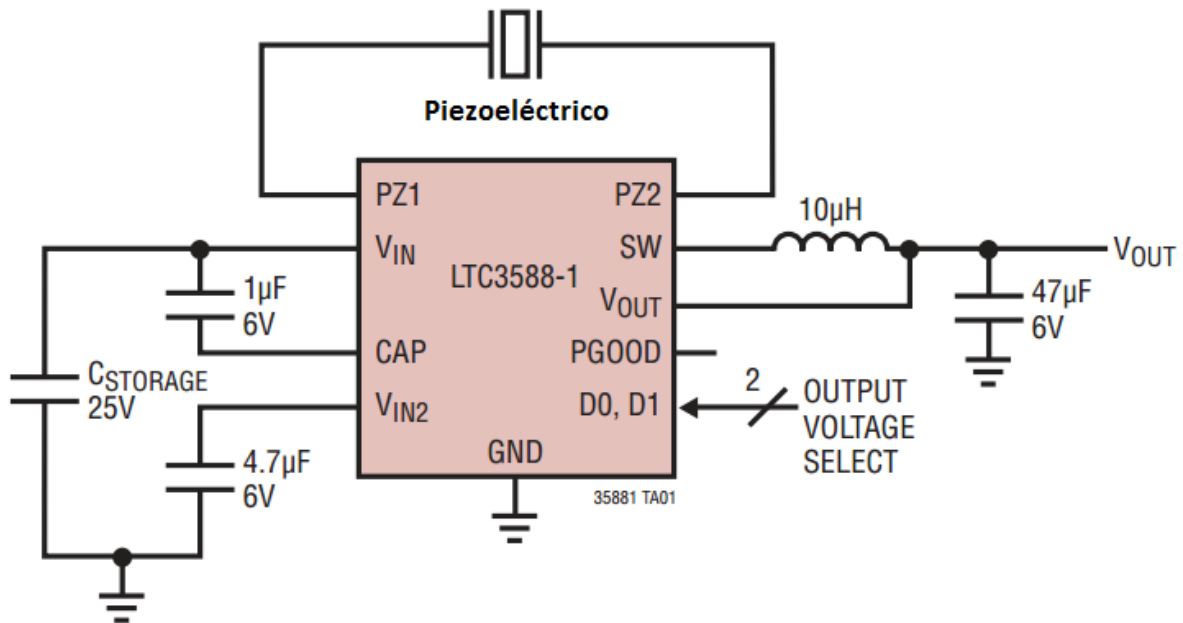


Figura 28. Circuito de generación de un solo piezoeléctrico usando el LTC3588-1 (LINEAR TECHNOLOGY).

El circuito integrado de la Figura 28, tiene un modo de “Undervoltage lockout” (UVLO), de ultra baja corriente, el cual, mediante una amplia ventana de histéresis, permite que la carga que se genera se acumule en el capacitor de almacenamiento hasta que el convertidor pueda transferir eficientemente una porción de la carga generada a la salida. La salida del circuito integrado se puede regular para que entregue 1.8V, 2.5V, 3.3V o 3.6 V dependiendo de la necesidad del usuario (LINEAR TECHNOLOGY). Para este caso, se usará la salida regulada de 3.6 V.

Recuerde el lector que el modo de conexión seleccionado para los piezoeléctricos es paralelo, en la Figura 28 se muestra el circuito para un solo piezoeléctrico, pero en realidad son 4 en total que posteriormente serán conectados para formar el circuito completo.

Una vez que la carga es entregada a la salida, esta se debe almacenar en una batería. Se escoge una batería recargable CR123A, la cual tiene un voltaje nominal de 3 V y una carga de 1000 mAh (Réflex ocasión).



Figura 29. Batería recargable CR123A (Réflex ocasión).

9.2 Diseño del sensor de foto resistencia:

Al sistema se le incluye un sensor de foto resistencia, el cual permite que el circuito entre en funcionamiento automáticamente en cuanto se haga de noche o se oscurezca mucho. Igualmente, en la mañana cuando el sol empieza a brillar, el circuito debe dejar de entregar energía.

El circuito básico consta de un MOSFET, una fotoresistencia y un potenciómetro para determinar el nivel de luz en el cual se debe encender el circuito.

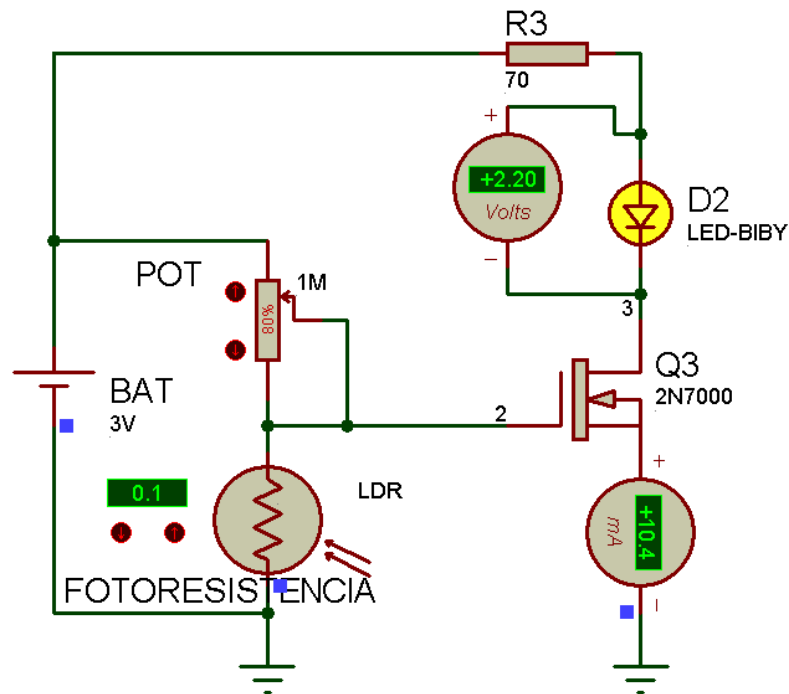


Figura 30. Circuito detector de oscuridad.

10. SIMULACIONES DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

Antes de iniciar con las simulaciones del sistema, se procede a enumerar en una tabla las principales características y coeficientes del piezoeléctrico seleccionado.

Información Piezoeléctrico		
PZT 5500, Navy II		
Dimensiones	Unidad	Valor
Diámetro (D)	m	0,01
Espesor (h)	m	0,001
Características	Unidad	Valor
Densidad (ρ)	Kg/m ³	7600
Módulo Young (Y)	N/m ²	5,20E+10
Permisividad del vacío (ϵ_0)	F/m	8,85E-12
Constante dieléctrica (ϵ_r)		1750
Constante piezoeléctrica (g_{33})	Vm/N	0,0258
Coeficiente de acoplamiento (k_{33})		0,73
Tangente de pérdida dieléctrica ($\tan \delta$)		0,02
Factor de calidad mecánico (Q_m)		75

Tabla 11. Características generales del piezoeléctrico seleccionado (Channel Industries INC).

Partiendo de los datos anteriores, y basándose en las fórmulas que se presentan a continuación y las que se plantearon en el capítulo 6, se pueden determinar algunos valores del circuito equivalente para el piezoeléctrico tales como su capacitancia, resistencia, entre otros. A continuación se muestran ecuaciones generales que sirven para calcular diferentes características del material tales como su área, volumen, frecuencia natural, entre otras, las cuales se plasman en la Tabla 12.

$$A = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \quad (13); \quad V = A * h \quad (14); \quad m = V * \rho \quad (15); \quad K = \frac{YA}{h} \quad (16)$$

$$W_n = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (17); \quad W_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \quad [Hz] \quad (18); \quad \tau = RC \quad (19)$$

(Beer, Johnston, Mazurek, Cornwell, & Eisenberg, 2009)

(Boylestad, 2004)

El resto de las ecuaciones fueron desarrolladas anteriormente en el capítulo 6.

Constantes calculadas del piezoeléctrico		
PZT 5500, Navy II		
Descripción	Unidad	Valor
Área (A)	m ²	7,85E-05
Volúmen (V)	m ³	7,85E-08
Masa (m)	Kg	5,97E-04
Constante elástica (K)	N/m	4,08E+09
Frecuencia natural circular (Wn)	rad/s	2615742
Frecuencia natural circular (Wn)	Hz	416308
Capacitancia (Cstack)	F	1,22E-09
Resistencia de pérdida (Rloss)	Ω	39,50
Resistencia de fugas (Rleakage)	Ω	5E+06
Constante de carga, descarga (τ)	s	6,08E-03
Tiempo de carga, descarga	s	3,04E-02
Va	V/N	0,4632

Tabla 12. Constantes del piezoeléctrico calculadas a partir de sus especificaciones

Va corresponde a una constante calculada del piezoeléctrico, la cual, al multiplicarla por la fuerza ejercida sobre el material, produce como resultado el voltaje en circuito abierto generado por el elemento. Dicho de otra forma, con un Va de 0.4632V/N, si se aplica sobre el piezoeléctrico una fuerza de 1000N, se producirán 463.2V en circuito abierto.

En este trabajo se supone que la masa promedio de una persona es de 70 Kg, por lo tanto para tener un número redondo y aproximado, se dirá que el valor del peso de una persona promedio es de 700 N para las simulaciones. Partiendo de lo anterior se puede decir que ante una fuerza de compresión de 700 N que se ejerza sobre el piezoeléctrico, este generará un voltaje máximo de 324.24 V en circuito abierto.

Para las simulaciones iniciales se introduce una fuerza en forma de rampa, la cual tiene una duración de 300 ms (lo mismo que dura aproximadamente el pie apoyado al dar un paso), de los cuales 100 ms equivalen a la subida, 100 ms dura estable en el máximo valor y 100 ms que corresponden a la caída, a continuación se muestra gráficamente.

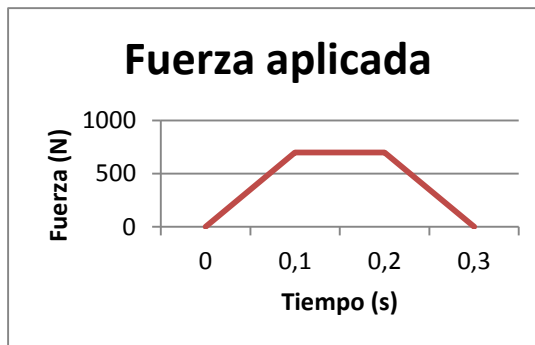


Figura 32. Gráfica de la fuerza aplicada en el piezoeléctrico para las simulaciones iniciales.

10.1 Simulación de un solo elemento piezoeléctrico

10.1.1 Circuito del piezoeléctrico con resistencia de carga

Se empieza simulando el circuito equivalente de un solo material piezoeléctrico con el fin de que el lector comprenda su funcionamiento. Se utiliza el modelo hallado en el capítulo 6, pero se le añade una resistencia que emula el efecto de la carga en el sistema. En esta simulación, se le aplica la carga completa a un solo piezoeléctrico (700 N), por lo que este genera un voltaje de aproximadamente 324,24 V en open circuit.

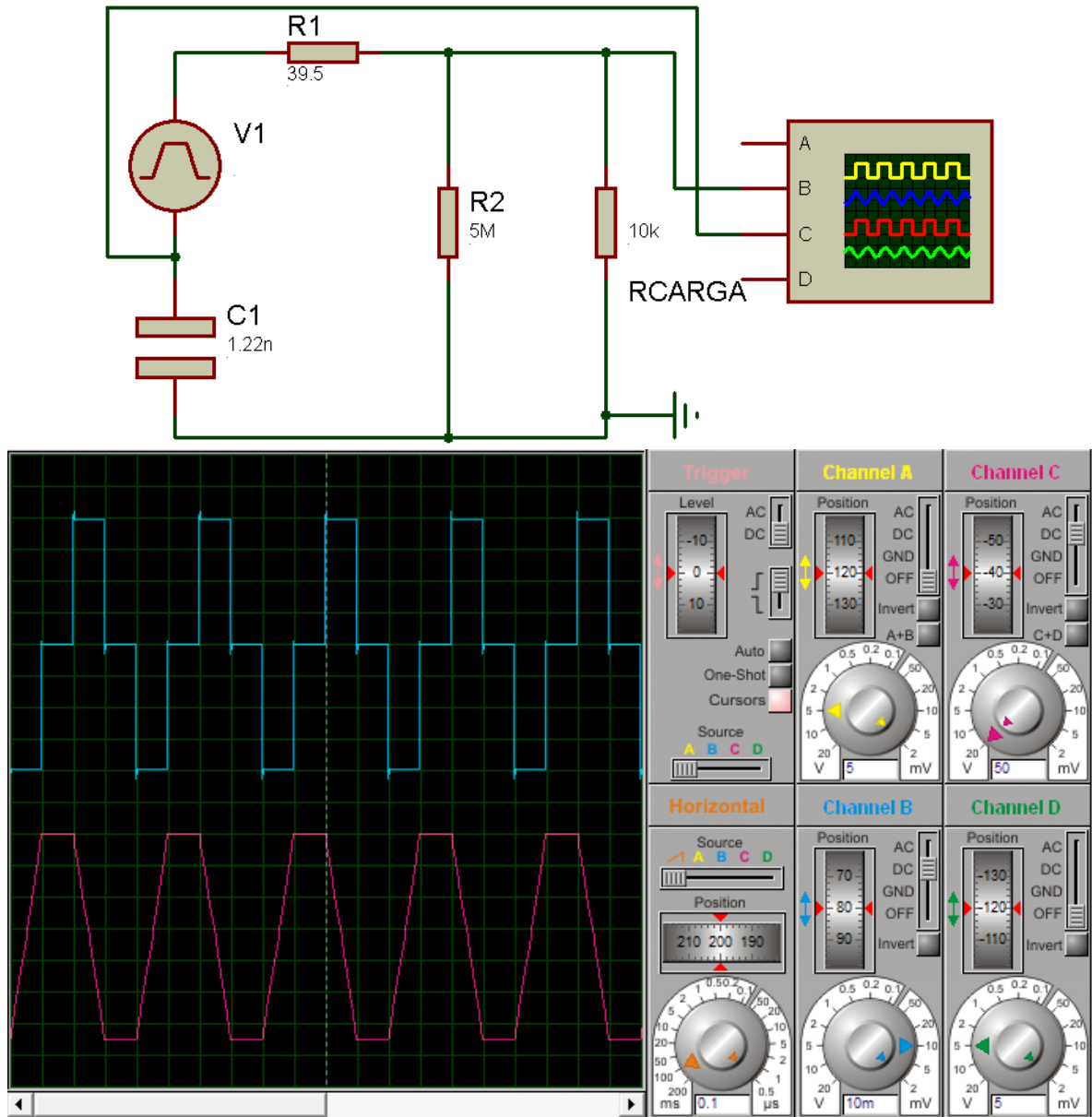


Figura 33. Circuito equivalente de un solo piezoeléctrico y su respuesta ante la fuerza aplicada.

Se puede comprobar, como se había explicado en el capítulo 6, que cuando el piezoelectrico funciona en rango cuasi-estático, este genera dos picos de voltaje cada que se aplica una fuerza en él, un pico de voltaje positivo ocurre cuando se comprime, y otro pico de voltaje (ahora negativo), toma lugar cuando la fuerza se retira. En este caso los voltajes pico en la carga son de +39mV y -39mV (línea azul, Channel B).

Para evitar los picos negativos, se introduce entonces un puente rectificador con diodos schottky, como el que usa el LTC3588-1.

10.1.2 Circuito del piezoelectrico con resistencia de carga y puente rectificador

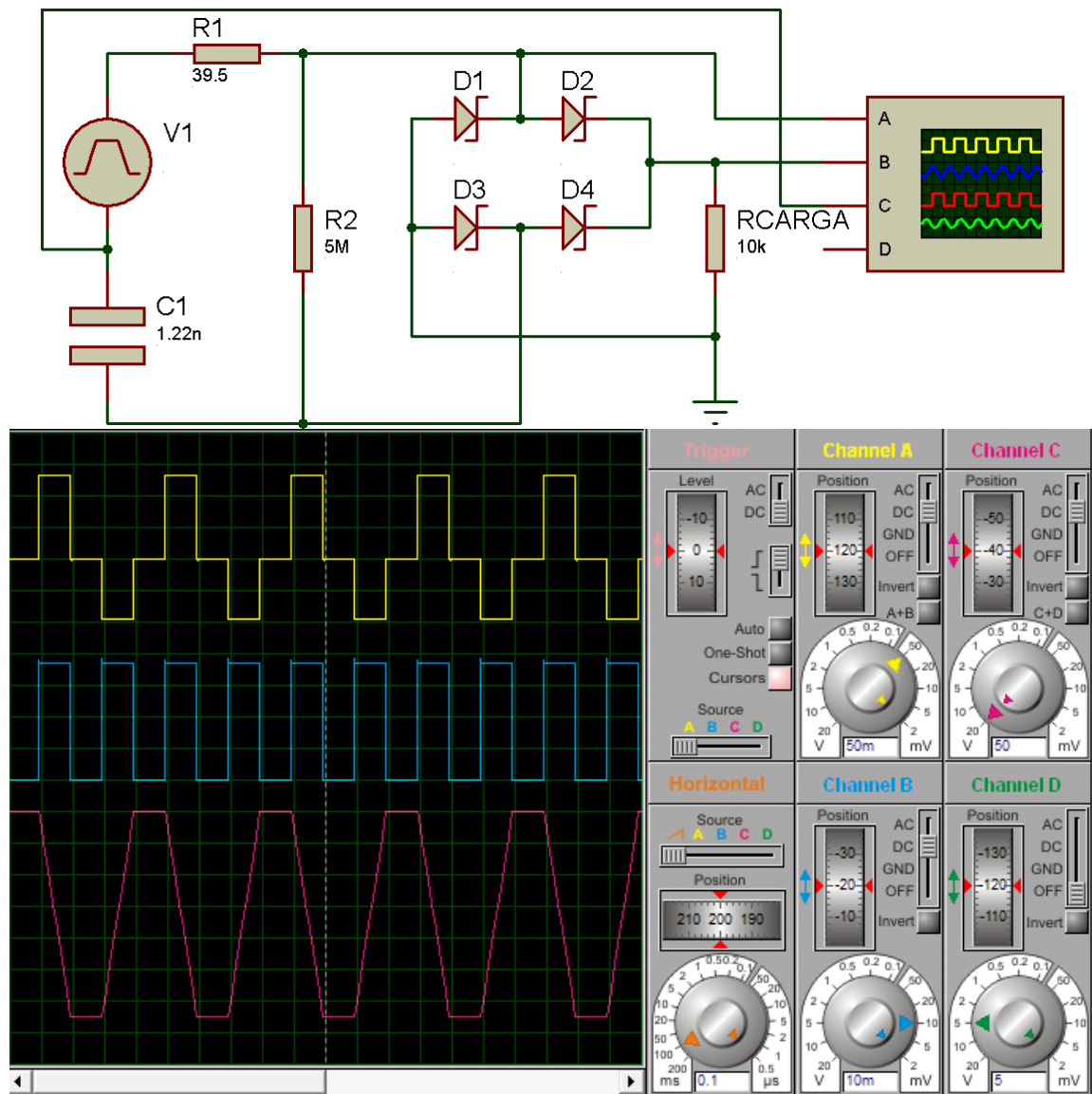


Figura 34. Circuito equivalente de un solo piezoelectrico, conectado a un puente rectificador y su respuesta ante la fuerza aplicada.

