



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**INVESTIGACIÓN DEL APORTE ENERGÉTICO EN LA UTILIZACIÓN DE LA BALDOSA
PIEZOELÉCTRICA COMO UNA FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE PARA ALIMENTAR
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ILUMINACIÓN DE BAJO CONSUMO**

Wilmer Ivan Soria González

Asesorado por el Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar

Guatemala, enero de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**INVESTIGACIÓN DEL APORTE ENERGÉTICO EN LA UTILIZACIÓN DE LA BALDOZA
PIEZOELÉCTRICA COMO UNA FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE PARA ALIMENTAR
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ILUMINACIÓN DE BAJO CONSUMO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

WILMER IVAN SORIA GONZALEZ

ASESORADO POR EL ING. CARLOS EDUARDO GUZMAN SALAZAR

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, ENERO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|--|
| DECANO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| VOCAL I | Ing. Angel Roberto Sic García |
| VOCAL II | Ing. Pablo Christian de León Rodríguez |
| VOCAL III | Ing. José Milton de León Bran |
| VOCAL IV | Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez |
| VOCAL V | Br. Carlos Enrique Gómez Donis |
| SECRETARIA | Inga. Lesbia Magalí Herrera López |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|--------------------------------------|
| DECANO | Ing. Angel Roberto Sic García (a.i.) |
| EXAMINADOR | Ing. José Guillermo Bedoya Barrios |
| EXAMINADOR | Ing. Julio Rolando Barrios Archila |
| EXAMINADOR | Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar |
| SECRETARIA | Inga. Lesbia Magalí Herrera López |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

INVESTIGACIÓN DEL APORTE ENERGÉTICO EN LA UTILIZACIÓN DE LA BALDOSA PIEZOELÉCTRICA COMO UNA FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE PARA ALIMENTAR SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ILUMINACIÓN DE BAJO CONSUMO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería (MECANICA ELECTRICA), con fecha (10 de Octubre de 2017).

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke, positioned above the printed name.

Wilmer Ivan Soria González

Guatemala, 8 de diciembre de 2017

Ingeniero

Julio Barrios Archila

Coordinador Área de Electrotécnica

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Facultad de Ingeniería

Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Barrios:

Con la presente informo a usted que he concluido la revisión del trabajo de graduación del estudiante WILMER IVÁN SORIA GONZÁLEZ, titulado **"Investigación del Aporte Energético en la utilización de la Baldosa Piezoeléctrica como una Fuente de Energía Renovable para Alimentar Sistemas Eléctricos de Iluminación de Bajo Consumo"**.

Habiendo el mismo cumplido con los objetivos que de propusieron para su ejecución. Por lo que, doy mi aprobación para que el estudiante Soria González, continúe con el proceso de graduación que tiene la Facultad de Ingeniería.

Indico además que, tanto el señor Soria González como el suscrito, somos los únicos responsables del contenido del trabajo referido.

Reciba un cordial saludo.



Carlos Guzmán Salazar

ASESOR

LOS GUZMAN SALAZAR

Ingeniero Electricista

Col. No. 2762



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 67. 2018.
25 DE MAYO 2018.

Señor Director
Ing. Otto Fernando Andrino González
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**INVESTIGACIÓN DEL APORTE ENERGÉTICO EN LA
UTILIZACIÓN DE LA BALDOSA PIEZOLÉCTRICA COMO UNA
FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE PARA ALIMENTAR
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ILUMINACIÓN DE BAJO
CONSUMO,** del estudiante; Wilmer Iván Soria González,
que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Julio Rolando Barrios Archila
Coordinador de Electrotécnica

Julio Rolando Barrios Archila
Ingeniero Electricista
Colegiado No. 2833



REF. EIME 67. 2018.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante: **WILMER IVÁN SORIA GONZÁLEZ** titulado: **INVESTIGACIÓN DEL APOORTE ENERGÉTICO EN LA UTILIZACIÓN DE LA BALDOSA PIEZOELÉCTRICA COMO UNA FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE PARA ALIMENTAR SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ILUMINACIÓN DE BAJO CONSUMO**, procede a la autorización del mismo.


Ing. Otto Fernando Andrino González



GUATEMALA, 21 DE SEPTIEMBRE 2018.