Se puede ver entonces que la señal ha sido rectificada y ahora el circuito genera en la carga voltajes pico de +37.5mV.

Teniendo ahora claro el comportamiento del modelo, se puede pasar a simular varios de ellos en serie y en paralelo.

10.2 Simulación del efecto piezoeléctrico del circuito en serie y paralelo y determinación de la resistencia óptima de carga

Este numeral tiene por objeto, presentar una simulación del circuito básico de los 4 piezoeléctricos conectados a una resistencia que emula la equivalencia de la carga y puentes rectificadores dependiendo de la configuración.

Se parte entonces del modelo eléctrico que se planteó inicialmente del material piezoeléctrico, y a partir de allí se conectan 4 piezoeléctricos; primero en serie y luego en paralelo.

Cabe anotar que para estas simulaciones la carga se reparte entre los 4 piezoeléctricos, es decir, como la entrada de fuerza son 700N, esta se distribuye equitativamente, 175 N por piezoeléctrico.

Adicionalmente, se halla una resistencia óptima para la carga en cada caso, es decir, aquella en la que se disipe mayor cantidad de potencia. Con esto, se asegura que se extrae del sistema la mayor cantidad de energía posible (al igual que lo hace el LTC3588).

El método para hallar dicha resistencia es basado en la simulación. Al circuito desarrollado anteriormente se le hizo una variación paulatina de la resistencia de carga, y se midió el voltaje cada que se hacía un cambio en la resistencia. Esto con el fin de determinar la potencia cuando se realizaba un cambio y por ende, determinar la mejor resistencia para el sistema en cuanto a eficiencia energética.

La idea entonces es simular una respuesta equivalente a la que generaría el circuito integrado LTC3588, primero rectificando la señal y luego igualando las impedancias de entrada y salida para transferir así la mayor cantidad de energía posible desde el piezoeléctrico hacia la carga. Lo anterior está basado en el teorema de la máxima transferencia de potencia.

10.2.1 Materiales piezoeléctricos en conexión serie

Inicialmente, se conectan los piezoeléctricos en serie como se muestra en la Figura 35.

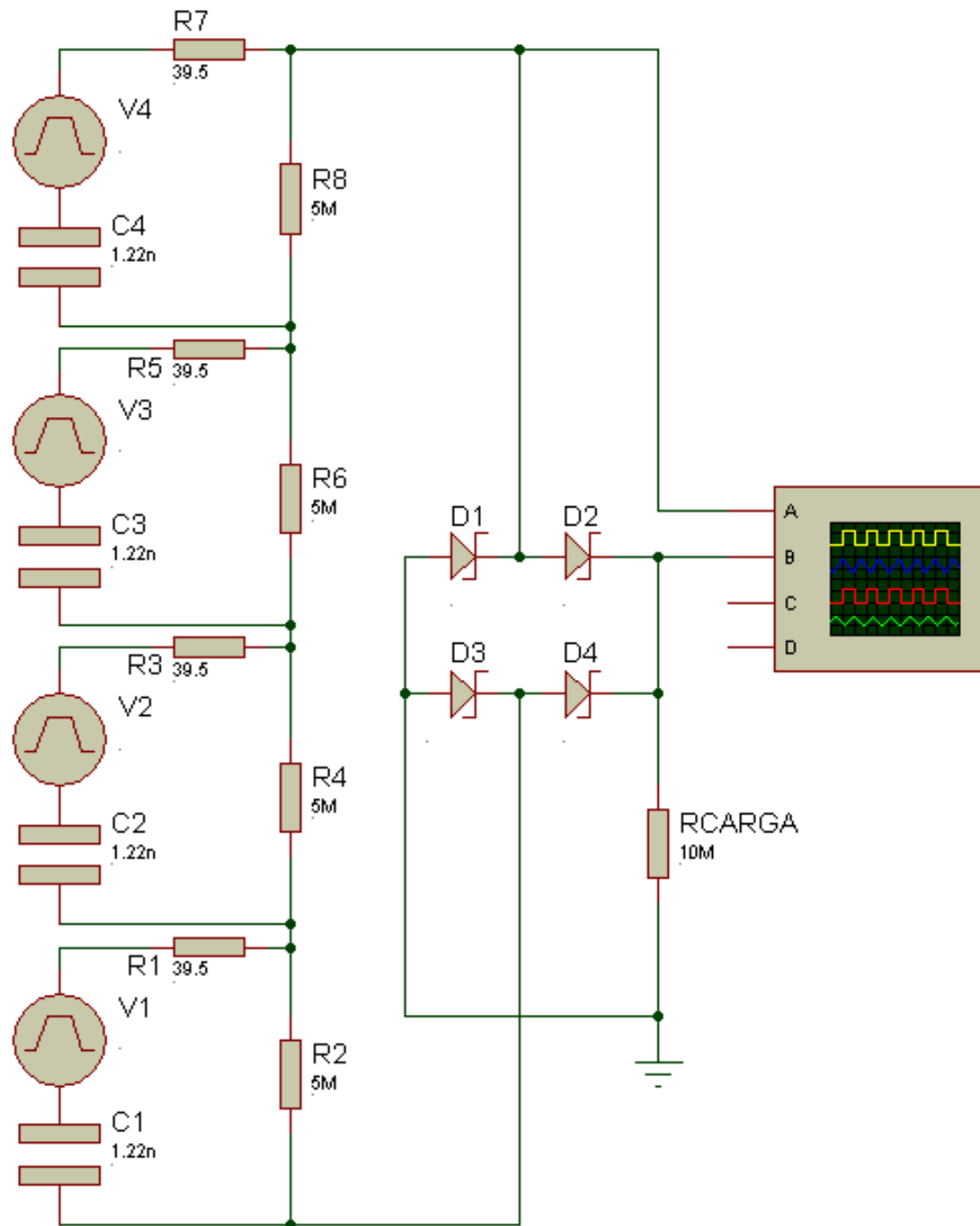


Figura 35. Circuito de los 4 piezoeléctricos conectados en serie con un puente rectificador y resistencia de carga.

A partir de la conexión serie, se evalúan dos casos diferentes que son:

- **Materiales piezoeléctricos conectados en serie y con la aplicación de la fuerza en el mismo instante de tiempo**

Este es el caso más favorable, ya que si se aplica la fuerza en el mismo instante de tiempo, todos los piezoeléctricos generarán el mismo voltaje y este se sumará para crear un voltaje mayor, y por ende una mayor potencia.

Conexión serie

Rcarga	Ω	1E+04	1E+05	1E+06	1E+07	1E+08	1E+09	1E+10
Vcarga	V	8,0E-03	7,8E-02	0,75	5,20	13,10	15,50	15,80
Vcarga^2	V^2	6,4E-05	6,1E-03	5,6E-01	2,7E+01	171,61	240,25	249,64
Tiempo del pulso	s	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01
# picos		2	2	2	2	2	2	2
Área bajo la curva	(V^2)s/ Ω	1,3E-09	1,2E-08	1,1E-07	5,4E-07	3,4E-07	4,8E-08	5,0E-09
Periodo	s	3,0E-01	3,0E-01	3,0E-01	3,0E-01	3,0E-01	3,0E-01	3,0E-01
Potencia promedio en la carga	W	4,3E-09	4,1E-08	3,8E-07	1,8E-06	1,1E-06	1,6E-07	1,7E-08

Tabla 13. Comparación entre diferentes resistencias de carga y sus respectivas potencias para el caso serie más favorable.

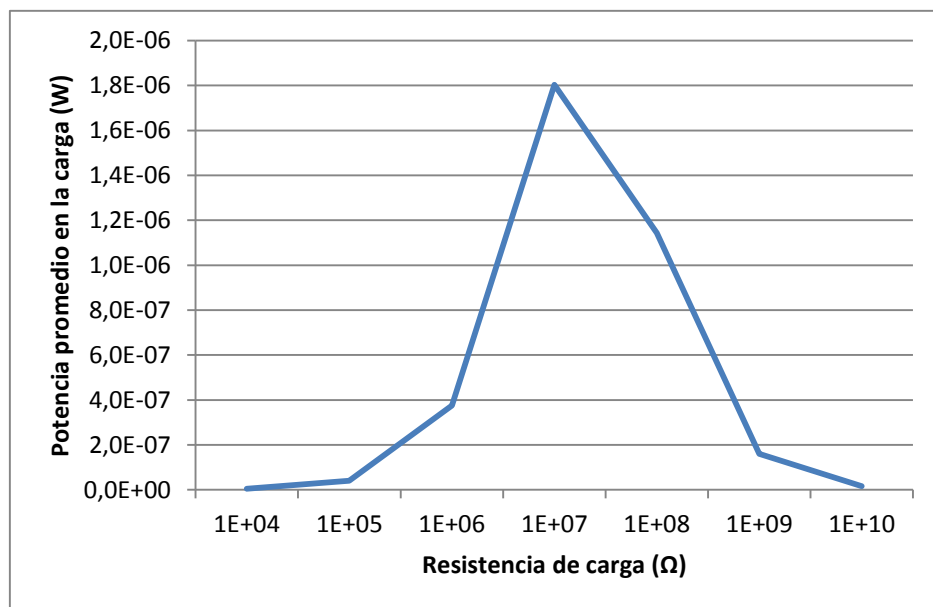


Figura 36. Gráfico de la potencia en la carga Vs. Resistencia en la carga para el caso serie más favorable.

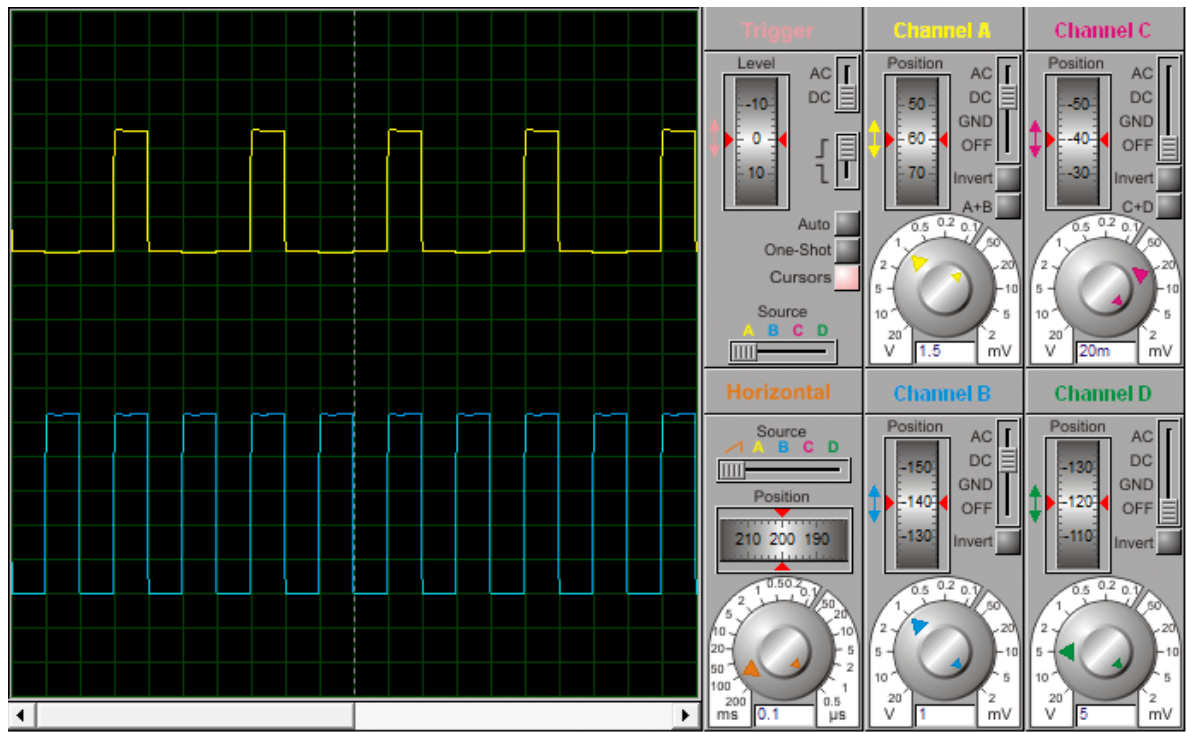


Figura 37. Respuesta en voltaje del circuito en serie con la fuerza aplicada en el mismo instante (caso más favorable) y la resistencia óptima.

La Figura 37, muestra el voltaje en la carga del circuito serie con la resistencia óptima. Para este caso, el voltaje pico es de +5.2V, y con el cual se genera una potencia de unos 1.8μW.

○ **Materiales piezoeléctricos conectados en serie y con la aplicación de la fuerza en diferentes instantes de tiempo**

Se simula ahora un caso más desfavorable y también más aproximado a la realidad. Este consiste en que la fuerza se aplica a cada piezoeléctrico en instantes diferentes. En el momento en que un peatón pisa la baldosa, la fuerza se demora instantes en llegar a uno y a otro piezoeléctrico. Se simula entonces una diferencia de aplicación de la fuerza de 0.02 segundos entre los piezoeléctricos. Es decir, se supone que la fuerza se aplica en una de las esquinas de la baldosa (por ejemplo en la inferior izquierda) en el instante de tiempo 0, por lo tanto, a los 0.02 segundos la fuerza estaría llegando a las esquinas superior izquierda e inferior derecha. Por último, a los 0.04 segundos la fuerza llegaría a la esquina superior derecha.

El resultado es el siguiente:

Rcarga	Ω	1E+04	1E+05	1E+06	1E+07	1E+08	1E+09	1E+10
Vcarga (1)	V	1,1E-03	9,5E-03	0,06	0,30	0,80	0,90	0,90
Vcarga (2)	V	5,7E-03	5,4E-02	0,51	3,60	8,90	10,30	10,30
Vcarga (3)	V	8,0E-03	7,8E-02	0,75	5,22	13,10	15,50	15,50
Tiempo (1)	s	1,4E-01	1,4E-01	1,4E-01	1,4E-01	1,4E-01	1,4E-01	1,4E-01
Tiempo (2)	s	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01
Tiempo (3)	s	6,0E-02	6,0E-02	6,0E-02	6,0E-02	6,0E-02	6,0E-02	6,0E-02
# picos		2	2	2	2	2	2	2
Área bajo la curva	$(V^2)s/\Omega$	5E-10	5E-09	5E-08	3E-07	2E-07	2E-08	2E-09
Periodo	s	3,0E-01	3,0E-01	3,0E-01	3,0E-01	3,0E-01	3,0E-01	3,0E-01
Potencia promedio en la carga	W	1,7E-09	1,6E-08	1,6E-07	8,4E-07	5,1E-07	7,0E-08	7,0E-09

Tabla 14. Comparación entre diferentes resistencias de carga y sus respectivas potencias para un caso serie menos favorable.

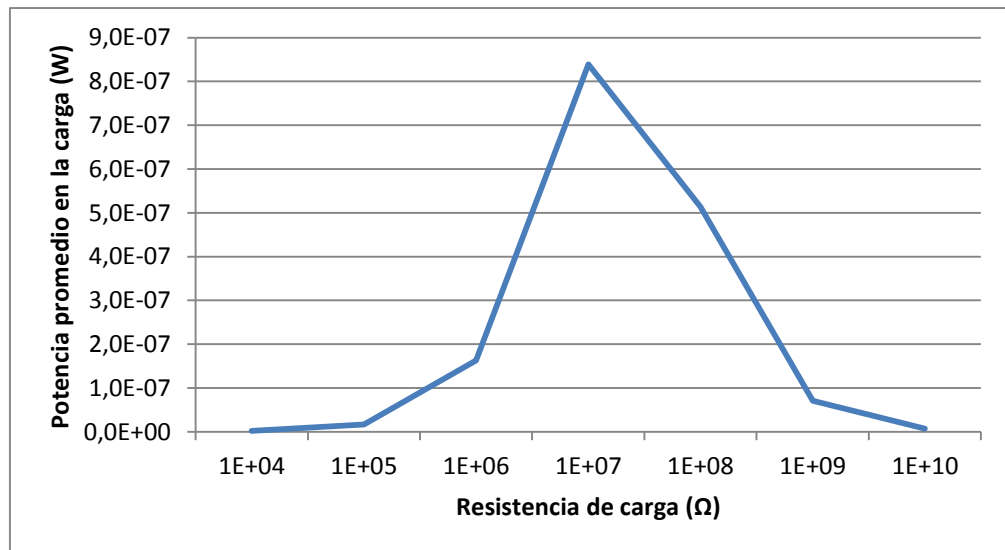


Figura 38. Gráfico de la potencia en la carga Vs. Resistencia en la carga para un caso serie menos favorable.