Universidad de San Carlos
De Guatemala



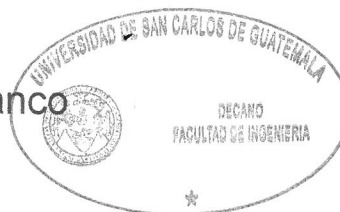
Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.10.2019

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica del trabajo de graduación titulado: **“INVESTIGACIÓN DEL APOORTE ENERGÉTICO EN LA UTILIZACIÓN DE LA BALDOSA PIEZOLÉCTRICA COMO UNA FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE PARA ALIMENTAR SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ILUMINACIÓN DE BAJO CONSUMO”** presentado por el estudiante universitario: **Wilmer Iván Soria González** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, Enero de 2019

/echm

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por su amor incondicional y darme salud y sabiduría para poder culminar mis estudios.
- Mis padres** Nicolás Raúl Soria Flores (q.e.p.d.) y Rosa Odilia González Pérez, por brindarme día a día su apoyo y amor y darme palabras de aliento en momentos difíciles.
- Mi esposa** Marta Alicia Pérez de Soria. Por ser un apoyo incondicional y brindarme la ayuda necesaria para culminar mis estudios.
- Mi hijo** Nicolás Javier Soria Pérez, personita muy especial que es una fuente de motivación para seguir adelante.
- Mis hermanos** Randy Alejandro, Yessica Azucena y Erick Antonio Soria González, Por el cariño, apoyo y consejos que siempre me han dado.
- Mi hermano** Luis Fernando Soria Torres, Por ser un ejemplo de superación y darme la oportunidad de seguir estudiando.

Mi asesor

Carlos Eduardo Guzmán Salazar, por guiarme y apoyarme en la realización de esta investigación.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala Por ser mi casa de estudios durante mi formación académica.

Facultad de Ingeniería Por darme la oportunidad de formar parte de tan distinguida Facultad.

Mi madre Por apoyarme incondicionalmente y por sobre todo le agradezco los consejos y palabras de aliento en aquellos momentos difíciles de la carrera.

Mis amigos de la Facultad Por el apoyo que siempre tuvieron hacia mí.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | V |
| LISTA DE SÍMBOLOS | IX |
| GLOSARIO | XI |
| RESUMEN | XV |
| OBJETIVOS | XVII |
| INTRODUCCIÓN | XIX |
| | |
| 1. TIPOS DE ENERGÍA RENOVABLES | 1 |
| 1.1. Energía eólica | 1 |
| 1.2. Energía geotérmica | 2 |
| 1.3. Energía solar | 4 |
| 1.3.1. Energía solar fotovoltaica | 4 |
| 1.3.2. Energía solar térmica | 6 |
| 1.4. Energía mareomotriz | 7 |
| 1.4.1. Generador de corriente de marea | 8 |
| 1.4.2. Presa de mareas | 9 |
| 1.4.3. Energía mareomotriz dinámica | 9 |
| 1.5. Energía hidráulica | 9 |
| 1.6. Energía piezoeléctrica | 11 |
| | |
| 2. MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS | 13 |
| 2.1. Historia | 15 |
| 2.2. Efecto piro-eléctrico | 16 |
| 2.3. Efecto electro-strictivo | 17 |
| 2.4. Efecto electro-óptico | 18 |

| | | |
|------------|---|----|
| 2.4.1. | Material ópticamente isotrópico | 19 |
| 2.4.2. | Materiales ópticamente aniso-trópicos..... | 21 |
| 2.5. | Algunos materiales piezoeléctricos | 22 |
| 2.5.1. | Cristales de cuarzo | 26 |
| 2.5.2. | Mono-cristales piezoeléctricos..... | 27 |
| 2.5.3. | Semiconductores piezoeléctricos | 27 |
| 2.5.4. | Cerámicas piezoeléctricas | 28 |
| 2.5.5. | Polímeros piezoeléctricos..... | 30 |
| 2.5.6. | Compuestos piezoeléctricos | 32 |
| 2.5.6.1. | Propiedades de los materiales compuestos piezoeléctricos | 32 |
| 2.5.6.1.1. | Propiedades suma | 32 |
| 2.5.6.1.2. | Propiedades combinación | 33 |
| 2.5.6.1.3. | Propiedades producto... .. | 33 |
| 3. | PROPIEDADES DE LOS MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS | 35 |
| 3.1. | Constantes principales de los materiales | 35 |
| 3.1.1. | Constante de carga piezoeléctrica..... | 36 |
| 3.1.2. | Constante de tensión piezoeléctrica | 37 |
| 3.1.3. | Coefficiente de acoplamiento | 38 |
| 3.1.4. | Factor de calidad-mecánico..... | 39 |
| 3.1.5. | Factor de disipación dieléctrica..... | 40 |
| 3.1.6. | Temperatura de Curie | 42 |
| 3.1.7. | Constante de frecuencia..... | 43 |
| 3.1.8. | Impedancia acústica | 44 |
| 3.2. | Clasificación de los materiales piezoeléctricos de acuerdo a su propiedad y aplicación | 45 |
| 3.2.1. | Curva de histéresis..... | 45 |

| | | |
|--------|---|----|
| 3.2.2. | Clasificación de los materiales piezoeléctricos..... | 47 |
| 3.3. | División y características de los sub-grupos de los materiales piezoeléctricos..... | 49 |
| 3.4. | Limitaciones de los materiales piezoeléctricos..... | 52 |
| 4. | BALDOSA PIEZOÉLECTRICA..... | 57 |
| 4.1. | Fabricación | 58 |
| 4.2. | Vida útil de la baldosa piezoeléctrica | 60 |
| 4.3. | Funcionamiento | 60 |
| 4.4. | Almacenamiento de la energía generada | 63 |
| 4.5. | Costo de la baldosa piezoeléctrica | 64 |
| 5. | CONOCIMIENTOS NECESARIOS PARA EL BUEN DESARROLLO DE LOS CÁLCULOS DEL SISTEMA PIEZOELÉCTRICO | 67 |
| 5.1. | Flujo peatonal | 67 |
| 5.2. | Fuerza | 70 |
| 5.3. | Trabajo | 71 |
| 5.4. | Potencia | 72 |
| 5.5. | Energía..... | 73 |
| 5.6. | Energía potencial..... | 73 |
| 5.7. | Peso promedio de una persona en Guatemala..... | 74 |
| 5.8. | Cálculo del peso promedio de un Guatemalteco..... | 76 |
| 5.9. | Fuerza ejercida hacia el suelo cuando una persona camina.... | 77 |
| 5.10. | Largo de la zancada de una persona al momento de caminar..... | 78 |
| 5.11. | Tiempo promedio que tarda una persona con velocidad moderada dar un paso tras otro..... | 79 |

| | | |
|------|--|-----|
| 6. | ELABORACIÓN DE LOS CÁLCULOS PARA EL SISTEMA COMPUESTO POR 10 BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS | 81 |
| 6.1. | Ejemplo de la implementación de un sistema de 10 baldosas piezoeléctricas | 82 |
| 6.2. | Cálculo de valores de generación de energía, día, semana, mes, año | 94 |
| 6.3. | Banco de baterías | 97 |
| 6.4. | Instalación del sistema piezoeléctrico de 10 baldosas..... | 99 |
| 6.5. | Valor del consumo de energía en Guatemala | 102 |
| | 6.5.1. Ahorro económico en relación al costo del KWh y la energía generada | 103 |
| 7. | FACTIBILIDAD ECONÓMICA..... | 107 |
| 7.1. | Factibilidad económica..... | 107 |
| 7.2. | Tasa interna de retorno (TIR)..... | 108 |
| 7.3. | Cálculo de factibilidad ambiental | 111 |
| | CONCLUSIONES | 113 |
| | RECOMENDACIONES | 115 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 117 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | Sistema completo de energía eólica..... | 2 |
| 2. | Proceso de generación de energía eléctrica en base a la energía geotérmica | 4 |
| 3. | Sistema de la energía fotovoltaica | 6 |
| 4. | Sistema de captación de energía térmica | 7 |
| 5. | Generador corriente de marea | 8 |
| 6. | Presa de marea..... | 9 |
| 7. | Sistema de generación de una hidroeléctrica | 11 |
| 8. | Distribución de los ejes coordenados para dividir los efectos en un cristal... .. | 14 |
| 9. | Representación de un material con centro geométrico (a) y material sin centro geométrico (b)..... | 17 |
| 10. | Parametros característicos de los materiales anteriormente descritos..... | 25 |
| 11. | a) Corte de cristal de cuarzo, b) Aplicación de fuerzas en las caras del cristal para obtener el efecto piezoeléctrico | 26 |
| 12. | Dirección de las celdas cuando se tiene un mono-cristal | 27 |
| 13. | a) Polarización de la celulas aplicando una tensión, b) Generación de corriente eléctrica y alineación de las celulas, c) Generación de corriente eléctrica aplicando compresión al material. | 30 |
| 14. | Ciclo de histéresis | 47 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 15. | Clasificación de los materiales piezoeléctricos | 48 |
| 16. | División en subgrupos de los materiales “ <i>Hard</i> ” y “ <i>Soft</i> ” | 49 |
| 17. | Calidad mecánica Vs temperatura | 54 |
| 18. | Constante dieléctrica Vs temperatura | 55 |
| 19. | Carga piezoeléctrica Vs temperatura | 56 |
| 20. | Baldosa Pavegen rectangular recolectora de energía..... | 59 |
| 21. | Baldosa Pavegen triangular recolectora de energía..... | 60 |
| 22. | Sistema de recolección de energía por medio de la pisada del ser humano | 62 |
| 23. | Proceso que se debe cumplir en la implementación de la baldosa piezoeléctrica..... | 64 |
| 24. | Representación gráfica del trabajo | 72 |
| 25. | Energía potencial gravitacional..... | 74 |
| 26. | Implementación de 5 baldosas para flujo peatonal proveniente de la Aguilar Batres | 83 |
| 27. | Implementación de 5 baldosas para flujo peatonal proveniente del Anillo Periférico..... | 84 |
| 28. | Secuencia de cálculo..... | 85 |
| 29. | Preparación del sitio para la instalación de las baldosas piezoeléctricas..... | 101 |
| 30. | Instalación de base para soporte de las baldosas piezoeléctricas | 101 |
| 31. | Distribución de baldosas..... | 102 |
| 32. | Tarifa de cobro por KWh en Guatemala..... | 103 |
| 33. | Flujo de caja del sistema piezoeléctrico..... | 109 |