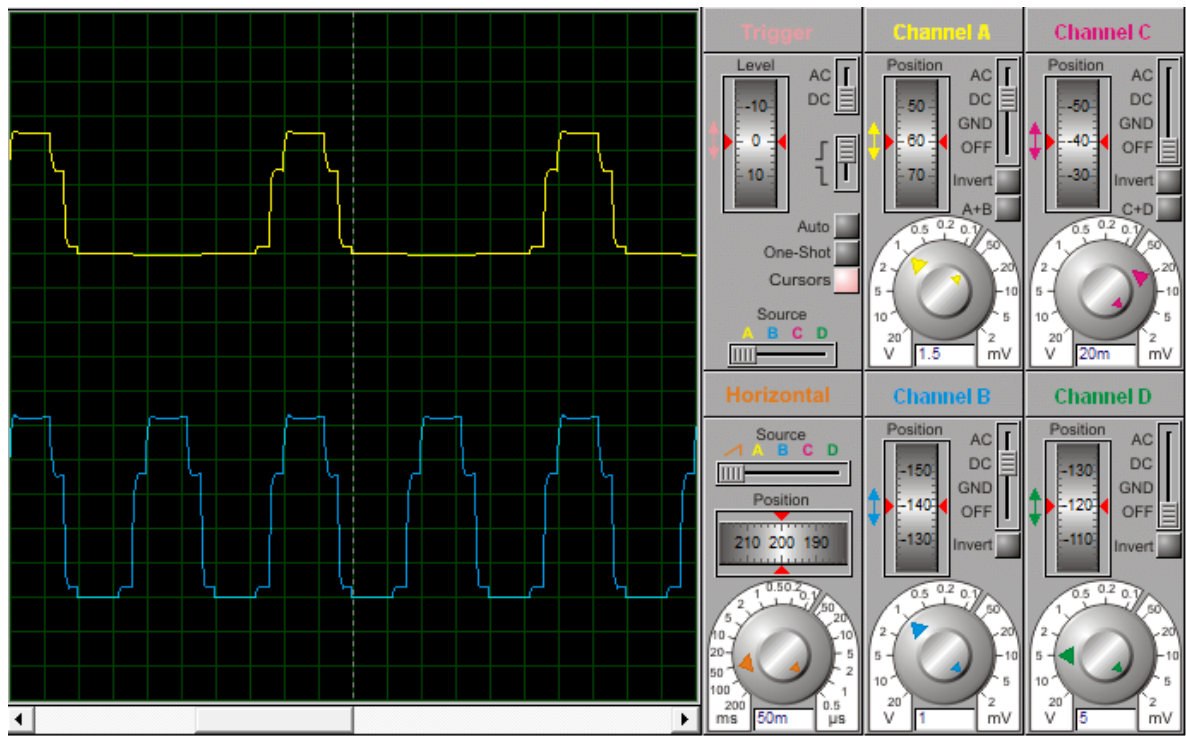


Figura 39. Respuesta en voltaje del circuito en serie con la fuerza aplicada en momentos diferentes (caso menos favorable).

De la gráfica se puede observar porque este caso es más desfavorable que el anterior. Si bien el pico de voltaje en la carga es el mismo (aproximadamente +5.2V), este se encuentra por escalones, en el momento en que llega la fuerza a un piezoeléctrico el voltaje de este se suma para crear un voltaje mayor y en el momento en que la fuerza del piezoeléctrico se quita, este deja de aportar energía al sistema. Además se puede notar como ante una misma resistencia de carga se disipa una potencia menor con respecto al caso más favorable. En este caso la potencia es de $0.84\mu W$.

10.2.2 Materiales piezoeléctricos en conexión paralela

Se conectan ahora los 4 piezoeléctricos en paralelo para ver su respuesta ante la excitación.

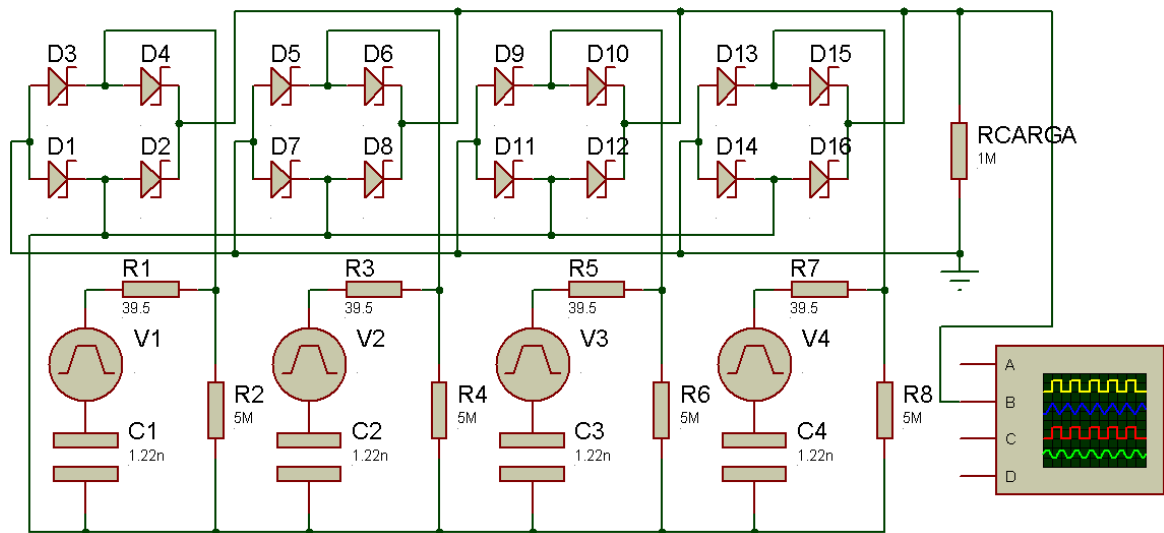


Figura 40. Circuito de los 4 piezoeléctricos conectados en paralelo con puentes rectificadores de diodos y una resistencia de carga.

- **Materiales piezoeléctricos conectados en paralelo y con la aplicación de la fuerza en el mismo instante de tiempo**

A continuación se muestra el resultado obtenido en este caso:

Conexión paralelo								
Rcarga	Ω	1E+04	1E+05	1E+06	1E+07	1E+08	1E+09	1E+10
Vcarga	V	3,1E-02	2,9E-01	1,72	3,50	3,90	3,90	3,90
Vcarga^2	V^2	9,3E-04	8,1E-02	3,0E+00	1,2E+01	15,21	15,21	15,21
Tiempo del pulso	s	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01
# picos		2	2	2	2	2	2	2
Área bajo la curva	(V^2)s/ Ω	1,9E-08	1,6E-07	5,9E-07	2,5E-07	3,0E-08	3,0E-09	3,0E-10
Periodo	s	3,0E-01	3,0E-01	3,0E-01	3,0E-01	3,0E-01	3,0E-01	3,0E-01
Potencia promedio en la carga	W	6,2E-08	5,4E-07	2,0E-06	8,2E-07	1,0E-07	1,0E-08	1,0E-09

Tabla 15. Comparación entre diferentes resistencias de carga y sus respectivas potencias para el caso paralelo más favorable.

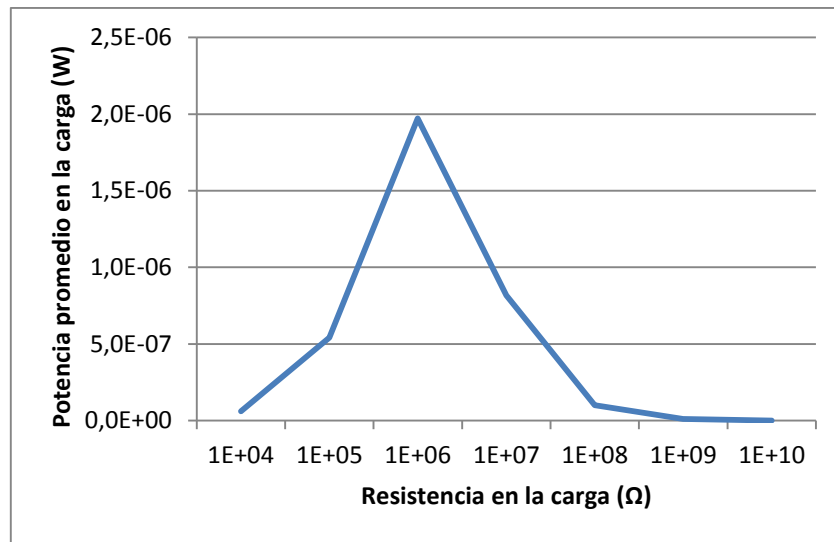


Figura 41. Gráfico de la potencia en la carga Vs. Resistencia en la carga para el caso paralelo más favorable.

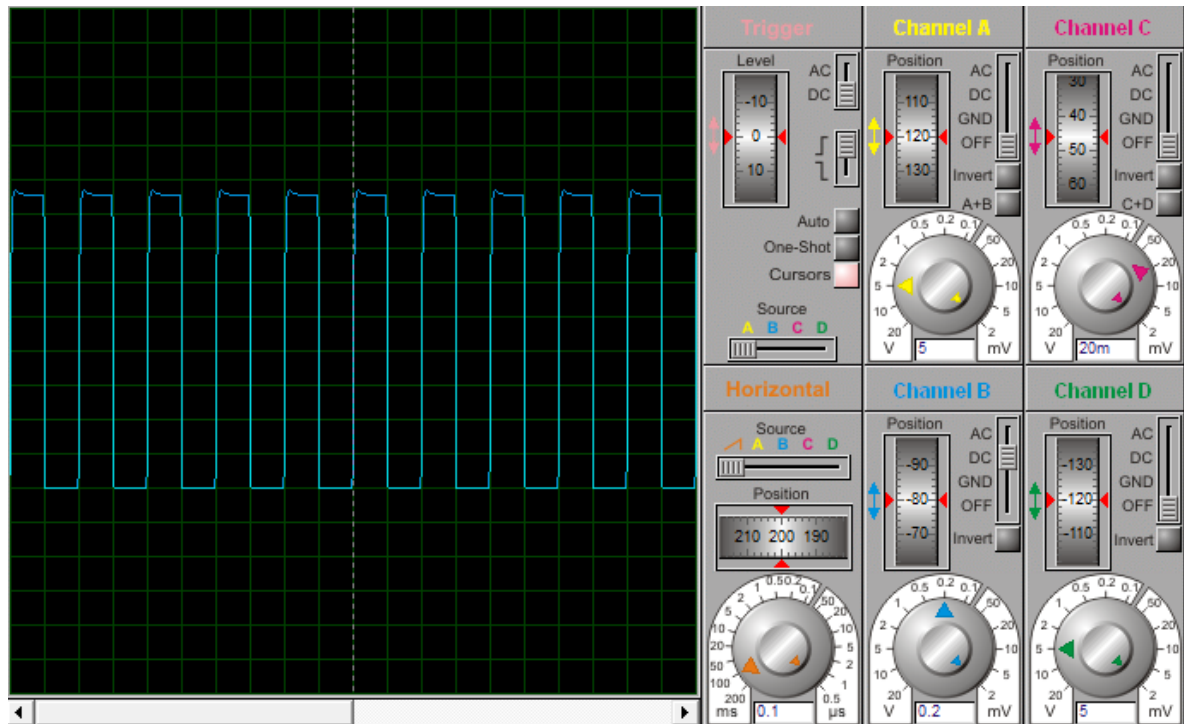


Figura 42. Respuesta en voltaje del circuito en paralelo con la fuerza aplicada en el mismo instante (caso más favorable).

En este caso se obtiene un voltaje de aproximadamente +1.72V pico, con una potencia de 2 μ W.

- **Materiales piezoeléctricos conectados en paralelo y con la aplicación de la fuerza en diferente instante de tiempo**

Se utiliza el mismo método que el aplicado en la conexión serie, es decir, se usa una diferencia de 0.02 segundos en la aplicación de la fuerza.

Conexión paralelo

Rcarga	Ω	1E+04	1E+05	1E+06	1E+07	1E+08	1E+09	1E+10
Vcarga (1)	V	5,5E-03	3,5E-02	0,15	0,60	0,75	0,80	0,80
Vcarga (2)	V	2,2E-02	2,0E-01	1,35	3,05	3,50	3,55	3,55
Vcarga (3)	V	3,1E-02	2,4E-01	1,71	3,48	3,90	3,90	3,90
Tiempo (1)	s	1,4E-01	1,4E-01	1,4E-01	1,4E-01	1,4E-01	1,4E-01	1,4E-01
Tiempo (2)	s	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01
Tiempo (3)	s	6,0E-02	6,0E-02	6,0E-02	6,0E-02	6,0E-02	6,0E-02	6,0E-02
# picos		2	2	2	2	2	2	2
Área bajo la curva	$(V^2)s/\Omega$	7E-09	6E-08	3E-07	1E-07	2E-08	2E-09	2E-10
Periodo	s	3,0E-01	3,0E-01	3,0E-01	3,0E-01	3,0E-01	3,0E-01	3,0E-01
Potencia promedio en la carga	W	2,4E-08	1,9E-07	1,0E-06	4,4E-07	5,6E-08	5,7E-09	5,7E-10

Tabla 16. Comparación entre diferentes resistencias de carga y sus respectivas potencias para un caso paralelo más desfavorable.

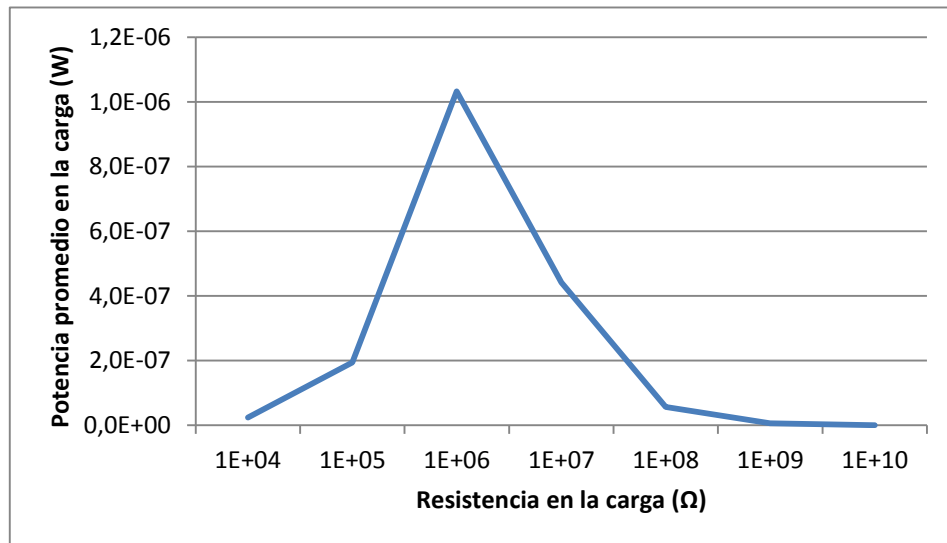


Figura 43. Figura 44. Gráfico de la potencia en la carga Vs. Resistencia en la carga para un caso paralelo desfavorable.

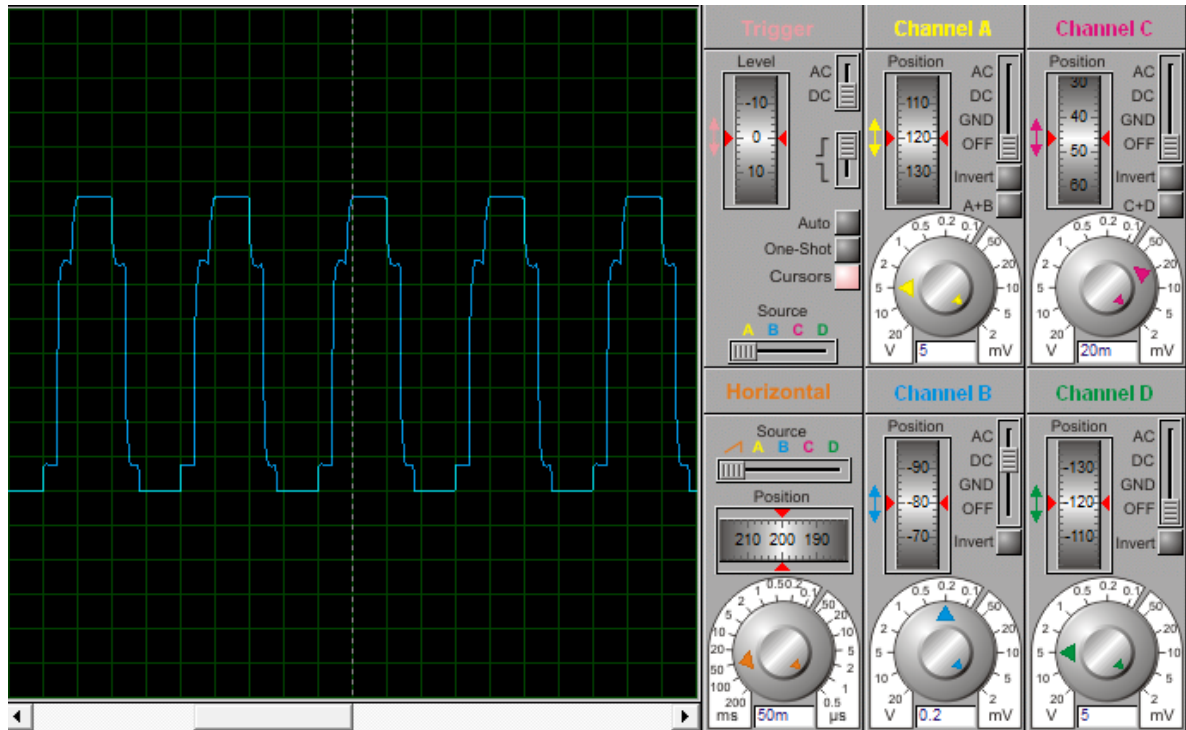


Figura 45. Respuesta en voltaje del circuito en paralelo con la fuerza aplicada en momentos diferentes (caso más desfavorable).

El resultado vuelve a ser como el que se halló en el caso serie. Se encuentran picos de voltaje de +1.71V pero distribuidos en escalones lo cual no es tan bueno para la carga como en el caso ideal. Se vuelve a encontrar además, que cuando las fuerzas se aplican en momentos diferentes, la potencia en la carga es menor, por lo tanto el sistema es menos eficiente que si se le aplican las fuerzas en el mismo instante de tiempo.

10.2.3 Conclusión resistencia óptima de carga

Mediante el ejercicio anterior se halla que una buena resistencia para el circuito serie y paralelo en cuanto a eficiencia energética es:

$$R_{carga(serie)} = 10M\Omega ; \quad R_{carga(paralelo)} = 1M\Omega$$

10.3 Respuesta del circuito ante la entrada del paso de una persona (ideal)

El siguiente paso consiste en simular la respuesta del sistema cuando se introduce una fuerza equivalente al paso de un peatón, como la que se muestra en el capítulo 6. Se dice que es ideal, porque para este numeral se supone que la fuerza en los 4 piezoeléctricos se ejerce exactamente en el mismo instante de tiempo, algo que no se puede asegurar en el sistema ya desarrollado hasta ahora.

A partir de este punto, se empieza a trabajar únicamente con el circuito en paralelo que fue el que se eligió para el sistema.

Lo primero que se hace es elaborar la función que emula la fuerza de un paso en un piezoeléctrico, esto se hace de forma manual, poniendo puntos en el plano cartesiano para formar la gráfica.

% Ciclo	%Fuerza	Fuerza (N)	Tiempo (s)	Voltaje gen. (V)	% Ciclo	%Fuerza	Fuerza (N)	Tiempo (s)	Voltaje gen. (V)
0	0,0%	0	0,000	0,0	31	92,0%	161	0,155	74,6
1	30,0%	52,5	0,005	24,3	32	94,0%	164,5	0,160	76,2
2	50,0%	87,5	0,010	40,5	33	96,0%	168	0,165	77,8
3	60,0%	105	0,015	48,6	34	98,0%	171,5	0,170	79,4
4	73,0%	127,75	0,020	59,2	35	100,0%	175	0,175	81,1
5	82,0%	143,5	0,025	66,5	36	103,0%	180,25	0,180	83,5
6	88,0%	154	0,030	71,3	37	106,0%	185,5	0,185	85,9
7	94,0%	164,5	0,035	76,2	38	108,5%	189,875	0,190	88,0
8	98,0%	171,5	0,040	79,4	39	111,0%	194,25	0,195	90,0
9	101,5%	177,625	0,045	82,3	40	113,0%	197,75	0,200	91,6
10	103,0%	180,25	0,050	83,5	41	115,0%	201,25	0,205	93,2
11	103,5%	181,125	0,055	83,9	42	117,0%	204,75	0,210	94,8
12	103,5%	181,125	0,060	83,9	43	118,0%	206,5	0,215	95,7
13	103,0%	180,25	0,065	83,5	44	119,0%	208,25	0,220	96,5
14	102,0%	178,5	0,070	82,7	45	119,0%	208,25	0,225	96,5
15	100,8%	176,4	0,075	81,7	46	119,0%	208,25	0,230	96,5
16	99,0%	173,25	0,080	80,2	47	118,0%	206,5	0,235	95,7
17	97,0%	169,75	0,085	78,6	48	116,0%	203	0,240	94,0
18	95,0%	166,25	0,090	77,0	49	113,0%	197,75	0,245	91,6
19	93,0%	162,75	0,095	75,4	50	107,0%	187,25	0,250	86,7
20	91,0%	159,25	0,100	73,8	51	95,0%	166,25	0,255	77,0
21	89,5%	156,625	0,105	72,5	52	85,0%	148,75	0,260	68,9
22	88,0%	154	0,110	71,3	53	70,0%	122,5	0,265	56,7
23	87,0%	152,25	0,115	70,5	54	55,0%	96,25	0,270	44,6
24	86,0%	150,5	0,120	69,7	55	40,0%	70	0,275	32,4
25	85,0%	148,75	0,125	68,9	56	30,0%	52,5	0,280	24,3
26	85,0%	148,75	0,130	68,9	57	20,0%	35	0,285	16,2
27	85,0%	148,75	0,135	68,9	58	10,0%	17,5	0,290	8,1
28	86,0%	150,5	0,140	69,7	59	5,0%	8,75	0,295	4,1
29	88,0%	154	0,145	71,3	60	0,0%	0	0,300	0,0
30	90,0%	157,5	0,150	73,0					

Tabla 17. Datos para formar la gráfica del voltaje generado por un piezoeléctrico cuando se le aplica la fuerza de un paso peatonal.

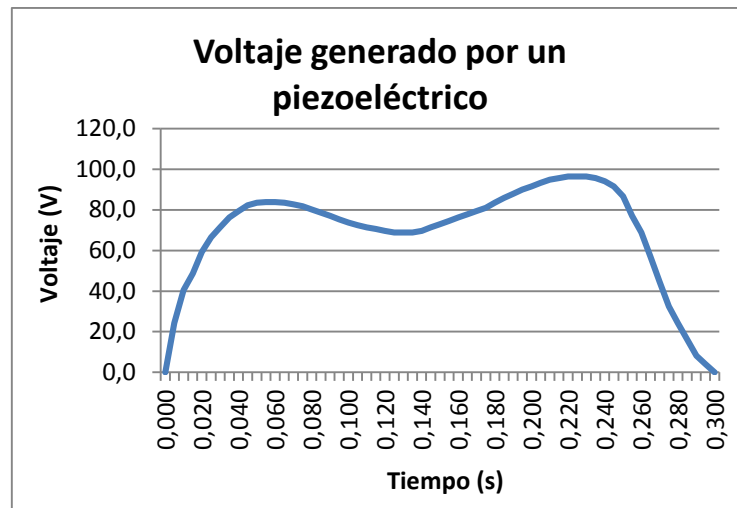


Figura 46. Voltaje generado por un piezoeléctrico cuando se le aplica la fuerza de un paso peatonal VS. Tiempo.

La gráfica anterior muestra el voltaje aproximado que generaría un solo piezoeléctrico en circuito abierto, cuando se comprime con una fuerza similar a la que se ejerce sobre el suelo cuando un peatón realiza un paso.

Al conectar los 4 piezoeléctricos, con una resistencia de carga de $1M\Omega$, y aplicarles la fuerza a todos en el mismo instante, se produce la siguiente respuesta en el sistema:

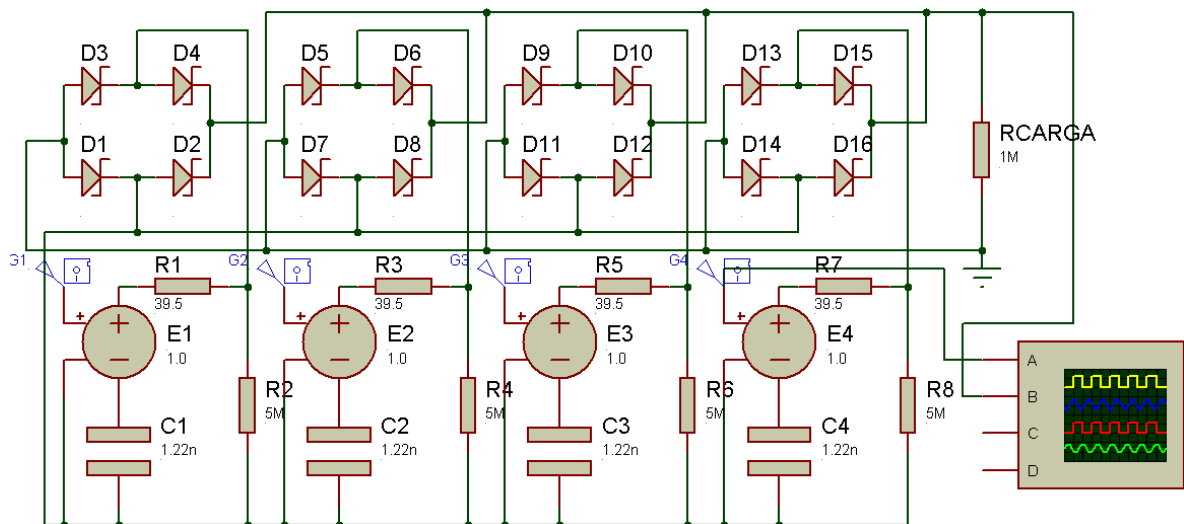


Figura 47. Circuito de 4 piezoeléctricos en paralelo conectados a la resistencia óptima hallada.

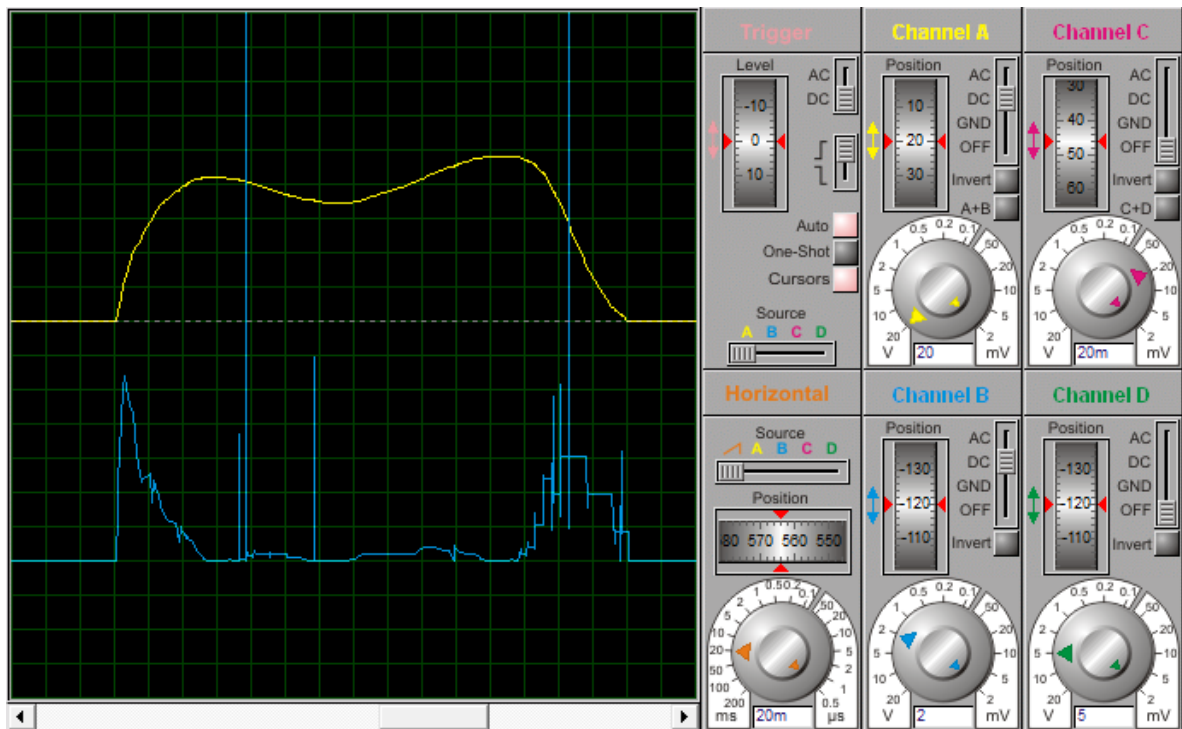


Figura 48. Voltaje de salida del sistema (Línea azul, Channel B).

La gráfica amarilla (Channel A) es el voltaje que produce uno de los piezoeléctricos debido a la fuerza de compresión aplicada en él. Por otro lado, la gráfica azul representa el voltaje de salida que se produce en la carga. Se puede decir que la respuesta se divide en 2 secciones donde se acumula la mayor cantidad de energía de los cuales se obtienen voltajes pico de +10.7V en la sección inicial y +6.1V en la final. Además se producen algunos picos de voltaje muy altos pero demasiado cortos. Los dos picos grandes que se salen de la pantalla son de +32V y +197V, y su duración es de aproximadamente 10 μ s y 30 μ s respectivamente.

10.4 Simulación mecánica y eléctrica de la respuesta del sistema ante la entrada del paso de una persona

A continuación se presenta la última simulación de este trabajo que consta de la parte eléctrica como se hizo hasta ahora, y de la parte mecánica con el programa Autodesk Multiphysics.

Se empieza con la simulación mecánica en Autodesk Multiphysics. Esta se hizo bajo las siguientes consideraciones:

- Lo primero que se debe aclarar es que para la siguiente simulación solo se utilizaron los 4 piezoeléctricos y la baldosa que está en la parte superior. La razón es que se desea saber cuál es la deformación de cada piezoeléctrico en el momento en que

se ejerce la fuerza sobre ellos, debido a esto, se toman los piezoeléctricos como la parte inferior del sistema (como si estuvieran anclados del suelo), con el fin de que sean una especie de sistema de referencia. Encima de ellos se pone la baldosa que es quien va a presionarlos. Por lo tanto, si los piezoeléctricos están anclados en la parte inferior y desde encima se les hace una presión, se puede observar la deformación que obtienen por compresión en el eje Z y así determinar el comportamiento del circuito eléctrico.

- La baldosa superior se toma como un elemento rígido (o por lo menos mucho más rígido que los piezoeléctricos). Esto con el fin de conocer con mayor claridad lo que realmente sucede con estos.
- Las características de los materiales piezoeléctricos fueron ingresadas según los datos dados por el fabricante como:
 - *Módulo Young* (33) = $5,2 * 10^{10} [Pa]$
 - *Módulo de cizalladura* = $19,25 * 10^{10} [Pa]$
 - *Coefficiente de Poisson* = 0,05
 - *Densidad* = $7600 \left[\frac{Kg}{cm^3} \right]$
 - *Coefficiente de expansión térmica* = $0,000004 \left[\frac{1}{^{\circ}C} \right]$
- Las mallas elegidas para la simulación fueron del 25% (fina) para la baldosa y del 70% (fina) para los piezoeléctricos.
- La fuerza de entrada se distribuyó en nodos que tienen la forma de un zapato, sin embargo, esta no se encuentra centrada en la baldosa.
- Se considera la fuerza en una sola dimensión, para la compresión de los elementos.

El modelo queda entonces así:

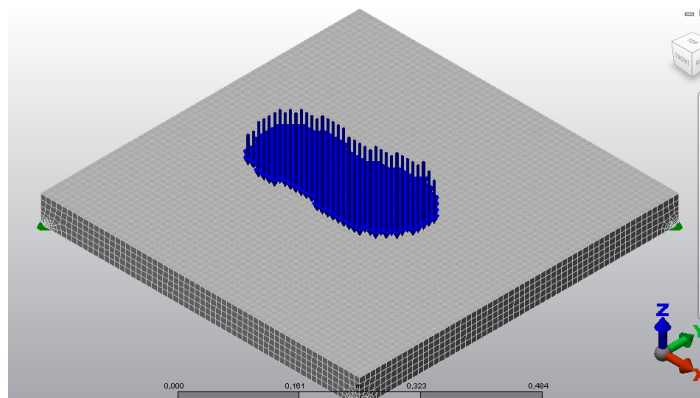


Figura 49. Modelo del sistema a simular. Vista isométrica.

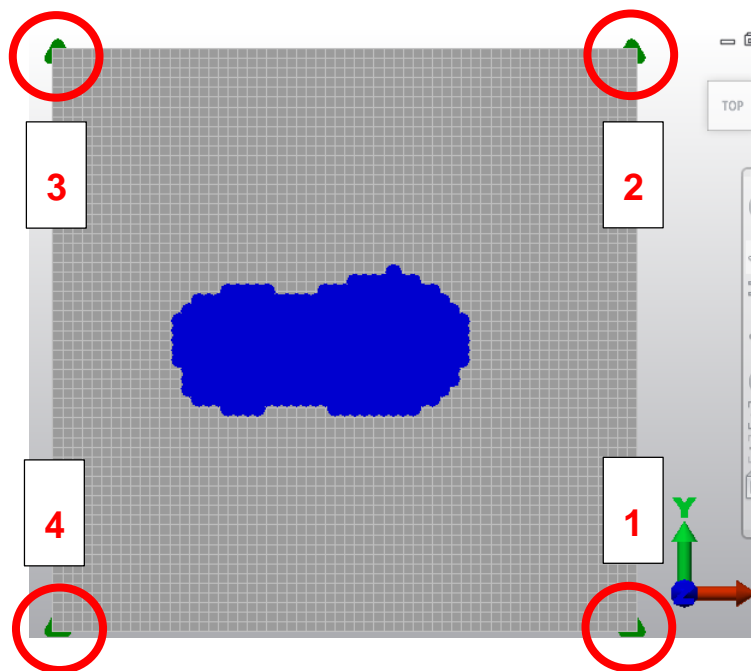


Figura 50. Modelo del sistema a simular, vista superior. Se marca cada piezoeléctrico para diferenciarlos posteriormente.

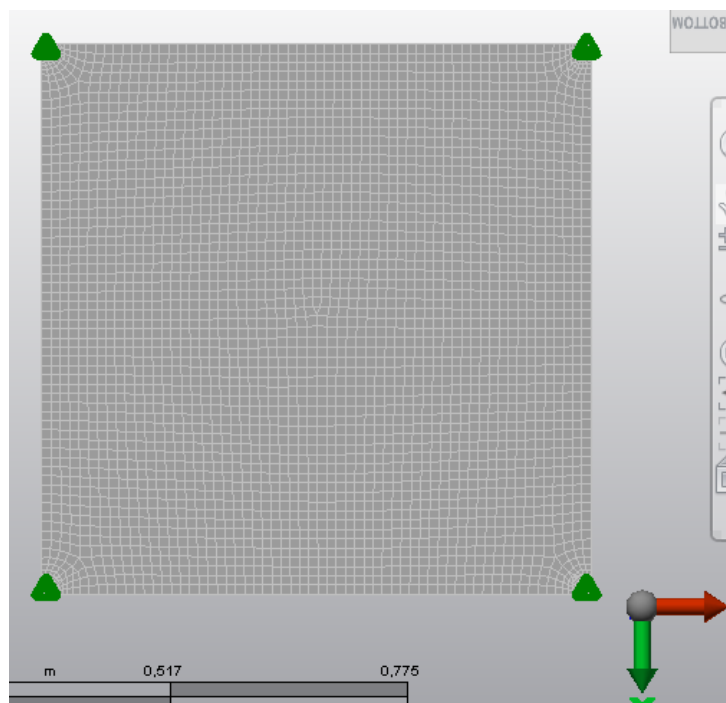


Figura 51. Modelo del sistema a simular. Vista inferior.

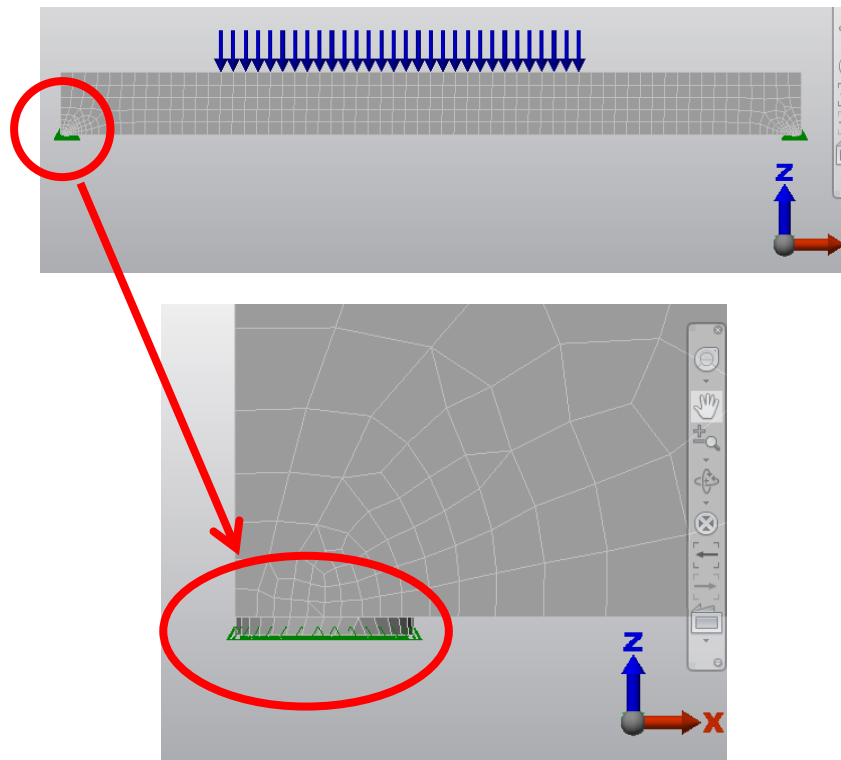


Figura 52. Modelo del sistema a simular. Vista lateral.

Una vez simulado, se pueden observar resultados como las presiones que se muestran a continuación. En esta ocasión se simula con una fuerza igual a 700N:

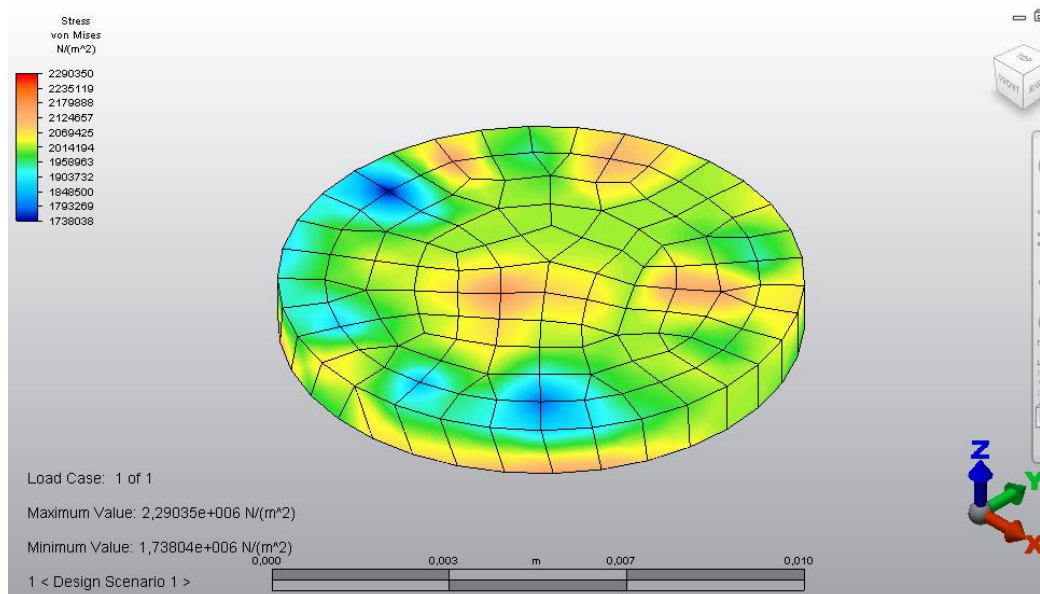


Figura 53. Esfuerzos generados sobre el piezoeléctrico #1 ante una carga de 700N. Vista isométrica.

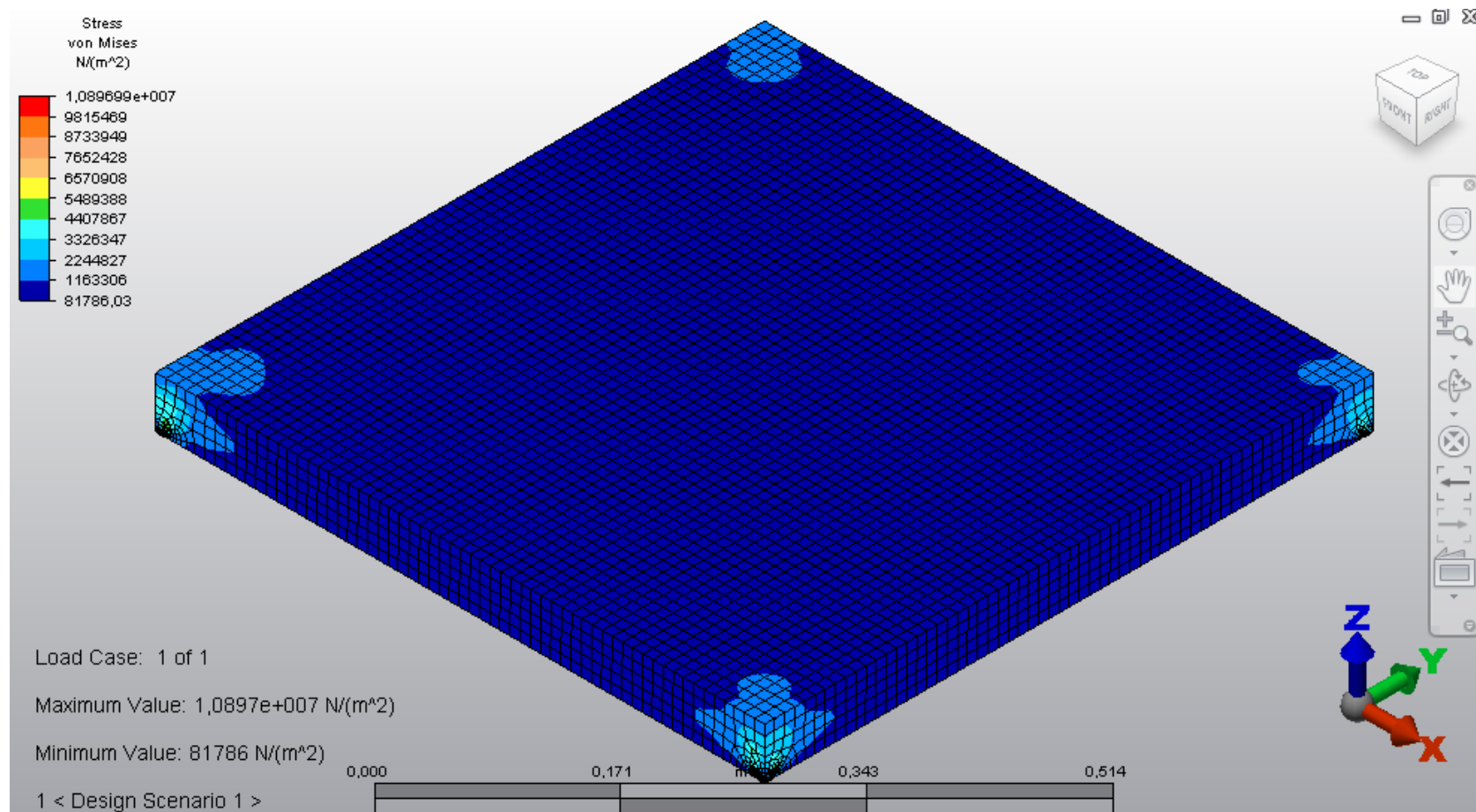


Figura 54. Esfuerzos generados sobre el sistema ante una carga de 700N. Vista isométrica.

Sin embargo, lo que interesa realmente es conocer la deformación que existe en cada piezoeléctrico para poder determinar cuál es la fuerza equivalente que se ejerce sobre cada uno. Esto se puede hacer usando la fórmula de la deformación bajo una carga axial (Budinas & Nisbett):

$$\delta = \frac{PL}{EA} \quad (20)$$

$$P = \frac{\delta EA}{L} \quad (21)$$

Dónde:

$$\delta = \text{deformación [m]} ; \quad P = \text{Fuerza [N]} ; \quad L = \text{Espesor [m]}$$

$$E = \text{Módulo Young} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] ; \quad A = \text{Área transversal [m}^2]$$

Todos los piezoeléctricos poseen las mismas características:

$$L = 0,001\text{m}$$

$$E = 5,2 * 10^{10}\text{Pa}$$

$$A = 7,85 * 10^{-5}\text{m}^2$$

PIEZOELÉCTRICO #1

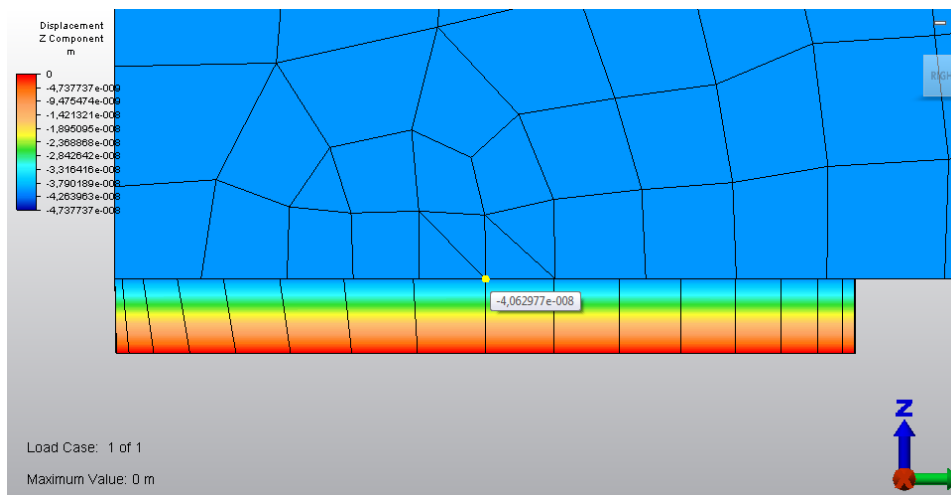


Figura 55. Deformación en el piezoeléctrico #1 bajo una carga de 700N. Vista lateral.

$$\delta = 4,06 * 10^{-8}\text{m}$$

Con lo cual se puede obtener que:

$$P = \frac{4,06 * 10^{-8}\text{m} * 5,2 * 10^{10}\text{Pa} * 7,85 * 10^{-5}\text{m}^2}{0,001\text{m}} = 165,8\text{N}$$

PIEZOELÉCTRICO #2

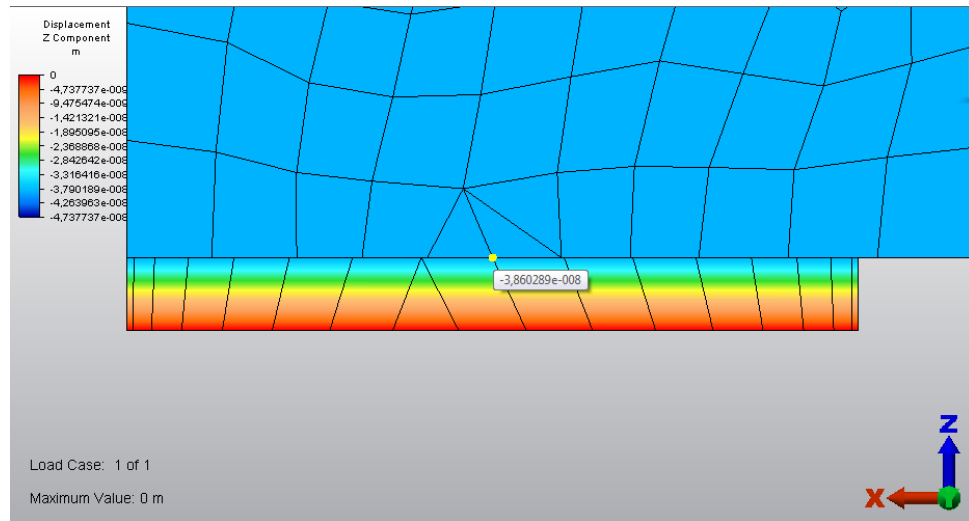


Figura 56. Deformación en el piezoeléctrico #2 bajo una carga de 700N. Vista lateral.

$$\delta = 3,86 * 10^{-8}m$$

Con lo cual se puede obtener que:

$$P = \frac{3,86 * 10^{-8}m * 5,2 * 10^{10}Pa * 7,85 * 10^{-5}m^2}{0,001m} = 155,43N$$

PIEZOELÉCTRICO #3

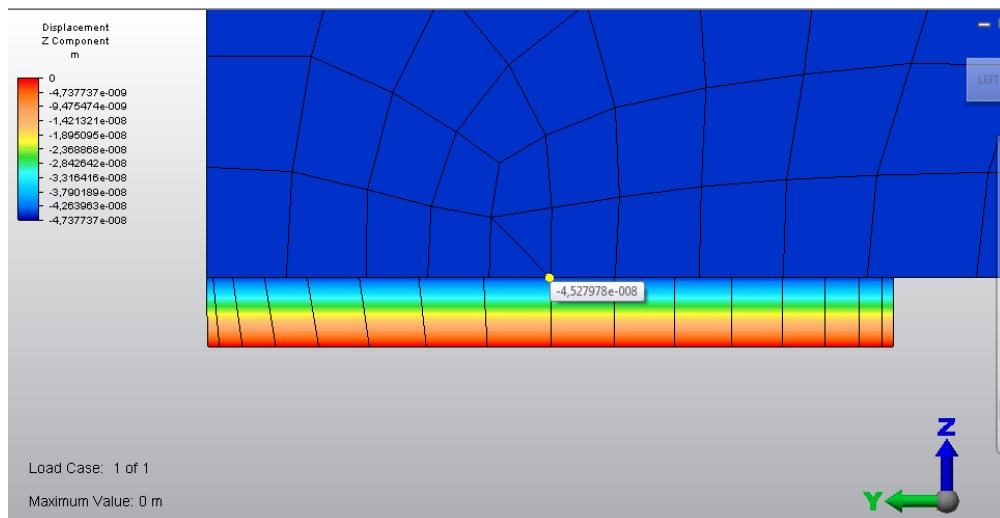


Figura 57. Deformación en el piezoeléctrico #3 bajo una carga de 700N. Vista lateral.

$$\delta = 4,5 * 10^{-8}m$$

Con lo cual se puede obtener que:

$$P = \frac{4,5 * 10^{-8}m * 5,2 * 10^{10}Pa * 7,85 * 10^{-5}m^2}{0,001m} = 184,6N$$

PIEZOELÉCTRICO #4

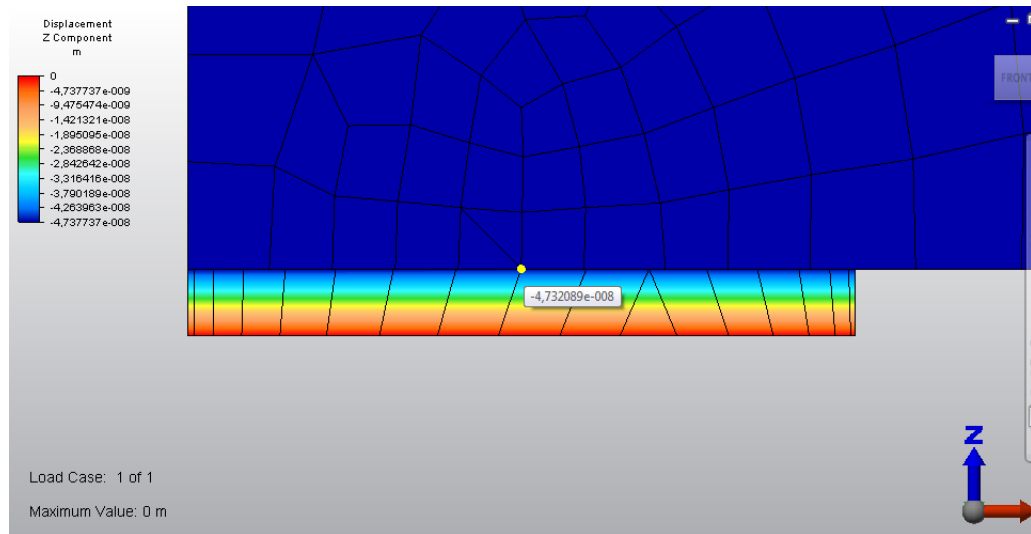


Figura 58. Deformación en el piezoeléctrico #4 bajo una carga de 700N. Vista lateral.

$$\delta = 4,73 * 10^{-8}m$$

Con lo cual se puede obtener que:

$$P = \frac{4,73 * 10^{-8}m * 5,2 * 10^{10}Pa * 7,85 * 10^{-5}m^2}{0,001m} = 193,17N$$

Lo anterior se repite múltiples veces, variando la fuerza introducida en el paso, para poder así hallar la fuerza que se aplica a cada piezoeléctrico. Con estos datos, se forma una gráfica para cada piezoeléctrico.

Sistema		Piezoeléctrico 1			Piezoeléctrico 2			Piezoeléctrico 3			Piezoeléctrico 4		
Tiempo (s)	Fuerza de entrada (N)	Deformación (m)	Fuerza equivalente (N)	Voltaje generado (V)	Deformación (m)	Fuerza equivalente (N)	Voltaje generado (V)	Deformación (m)	Fuerza equivalente (N)	Voltaje generado (V)	Deformación (m)	Fuerza equivalente (N)	Voltaje generado (V)
0	0	0,00E+00	0,00	0,00	0,00E+00	0,00	0,00	0,00E+00	0,00	0,00	0,00E+00	0,00	0,00
0,015	420	2,42E-08	98,83	45,78	2,33E-08	95,16	44,08	2,71E-08	110,68	51,27	2,82E-08	115,17	53,35
0,03	616	3,55E-08	144,98	67,16	3,38E-08	138,04	63,94	3,97E-08	162,14	75,10	4,14E-08	169,08	78,32
0,045	710	4,10E-08	167,45	77,56	3,90E-08	159,28	73,78	4,57E-08	186,64	86,45	4,77E-08	194,81	90,24
0,06	720	4,16E-08	169,90	78,70	3,95E-08	161,32	74,72	4,64E-08	189,50	87,78	4,85E-08	198,08	91,75
0,075	705	4,08E-08	166,63	77,18	3,88E-08	158,46	73,40	4,55E-08	185,83	86,07	4,75E-08	193,99	89,86
0,09	665	3,85E-08	157,24	72,83	3,65E-08	149,07	69,05	4,29E-08	175,21	81,16	4,48E-08	182,97	84,75
0,105	630	3,64E-08	148,66	68,86	3,46E-08	141,31	65,45	4,06E-08	165,81	76,80	4,25E-08	173,57	80,40
0,12	600	3,47E-08	141,72	65,64	3,29E-08	134,37	62,24	3,87E-08	158,05	73,21	4,05E-08	165,40	76,62
0,135	600	3,47E-08	141,72	65,64	3,29E-08	134,37	62,24	3,87E-08	158,05	73,21	4,05E-08	165,40	76,62
0,15	630	3,64E-08	148,66	68,86	3,46E-08	141,31	65,45	4,06E-08	165,81	76,80	4,25E-08	173,57	80,40
0,165	665	3,85E-08	157,24	72,83	3,65E-08	149,07	69,05	4,29E-08	175,21	81,16	4,48E-08	182,97	84,75
0,18	720	4,16E-08	169,90	78,70	3,95E-08	161,32	74,72	4,64E-08	189,50	87,78	4,85E-08	198,08	91,75
0,195	777	4,50E-08	183,78	85,13	4,27E-08	174,39	80,78	5,01E-08	204,61	94,78	5,23E-08	213,60	98,94
0,21	814	4,71E-08	192,36	89,10	4,48E-08	182,97	84,75	5,25E-08	214,41	99,32	5,50E-08	224,62	104,05
0,225	833	4,82E-08	196,85	91,18	4,58E-08	187,05	86,64	5,38E-08	219,72	101,78	5,62E-08	229,52	106,32
0,24	814	4,71E-08	192,36	89,10	4,48E-08	182,97	84,75	5,25E-08	214,41	99,32	5,50E-08	224,62	104,05
0,255	665	3,85E-08	157,24	72,83	3,65E-08	149,07	69,05	4,29E-08	175,21	81,16	4,48E-08	182,97	84,75
0,27	385	2,23E-08	91,07	42,19	2,12E-08	86,58	40,10	2,49E-08	101,69	47,10	2,59E-08	105,78	49,00
0,285	140	8,12E-09	33,16	15,36	7,71E-09	31,49	14,59	9,04E-09	36,92	17,10	9,46E-09	38,64	17,90
0,3	0	0,00E+00	0,00	0,00	0,00E+00	0,00	0,00	0,00E+00	0,00	0,00	0,00E+00	0,00	0,00

Tabla 18. Valores de la fuerza y voltaje de salida para los 4 piezoeléctricos.

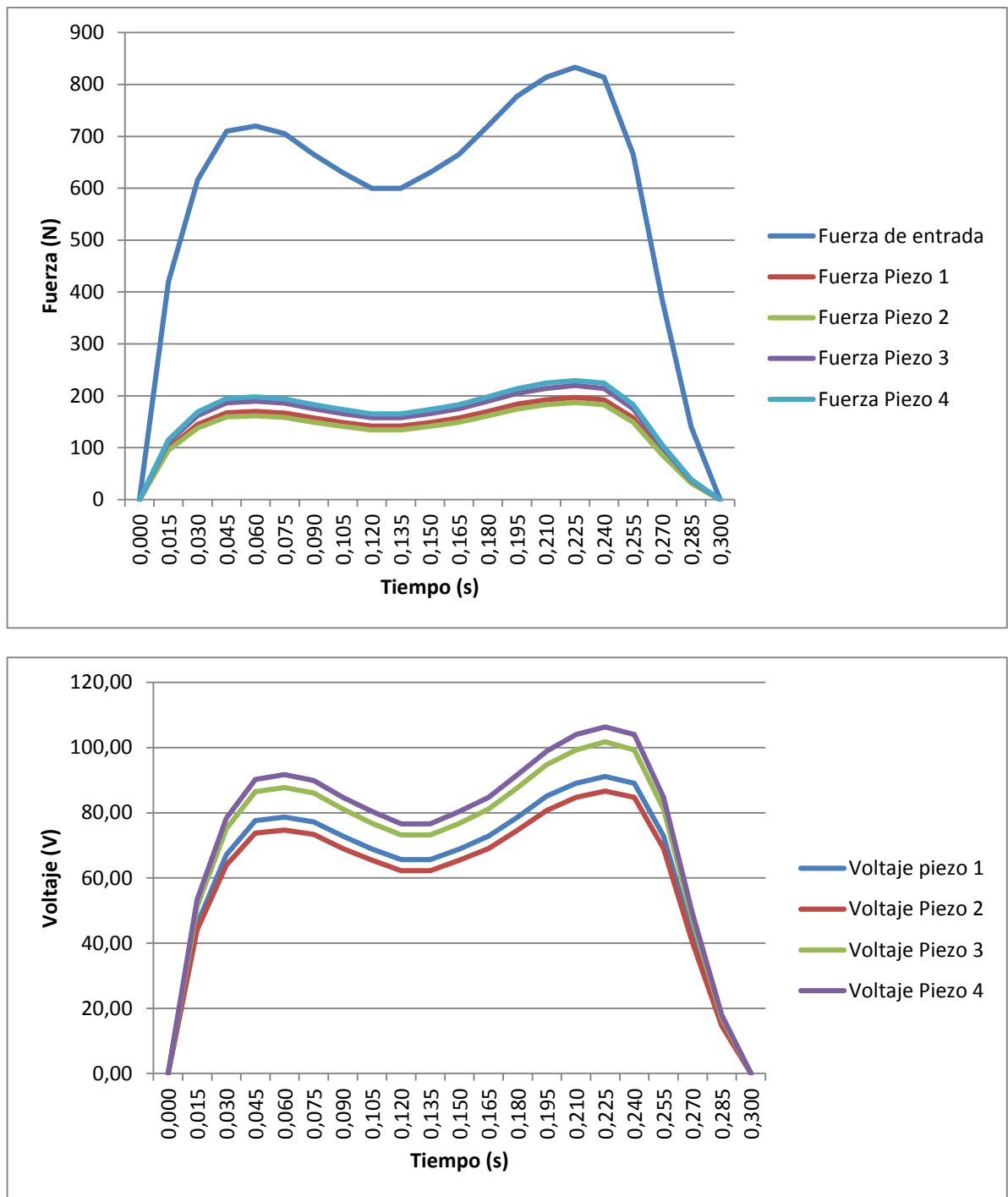


Figura 59. Gráfica de la fuerza en cada piezoelectrónico Vs Tiempo (superior). Gráfica de voltaje en cada piezoelectrónico Vs Tiempo (inferior).

Teniendo ahora los voltajes que genera cada piezoelectrónico en open circuit, se puede simular el circuito para observar la respuesta del mismo.

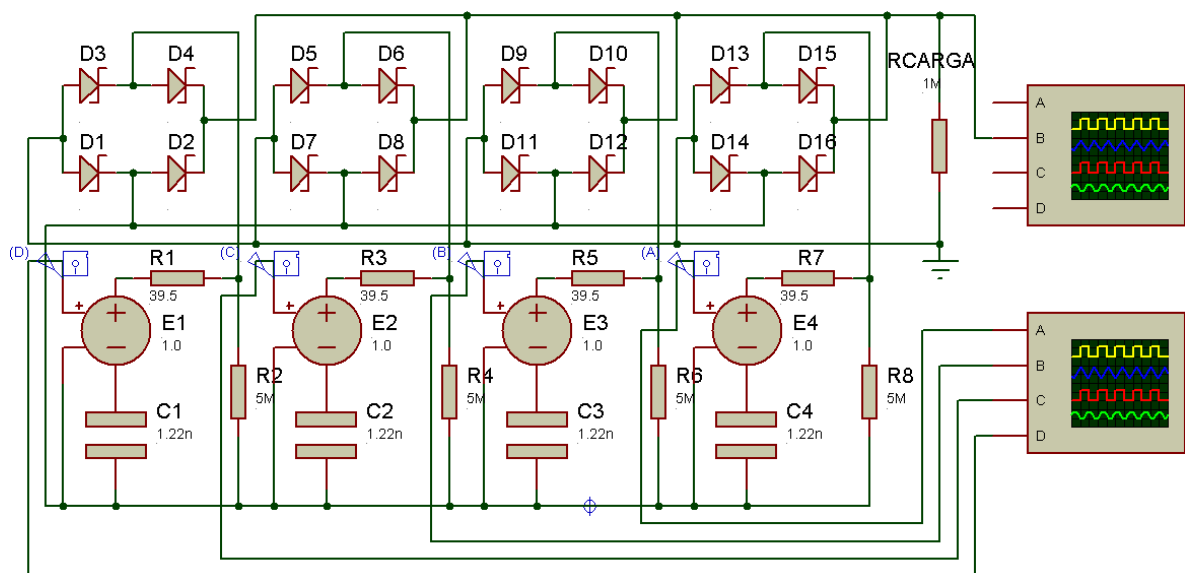


Figura 60. Circuito final, 4 piezoelectricos en paralelo, con puentes rectificadores y resistencia óptima de carga.

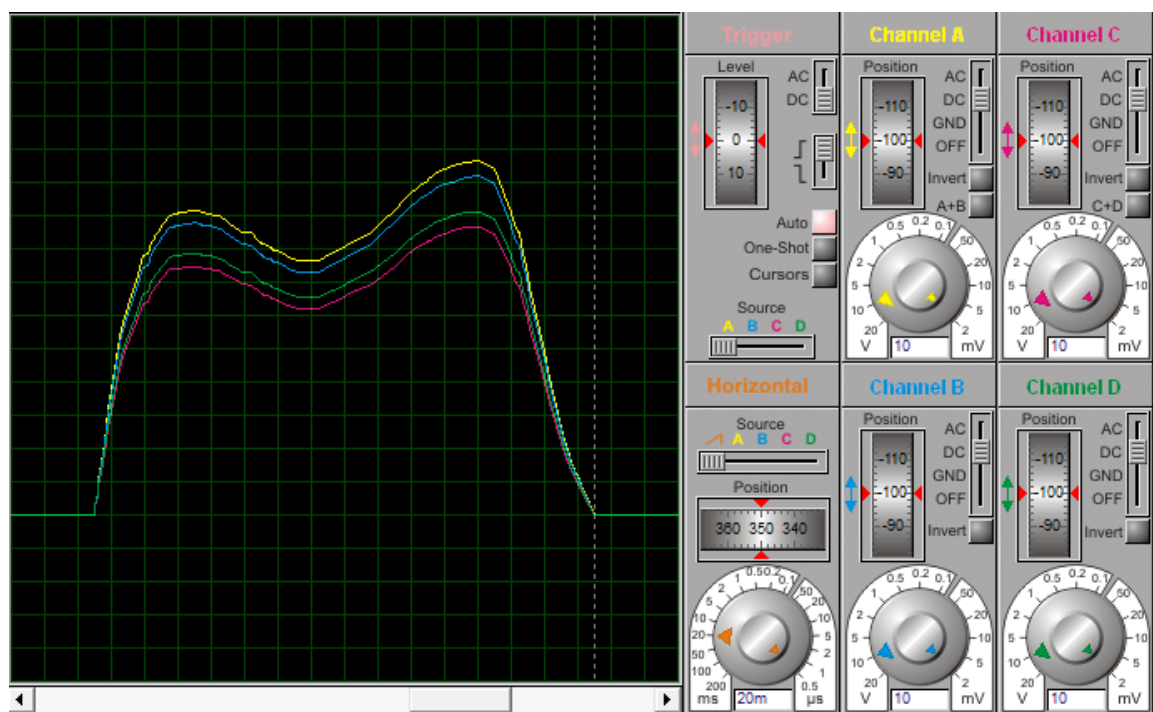


Figura 61. Voltaje generado por cada piezoelectrico en open circuit ante la fuerza del paso peatonal modelado.

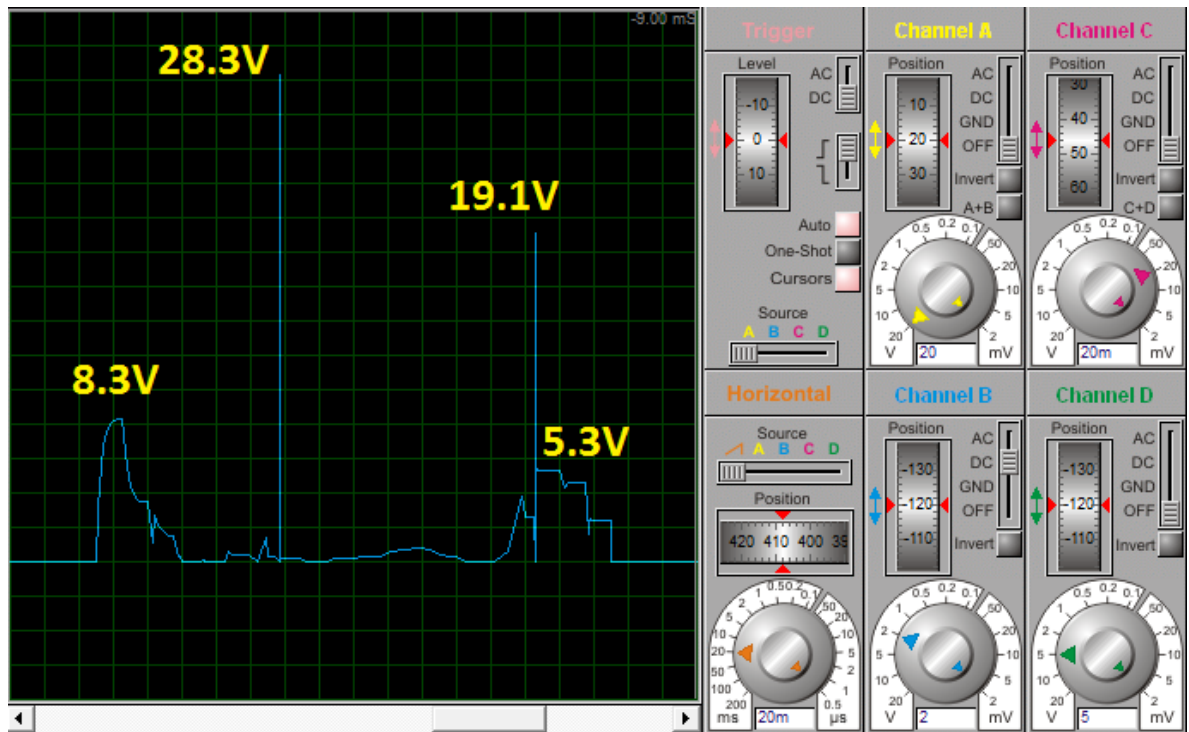


Figura 62. Respuesta eléctrica del sistema (voltaje de salida en la carga) ante la entrada de un paso peatonal.

Usando la respuesta en voltaje del sistema y la resistencia de carga, se puede hallar la potencia disipada, y por ende, la energía que entrega el sistema. La gráfica se partió en 7 tramos.

		Tramo							TOTAL
		1	2	3	4	5	6	7	
Vpico	V	8,3	28,3	2,7	19,1	5,3	4,6	2,4	
Vpico^2	V^2	68,89	800,89	7,29	364,81	28,09	21,16	5,76	
R	ohm	1,00E+06	1,00E+06	1,00E+06	1,00E+06	1,00E+06	1,00E+06	1,00E+06	
Vpico^2/R	V^2/ohm	6,89E-05	8,01E-04	7,29E-06	3,65E-04	2,81E-05	2,12E-05	5,76E-06	
Tiempo tramo	s	0,05	0,00003	0,015	0,0006	0,016	0,014	0,0135	
Rectangular (1), Triangular (2)		2	2	1	2	1	1	1	
Área bajo la curva (Energía)	Ws, J	1,72E-06	1,20E-08	1,09E-07	1,09E-07	4,49E-07	2,96E-07	7,78E-08	2,78E-06
Potencia	W	5,74E-06	4,00E-08	3,65E-07	3,65E-07	1,50E-06	9,87E-07	2,59E-07	9,25E-06
Energía	Wh	4,78E-10	3,34E-12	3,04E-11	3,04E-11	1,25E-10	8,23E-11	2,16E-11	7,71E-10

Tabla 19. Potencia y energía entregadas por el circuito.

Entonces, eléctricamente se tiene que por cada paso sobre la baldosa se obtiene:

$$Potencia_{eléctrica} = 9.25\mu W$$

$$Energía_{eléctrica} = 2.78\mu J = 2.78\mu Ws = 0.771nWh$$

Mecánicamente, se puede obtener la energía de compresión que ingresa al sistema cuando se da un paso sobre la baldosa, usando las gráficas de deformación vs fuerza de los piezoeléctricos y hallando el área bajo la curva.

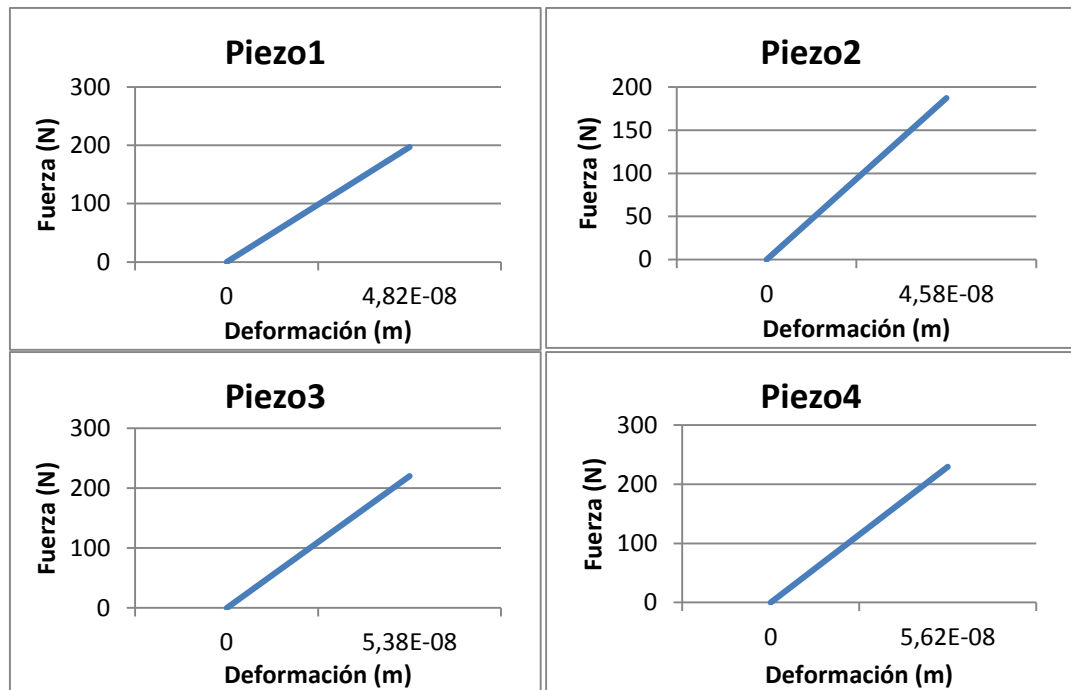


Figura 63. Gráfica Fuerza Vs. Deformación de cada piezoeléctrico.

Se halla entonces el área bajo la curva para cada piezoeléctrico y se suman para obtener la energía mecánica total debida a la compresión:

$$Energía_{mecánica} = 21.4\mu J = 5.944 * 10^{-12} KWh$$

Por último, se puede decir entonces que la eficiencia del sistema es:

$$Eficiencia \cong 13\%$$

Es decir, que del total de energía mecánica que ingresa al sistema cuando se da un paso sobre la baldosa, aproximadamente el 13% de esta se convierte en energía eléctrica que es almacenada en la batería.

11. DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

Del presente trabajo se desprenden las siguientes conclusiones generales, que sirven enormemente como punto de partida para quien desea diseñar o construir un generador de energía eléctrica a partir de materiales piezoeléctricos.

- Antes de diseñar un dispositivo que utilice materiales piezoeléctricos, es necesario estudiar y comprender la convención de signos y ejes que se utiliza para estos materiales. Esto es así ya que dependiendo de la fuerza que se ejerza en él, y la dirección de la misma (o en el caso contrario la polaridad con que se aplique un voltaje en el), el resultado será diferente. Muchas constantes de los piezoeléctricos vienen acompañados de dos coeficientes que determinan en qué casos deben ser usados. Por lo tanto, para una fuerza aplicada en cierta dirección, se debe saber cuáles son los coeficientes que se deben usar. Si se cambia la dirección de la fuerza, la generación de energía eléctrica será diferente.
- El voltaje que genera un material piezoeléctrico, depende directamente de sus características físicas. Cada material posee un sin número de especificaciones, de las cuales unas son importantes para algunas aplicaciones, otras pueden serlo en casos diferentes. Concretamente para la presente aplicación, se hacen muy importantes especificaciones como las constantes piezoeléctricas, las cuales indican cuanta carga eléctrica o diferencial de potencial puede generar un material ante una presión ejercida en él; por otro lado, los coeficientes de acoplamiento juegan también un rol destacado, pues ellos indican la eficiencia que tiene el material en transformar energía mecánica en energía eléctrica y viceversa. Con esto se puede conocer entonces de la energía mecánica o eléctrica que ingresa en el sistema, cuanta será transformada y cuanta se disipará en el ambiente. De todas formas, muchos fabricantes de piezoeléctricos indican por lo general las aplicaciones más comunes en las que se usan unos u otros tipos de piezoeléctricos dependiendo de las necesidades. Es entonces necesario investigar las referencias o tipos de piezoeléctricos que son más acordes a la generación de energía, ya que estos presentan por lo general especificaciones superiores en cuanto a constantes piezoeléctricas y factores de acoplamiento.
- Otra cuestión que afecta en gran medida la generación de voltaje y la capacitancia del piezoeléctrico tiene que ver con el área transversal del mismo. Se halló que mientras menor sea el área, el piezoeléctrico genera mayores voltajes. Igualmente, un piezoeléctrico con área reducida presenta una menor capacitancia (Keawboonclinay & Engel, 2003). Por otro lado, un piezoeléctrico que posea una gran área transversal, poseerá una mayor capacitancia, pero el diferencial de potencial que genere será menor (Keawboonclinay & Engel, 2003). En cuanto al espesor, se halló que un piezoeléctrico delgado genera menor voltaje y mayor capacitancia, mientras que uno grueso generará una menor capacitancia y mayor voltaje (Keawboonclinay & Engel, 2003). Entonces para un generador de voltaje, lo más adecuado es que se busque un tamaño de piezoeléctrico que genere el mayor

diferencial de potencial posible. Esto se encuentra con piezoeléctricos con área reducida y un grosor mayor. Sin embargo es necesario recordar que se debe cumplir que: $Espesor \leq \frac{Diámetro}{10}$

- Uno de los puntos claves a los que se debe llegar a la hora de diseñar un generador con materiales piezoeléctricos, es determinar si el sistema ha de funcionar en el rango cuasi-estático o dinámico. El material piezoeléctrico funciona como un circuito RC (Resistivo-Capacitivo) el cual tiene un tiempo de carga y descarga (Keawboonclinay & Engel, 2003). Cuando la duración de la fuerza aplicada es mayor al tiempo que se demora el condensador en cargar, se dice que el sistema funciona el rango cuasi-estático; por otro lado, si la duración de la fuerza es muy corta (menor al tiempo que se demora el condensador en cargar), se dice que el sistema opera bajo rango dinámico (Keawboonclinay & Engel, 2003). En el rango cuasi-estático, la salida del sistema presenta picos de voltaje positivos y negativos, mientras que en el rango dinámico los voltajes de salida son más grandes y además son positivos únicamente (Keawboonclinay & Engel, 2003). Se puede concluir entonces, que trabajar bajo el rango cuasi-estático hace que el sistema pierda eficiencia ya que al generar pulsos positivos y negativos, se consume más energía para el proceso de rectificación de la señal.
- Cuando un sistema opera en rango cuasi-estático, es más conveniente utilizar conexiones en paralelo y un diodo (o puente de diodos) en cada piezoeléctrico para rectificar la señal (excepto en el caso de que se pueda asegurar que la fuerza en todos los piezoeléctricos sea aplicada en el mismo instante de tiempo), esto ya que como no se puede determinar si realmente la fuerza se aplica en el mismo instante, es posible que mientras que un piezoeléctrico genere voltajes positivos, otro puede estar generando voltajes negativos. Si se conectasen entonces en serie, es posible que los voltajes se resten quitándole eficiencia al sistema. Es por esto que en rango cuasi-estático es necesario usar configuración paralelo la cual, por medio de los diodos “protege” esa resta de voltaje que se mencionó anteriormente. La desventaja que presenta este sistema es que si los piezoeléctricos están generando diferentes voltajes en un instante, los diodos solo permitirán que la carga fluya a través del que presente el mayor diferencial de potencial. Pasando al otro caso, en el rango dinámico se concluye que lo mejor es usar conexiones tipo serie, ya que como en este rango solo se producen picos de voltaje positivos, no es necesario usar diodos en cada piezoeléctrico. Sin importar si un piezoeléctrico genera un voltaje pequeño y otro genera un voltaje mayor en un instante, los voltajes de todos los piezoeléctricos siempre se sumarán haciendo que en la salida se produzca una mayor carga.
- Una vez definido el tipo de conexión entre los piezoeléctricos, se debe encontrar una impedancia óptima para la carga, es decir, aquella en la cual el sistema disipa la mayor cantidad de energía, haciendo por ende, que este sea más eficiente energéticamente. Lo anterior, tiene que ver con el teorema de la máxima transferencia de potencia, el cual indica que para que la mayor cantidad de potencia se pueda transferir de un circuito a otro, las impedancias de estos deben ser equivalentes. Y por obvias razones, en un sistema de generación de energía

siempre se debe buscar la mayor transferencia de esta. El circuito gestor de carga, es quien cumple dicha tarea.

Por otro lado, los resultados y conclusiones propios del modelo elaborado son:

- Para el modelo elaborado a lo largo del trabajo, se decide utilizar una conexión en paralelo de los piezoeléctricos debido a que estos funcionan en rango cuasi-estático, en el cual, como se explica anteriormente, se generan picos de voltaje positivos y negativos, lo que hace que se requiera usar puentes de diodos para rectificar la señal.
- Para este tipo de aplicaciones es bueno usar piezoeléctricos que posean un área transversal reducida con el fin de que produzcan picos de voltaje mayores. En este caso se usaron piezoeléctricos de 10mm de diámetro.
- Una conclusión muy importante tiene que ver con la cantidad de piezoeléctricos que se utilizan en el sistema. Muchas personas normalmente piensan que si se implementan más piezoeléctricos el sistema generará mayor cantidad de energía. Esto no es siempre cierto porque:
 - La energía eléctrica que se genera en la salida nunca podrá exceder a la energía mecánica de compresión que el peatón imprime en el suelo cuando da un paso. Esto se cumple sin importar la cantidad de piezoeléctricos que se instalen.
 - Cuando se aplica una fuerza sobre un único piezoeléctrico (por ejemplo 700N), la generación será proporcional a dicha fuerza. Sin embargo, a medida que se instalen más piezoeléctricos esta fuerza se repartirá entre los piezoeléctricos (por ejemplo, en el caso de que fueran 4 piezoeléctricos, se repartirían de a 175N por piezoeléctrico), lo cual hace que cada uno genere menos energía que si se aplicaran los 700N sobre cada uno. Por lo anterior, se concluye que el poner muchos piezoeléctricos no es una solución para aumentar la energía generada. El tener varios piezoeléctricos ayuda a repartir las cargas mecánicas en el sistema, sin embargo, una cantidad excesiva de piezoeléctricos significa “subutilizarlos”.
- Las simulaciones arrojaron los siguientes resultados:

En la carga se generan dos tipos de pulsos de voltaje diferentes, unos de menor voltaje y mayor duración (8.3 y 5.3 Vpico); y otros de mayor voltaje pero muy poca duración (28.3 y 19.1 Vpico). Mediante la impedancia resistiva hallada de $1M\Omega$, se calculó que la potencia del sistema es de aproximadamente $9.25 \mu W$. Adicionalmente, se halló que la energía promedio entregada por el sistema cada vez que se realiza un paso sobre la baldosa es de aproximadamente $2.78 \mu Ws$.
- Teniendo en cuenta la energía mecánica que ingresa al sistema (aproximadamente $24.1 \mu J$), se puede decir que la eficiencia del sistema es de 13%. Un valor aceptable

si se tiene en cuenta que otros de generadores de energías limpias como por ejemplo los paneles solares tienen una eficiencia normalmente entre el 10 y 25% (Megazine). Luego, para este caso, se dice entonces que de la energía mecánica que ingresa al sistema en forma de compresión, el 13% es transformada en energía eléctrica que es almacenada en la batería. El resto de la energía se pierde principalmente por dos razones: uno es el factor de pérdidas propio de los materiales piezoeléctricos (factor de acoplamiento) determinado por el fabricante, y dos, en el proceso de rectificación de la señal, debido a que los puentes rectificadores con diodos schottky sustraen como mínimo 0.4 V en este proceso. En una aplicación real la eficiencia del sistema debe ser menor ya que existen otros tipos de pérdidas que no fueron consideradas en este análisis, por ejemplo una mínima deformación en las baldosas de concreto o la resistencia que tienen los cables eléctricos en el circuito.

- Se comparan los resultados obtenidos en el presente trabajo con los de la investigación de (Keawboonclay & Engel, 2003) y se halla lo siguiente: el diseño del trabajo de grado arroja un valor de potencia de $29,46 \left[\frac{\mu W}{cm^3} \right]$ para los 4 piezoeléctricos utilizados. Estos son de la familia PZT-5A y se usó una fuerza mecánica de compresión de 700N. Por otro lado el experimento de investigación de Chok Keawboonclay y Thomas G. Engel arrojó una potencia de $50,34 \left[\frac{\mu W}{cm^3} \right]$, para 1 solo piezoeléctrico de la familia PZT-5A y con una fuerza de compresión de 490N (Keawboonclay & Engel, 2003). Los dos casos pertenecen al rango cuasiestático. Como se puede ver, el trabajo de grado presenta una salida de potencia menor, esto se debe principalmente a las pérdidas de energía generadas por la configuración paralelo y la rectificación de la señal.
- Se compara ahora el resultado obtenido con baldosas piezoeléctricas comerciales del mercado. En el trabajo de grado, se obtuvo una potencia total de $9,25 \mu W$ por cada paso peatonal, mientras que sistemas ya existentes de baldosas piezoeléctricas, como por ejemplo PAVEGEN, afirma producir una potencia de salida de entre 4 y 8 W por paso, algo que no fue posible alcanzar en el desarrollo de este trabajo. (Pavegen Systems). La empresa PiezoPower dice que puede producir 17 W cada vez que se da un paso sobre su baldosa piezoeléctrica. (PiezoPower). Sin embargo, no se conocen las condiciones en que estas empresas afirman obtener dicha cantidad de potencia, pues la diferencia con el desarrollo del trabajo es abismal.
- Se concluye que el prototipo diseñado en el presente trabajo de grado, no es viable para alimentar sistemas de iluminación de baja potencia. Si bien el sistema tiene una buena eficiencia, la energía mecánica que un peatón transfiere al suelo en el momento de dar un paso es muy pequeña, por lo tanto, la energía generada será siempre mucho más pequeña. Esta energía podría alimentar sistemas de iluminación de baja potencia, pero tomaría demasiados ciclos en conseguir una carga considerable para cumplir este cometido.

Se propone entonces, como recomendaciones a futuros trabajos o desarrollos:

- Se concluyó pues que este tipo de recolectores de energía no son viables para alimentar sistemas de iluminación de baja potencia, sin embargo, se podrían usar para alimentar otros tipos de máquinas o elementos que requieran de muy bajas cantidades de energía para funcionar. Por ejemplo relojes o circuitos integrados de ultrabaja corriente.
- Se puede optar por optimizar el diseño mecánico del sistema con el fin de que las cargas se distribuyan de forma que sea necesario usar menos cantidad de piezoeléctricos, y evitar así, la pérdida de energía propia de la rectificación de muchos piezoeléctricos. Es decir, ¿sería posible hacer una baldosa la cual tuviese un sistema mecánico que hiciera que toda la carga se concentrara en un solo punto? Si esto se hiciera, se podría desarrollar el sistema con un solo piezoeléctrico que recibiría toda la carga. De esta forma no habría necesidad de incurrir en conexiones serie o paralelo y la cantidad de diodos usados para rectificar el voltaje sería menor, haciendo así más eficiente el circuito.
- Para finalizar, se concluye que una posible solución consiste en desarrollar este sistema para ser aplicado en autopistas de carros o en pistas de aeropuertos. Esto sencillamente debido a dos razones:
 - Como los automóviles y aviones poseen masas mucho mayores que la de las personas, la energía mecánica que transfieren al suelo es mucho mayor, por ende, se puede obtener mucha más energía.
 - La idea es buscar que estos sistemas trabajen en rango dinámico. Esto se logra cuando la duración de la fuerza aplicada sobre el piezoeléctrico es menor que el tiempo que se demora en cargar el condensador. De esta forma, el piezoeléctrico solo generará pulsos de voltaje positivos, haciendo que se optimice el sistema.

El tiempo que tarda un automóvil o un avión en desplazamiento en contacto con el suelo, es mucho menor que el de un peatón, por lo tanto es posible que en estos casos se entre a un rango dinámico haciendo más eficiente el sistema.

12. BIBLIOGRAFÍA

- ACONSTRUCTORAS. (2012). *Adoquín de concreto con forma de corbatín*. Recuperado el 22 de Agosto de 2012, de http://www.aconstructoras.com/product_info.php?products_id=70
- Alves Pereira, A. H. (1 de Marzo de 2010). ATCP Engenharia Física. *Cerâmicas piezoelétricas: funcionamento y propiedades*, pág 3 - 5. São Carlos, Brasil.
- ATCP de Brasil, Soluciones Piezoeléctricas. (2004). *Materiales Dispositivos Piezoeléctricos: Fundamentos y Desarrollo*. Recuperado el 23 de Octubre de 2012, de <http://www.atcp.com.br/imagenes/productos/ceramicas/articulos/Documento-3.pdf> Pág. 5-7:
- Beer, F., Johnston, E. R., Mazurek, D., Cornwell, P., & Eisenberg, E. (2009). *Vector Mechanics for engineers, Statics and dynamics* (Novena ed.). New York, EEUU: Mc Graw Hill.
- Boylestad, R. L. (2004). *Introducción al análisis de circuitos* (10 ed.). Ciudad de Mexico: Pearson Prentice Hall.
- Budinas, R. G., & Nisbett, J. K. (s.f.). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (8 ed.). Mc Graw Hill.
- Centro Argentino De Energías Alternativas [CADEA]. (s.f.). *Energías renovables*. Recuperado el 24 de Febrero de 2012, de <http://www.energias.org.ar/>
- Cerámica Italia. (s.f.). *Características Técnicas*. Recuperado el 24 de Septiembre de 2012, de <http://www.ceramicaitalia.com.co/images/stories/WebPageFiles/FichaTecnicaRV.pdf>
- Channel Industries INC. (s.f.). *Piezoelectric ceramics*. Recuperado el 28 de Febrero de 2013, de General catalog.
- Colmenar, A., & Castro, M. (s.f.). *Breve historia del uso mundial de la energía*. Recuperado el 24 de Febrero de 2012, de Servicios Educativos Comerciales Virtuales para Ingenieros y Técnicos Latinoamericanos [SECVITEL]: http://secvitel.com/index.php?option=com_content&view=article&id=58:breve-historia-del-uso-mundial-de-energia&catid=47:articulos&Itemid=58
- CONCREPAL. (s.f.). *Baldosa de 60 X 60*. Recuperado el 12 de Marzo de 2013, de <http://www.concrepal.com/?art=1017&title=Baldosa%20de%2060%20X%2060&lang=es&pdet>
- CONSTRUMÁTICA. (s.f.). *Baldosa de cerámica*. Recuperado el 22 de Agosto de 2012, de http://www.construmatica.com/construpedia/Baldosa_de_Cer%C3%A1mica

- CONSTRUMÁTICA. (s.f.). *Colocación de revestimientos exteriores e interiores*. Recuperado el 22 de Agosto de 2012, de http://www.construmatica.com/construpedia/Formaci%C3%B3n_en_Preveni%C3%B3n_de_Riesgos_Laborales._Solados_y_Alicatados:_Colocaci%C3%B3n_de_Revestimientos_Exteriores_e_Interiores
- Díaz, H. (18 de Julio de 2012). *Adoquín de concreto tipo liviano y/o pesado*. Recuperado el 22 de Agosto de 2012, de <http://compra-venta.vivavisos.com/equipo-profesional+quibdo/fabricamos-adoquin-en-concreto-tipo-liviano-y-o-pesado---co/41159828>
- Egidi, M. (4 de junio de 2012). *¿Que aprendí hoy?* Recuperado el 20 de julio de 2012, de *¿Podrían iluminarse los Juegos Olímpicos con la energía de los peatones?:* <http://hoyapredi.blogspot.com/2012/06/podrian-iluminarse-los-juegos-olimpicos.html>
- Gatto, M. (24 de Febrero de 2011). *Piezoelectric roads for California*. Recuperado el 2012 de Abril de 21, de sitio web de Energy Harvesting Journal: <http://www.energyharvestingjournal.com/articles/piezoelectric-roads-for-california-00003128.asp?sessionid=1>
- Gres de Aragón. (s.f.). *Catálogo general*. Recuperado el 12 de Marzo de 2013, de Características técnicas: <http://www.gresaragon.com/traduccion.do?idTraduccion=701>
- Howells, C. A. (2009). Piezoelectric energy harvesting. *Energy Conversion and Management* 50 (2009), 1847-1850.
- Keawboonclinay, C., & Engel, T. G. (Octubre de 2003). Electrical Power Generation Characteristics of Piezoelectric Generator Under Quasi-Static and Dynamic Stress Conditions. *IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS, FERROELECTRICS, AND FREQUENCY CONTROL*, 50(10), 1377-1382.
- Korla, S., Leon, R. A., Tansel, I., Yenilmez, A., Yapici, A., & Demetgul, M. (2011). Design and testing of an efficient and compact piezoelectric energy harvester. *Microelectronics Journal*, Volume 42, Issue 2, 265-270.
- LINEAR TECHNOLOGY. (s.f.). *LTC3588-1 - Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply*. Recuperado el 3 de Mayo de 2013, de LINEAR TECHNOLOGY: <http://www.linear.com/product/LTC3588-1>
- MATERIAS DE CONSTRUCCIÓN SANTA CRUZ. (s.f.). *Baldosa Cerámica*. Recuperado el 22 de Agosto de 2012, de MACROSACU, S.L.: http://www.macosacru.com/baldosa_ceramica.html
- Megazine. (s.f.). *La eficiencia de los paneles solares frente a otras energías renovables*. Recuperado el 10 de Mayo de 2013, de http://megazine.co/la-eficiencia-de-los-paneles-solares-frente-a-otras-energ%C3%ADas-renovables_21ec4.html

- Minazara, E., Vasic, D., & Costa, F. (s.f.). *Piezoelectric Generator Harvesting Bike Vibrations Energy to Supply Portable Devices*. Pág. 1 - 6. Francia.
- Montoya Goetz, Y. (15 de marzo de 2013). *Esfuerzos axiales en materiales*. (J. A. Cifuentes Gutiérrez, Entrevistador) Envigado, Antioquia, Colombia.
- Nogareda Cuixart, C. (s.f.). *Mandos: ergonomía de diseño y accesibilidad*. Recuperado el 20 de Marzo de 2013, de SIAFA: <http://www.siafa.com.ar/notas/nota182/mandos.htm>
- Nordín, M., & Frankel, V. H. (2004). *Biomecánica básica del sistema musculoesquelético* (Tercera ed.). Madrid: McGRAW-HILL.
- Pavegen Systems. (s.f.). *Product specification*. Recuperado el 21 de Junio de 2013, de Pavegen Systems: <http://dl.dropboxusercontent.com/u/42742762/New%20SUB/Pavegen%20Overview.pdf>
- PiezoPower. (s.f.). *PiezoPower*. Recuperado el 21 de Junio de 2013, de http://www.westentech.com/i-fair/busplans/Piezo_Power.pdf
- Pimentel Villalaz, L. (Julio de 2002). *Herramientas básicas para la solución de problemas*. Recuperado el 21 de Julio de 2012, de GestioPolis: <http://www.gestiopolis.com/recursos/documentos/fulldocs/ger/herbassolprob.htm>
- Pisando y generando*. (s.f.). Recuperado el 11 de Marzo de 2012, de Piezoelectricidad: <http://www.acmor.org.mx/cuamweb/reportescongreso/2010/fisico-mate/110-%20CUM-%20Pisando%20y%20Generando.pdf>
- Pisos y Gres. (s.f.). *Gres*. Recuperado el 13 de Marzo de 2013, de <http://www.pisosygres.com/gres.html>
- POWEREX. (s.f.). *Pila recargable NiMH AA, 2700mAh*. Recuperado el 20 de Marzo de 2013, de Cargadores y pilas de altas prestaciones: <http://www.powerex.es/pilas-recargables/pilas-nimh-aa-2700mah/>
- PROALSO. (s.f.). *Clasificación y selección de la baldosa cerámica*. Recuperado el 13 de marzo de 2013, de http://www.proalso.es/uploads/File/CPAS/M1_web.pdf
- PRODECON C.A. (2008). *Productos derivados de concreto C.A.* Recuperado el 21 de Agosto de 2012, de ADOQUINES: http://www.prodecon.com.ve/site/p_contenido.php?sec=9&p=2
- Réflex ocasión. (s.f.). *Pila recargable CR123A 1000mAh 3.0v*. Recuperado el 2013 de Mayo de 4, de Tienda online especializada en accesorios fotográficos: <http://www.reflex-ocasion.com.es/pila-recargable-cr123a-1000mah-p-156.html>
- ROCA. (s.f.). *Baldosa de Cemento*. Recuperado el 12 de Marzo de 2013, de <http://www.roca.com.co/biblioteca/fichas-tecnicas/76-baldosa-de-cemento.html>

Román L, R. (1 de Agosto de 2006). *Energía y desarrollo (capítulo 1)*. Recuperado el 24 de Febrero de 2012, de el sitio web de la Universidad de Chile: http://www.cec.uchile.cl/~roroman/cap_01/cap_01.htm

Salgado Castro, C. N., & Lugo Rangel, A. (s.f.). *Energía Eléctrica Producida por Dispositivos Piezoeléctricos*. Recuperado el 11 de Marzo de 2012, de <http://www.uacj.mx/IIT/electricaComputacion/espectrotecnologico/ForoEnergiaRenovable/Martes%208%20Macroaula%20II/Energ%C3%ADa%20El%C3%A9ctrica%20Producida%20por%20Dispositivos%20Piezoel%C3%A9ctricos.pdf>

Sodano, H. A., Inman, D. J., & Park, G. (Mayo de 2004). A Review of Power Harvesting from Vibration using Piezoelectric Materials. (S. Publications, Ed.) *The Shock and Vibration Digest*, 36(3), 199-202.

The Institute of Electrical and Electronics Engineers. (1988). *IEEE Standard on Piezoelectricity*. Recuperado el 4 de Agosto de 2012, de Scribd: <http://es.scribd.com/doc/43078463/IEEE-Piezoelectric>

UNICON. (s.f.). *Profesionales en concreto*. Recuperado el 23 de Septiembre de 2012, de Adoking: http://www.unicon.com.pe/productos/TECNICAS_ADOKING.pdf

Universidad de Navarra. (s.f.). *Ferroelectricidad y Piezoelectricidad*. Recuperado el 2012 de Mayo de 6, de sitio web de la Universidad de Navarra: http://www.tecnun.es/asignaturas/PFM_Mat/Prog/Ferroelec2.pdf

ANEXO 1. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS CHANNEL INDUSTRIES, INC.

PROPERTIES OF PIEZOELECTRIC CERAMICS											
			BARIUM TITANATE			LEAD ZIRCONATE TITANATE					
Material Reference Numbers					1300	5400	5500	5600	5700	5800	5804
Channel Industries, Inc.			300	600	Navy	Navy	Navy	Navy	Navy		Navy
U.S. Navy					IV	I	II	V	VI		III
PROPERTY		UNIT									
Coupling Coefficients	k33		.46	.39	.45	.71	.73	.73	.72	.67	.66
	k31		-.19	-.16	-.18	-.36	-.37	-.36	-.37	-.32	-.32
	k15		.46	.39	.45	.72	.71	.68	.65	.60	.59
	kp		-.32	-.27	-.30	-.60	-.62	-.62	-.62	-.55	-.54
Piezoelectric Constants	d33	10 ⁻¹² m/V	145	82	145	300	400	505	550	245	240
	d31		-58	-33	-56	-135	-185	-225	-250	-107	-105
	d15		245	150	245	525	625	670	690	390	382
	g33	10 ⁻³ Vm/N	13.1	16.8	12.2	26.1	25.8	22.0	19.4	25.2	25.8
	g31		-5.2	-6.8	-4.7	-11.7	-11.9	-9.8	-8.8	-11.0	-11.3
	g15		20.5	29.8	19.1	40.5	40.0	31.5	26.4	31.5	32.2
Free dielectric constants	K3 ^r		1250	625	1350	1300	1750	2600	3200	1100	1050
	K1 ^r		1350	570	1450	1475	1775	2400	2950	1400	1340
Elastic Constants	1 / s11 = Y11	10 ¹⁰ N/m2	11.7	11.6	11.9	8.2	6.4	6.2	6.2	8.6	8.6
	1 / s33 = Y33		11.1	11.0	11.3	6.5	5.2	5.1	4.8	7.1	7.1
	c44		4.2	4.2	4.3	2.5	2.0	2.2	2.3	2.9	2.9
	Density (min.)	10 ³ kg/m3	5.5	5.4	5.55	7.55	7.6	7.5	7.4	7.55	7.55
	Mechanical Q		450	1200	600	500	75	70	65	1100	1050
	Curie Point	°C	>115	>140	>115	>300	>350	>240	>190	>300	>300
Dielectric Loss Tangent (Max)	Low field		.008	.003	.008	.004	.02	.02	.02	.004	.004
	2KV/cm RMS		NA	.01	.015*	.02	NA	NA	NA	.007	.005
	4KV/cm RMS		NA	.025	.03*	.04	NA	NA	NA	.01	.01
Change in K3 ^{AT} (%) (Max)	2KV/cm RMS		NA	3	6*	5	NA	NA	NA	2.5	2.0
	4KV/cm RMS		NA	8	12*	18	NA	NA	NA	6.5	4.0
Static Tensile Strength psi			7500	8500	7500	11000	11000	11000	11000	12000	12000
Rated Dynamic Tensile Strength psi			3000	3500	3000	6000	4000	4000	4000	7000	7000
Change in N1 / Time Decade %			0.5	0.4	0.4	1.5	0.2	0.25	0.25	1.0	1.0
Change in kp / Time Decade %			-1.8	-0.7	-1.9	-2.3	-0.2	-0.35	-0.35	-2.0	-1.8
Change in K3 ^{AT} / Time Decade %			-0.8	-2.9	-1.3	-5.5	-1.0	-1.5	-1.5	-5.0	-4.0

ANEXO 2. CIRCUITO INTEGRADO LM3588-1



LTC3588-1

Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply

FEATURES

- 950nA Input Quiescent Current (Output in Regulation – No Load)
- 450nA Input Quiescent Current in UVLO
- 2.7V to 20V Input Operating Range
- Integrated Low-Loss Full-Wave Bridge Rectifier
- Up to 100mA of Output Current
- Selectable Output Voltages of 1.8V, 2.5V, 3.3V, 3.6V
- High Efficiency Integrated Hysteretic Buck DC/DC
- Input Protective Shunt – Up to 25mA Pull-Down at $V_{IN} \geq 20V$
- Wide Input Undervoltage Lockout (UVLO) Range
- Available in 10-Lead MSE and 3mm × 3mm DFN Packages

APPLICATIONS

- Piezoelectric Energy Harvesting
- Electro-Mechanical Energy Harvesting
- Wireless HVAC Sensors
- Mobile Asset Tracking
- Tire Pressure Sensors
- Battery Replacement for Industrial Sensors
- Remote Light Switches
- Standalone Nanopower Buck Regulator

DESCRIPTION

The LTC[®]3588-1 integrates a low-loss full-wave bridge rectifier with a high efficiency buck converter to form a complete energy harvesting solution optimized for high output impedance energy sources such as piezoelectric transducers. An ultralow quiescent current undervoltage lockout (UVLO) mode with a wide hysteresis window allows charge to accumulate on an input capacitor until the buck converter can efficiently transfer a portion of the stored charge to the output. In regulation, the LTC3588-1 enters a sleep state in which both input and output quiescent currents are minimal. The buck converter turns on and off as needed to maintain regulation.

Four output voltages, 1.8V, 2.5V, 3.3V and 3.6V, are pin selectable with up to 100mA of continuous output current; however, the output capacitor may be sized to service a higher output current burst. An input protective shunt set at 20V enables greater energy storage for a given amount of input capacitance.

LT, LT, LTC, LTM, Linear Technology, the Linear logo and Burst Mode are registered trademarks of Linear Technology Corporation. All other trademarks are the property of their respective owners.



ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA

ACTA DE EVALUACIÓN FINAL DE TRABAJO DE GRADO

Fecha: (dd/mm/aa)	21/10/2013						
Nombre del proyecto:	BALDOSA PIEZOELÉCTRICA PARA ALIMENTAR SISTEMAS DE ILUMINACIÓN DE BAJO CONSUMO ENERGÉTICO						
Director del proyecto:	Daniel Felipe López Montes						
<table border="1"> <tr> <td>Nombre del estudiante</td> <td>Programa académico</td> </tr> <tr> <td>Jorge Andrés Cifuentes Gutiérrez</td> <td>Ingeniería Mecatrónica</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> </table>	Nombre del estudiante	Programa académico	Jorge Andrés Cifuentes Gutiérrez	Ingeniería Mecatrónica			
Nombre del estudiante	Programa académico						
Jorge Andrés Cifuentes Gutiérrez	Ingeniería Mecatrónica						
Nombre del Jurado:	José Alfredo Palacio F.						
Evaluación del proyecto: Espacio exclusivo para jurado							
<input type="checkbox"/> No aprobado <input checked="" type="checkbox"/> Aprobado sin mención <input type="checkbox"/> con Mención Pública <input type="checkbox"/> con Mención honorífica <input type="checkbox"/> Trabajo laureado							
Justificación del reconocimiento: (Artículo 28 del Acuerdo 11: "El director del Programa presentará el acta final de evaluación al Consejo Académico, donde consta la solicitud de mención especial debidamente justificada y el Consejo determinará si se otorga o no")							

Daniel E. Aguilete D
DIRECTOR DEL PROGRAMA

[Firma]
DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

José A. Palacio
JURADO (SI LO HUBO)

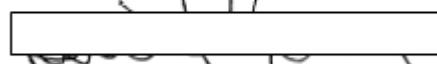


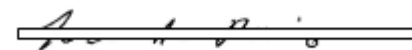
ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA

ACTA DE EVALUACIÓN FINAL DE TRABAJO DE GRADO

Fecha: (dd/mm/aa)	21/10/2013								
Nombre del proyecto:	BALDOSA PIEZOELÉCTRICA PARA ALIMENTAR SISTEMAS DE ILUMINACIÓN DE BAJO CONSUMO ENERGÉTICO								
Director del proyecto:	Daniel Felipe López Montes								
<table border="1"> <tr> <td>Nombre del estudiante</td><td>Programa académico</td></tr> <tr> <td>Jorge Andrés Cifuentes Gutiérrez</td><td>Ingeniería Mecatrónica</td></tr> <tr> <td> </td><td> </td></tr> <tr> <td> </td><td> </td></tr> </table>		Nombre del estudiante	Programa académico	Jorge Andrés Cifuentes Gutiérrez	Ingeniería Mecatrónica				
Nombre del estudiante	Programa académico								
Jorge Andrés Cifuentes Gutiérrez	Ingeniería Mecatrónica								
Nombre del Jurado:	José Alfredo Palacio F.								
Evaluación del proyecto: Espacio exclusivo para jurado <input type="checkbox"/> No aprobado <input checked="" type="checkbox"/> Aprobado sin mención <input type="checkbox"/> con Mención Pública <input type="checkbox"/> con Mención honorífica <input type="checkbox"/> Trabajo laureado									
Justificación del reconocimiento: (Artículo 28 del Acuerdo 11: "El director del Programa presentará el acta final de evaluación al Consejo Académico, donde consta la solicitud de mención especial debidamente justificada y el Consejo determinará si se otorga o no")									


DIRECTOR DEL PROGRAMA


DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO


JURADO (Si lo hubo)