TABLAS

| | | |
|-------|--|-----|
| I. | Producción de calor geotérmico | 3 |
| II. | Comparación de polímeros piezoeléctricos contra cerámicos piezoeléctricos | 31 |
| III. | Combinaciones de propiedades producto | 34 |
| IV. | Constante dieléctrica de algunos materiales | 41 |
| V. | Nivel de temperatura en la cual los materiales dejan de tener propiedades piezoeléctricas..... | 43 |
| VI. | Clasificación de los materiales de acuerdo a la norma americana DOD-STD-1376A (SH)..... | 48 |
| VII. | Tasa de envejecimiento de materiales piezoeléctricos..... | 53 |
| VIII. | Límite de tracción para algunos materiales piezoeléctricos..... | 56 |
| IX. | Población estudiantil en la USAC, para el primer semestre del año 2017..... | 69 |
| X. | Tiempo promedio que tarda una persona en caminar 10,000 pasos | 79 |
| XI. | Generación de energía..... | 96 |
| XII. | Estimación de instalaciones del sistema piezoeléctrico..... | 100 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|-----------------|--------------------------------|
| A | Amperio |
| Å | Angstrom |
| H | Campo magnético |
| SiC | Carburo de silicio |
| cm | Centímetro |
| N_k | Constante de frecuencia |
| CA | Corriente alterna |
| CD | Corriente directa |
| C | Coulomb |
| ρ | Densidad del aire |
| CO ₂ | Dióxido de Carbono |
| \$ | Dólar |
| X | Eje coordenado |
| Y | Eje coordenado |
| Z | Eje coordenado |
| Q | Factor de calidad mecánico |
| Tan δ | Factor de disipación eléctrica |
| B | Flujo magnético |
| Ge | Germanio |
| °C | Grados centígrados |
| Hz.m | Hertz por metro |
| Z | Impedancia |
| MRayls | Impedancia acústica |

| | |
|----------------------|------------------------------|
| J | Julio |
| Kg | Kilogramo |
| Mhz | Megahertz |
| m | Metro |
| N | Newton |
| GaN | Nitruro de Galio |
| ZnO | Óxido de Zinc |
| PXE | Oxido piezoeléctrico |
| ϵ_r | Permitividad del medio |
| ϵ_o | Permitividad eléctrica |
| PDVF | Polifluoruro de vinilideno |
| % | Porcentaje |
| Si | Silicio |
| T_c | Temperatura de Curie |
| Vm/N | Voltio x metro/Newton |
| W | Watt |
| PZT's | Zirconato Titanato de Chumbo |

GLOSARIO

| | |
|--------------------------|---|
| Actuador | Es un dispositivo mecánico cuya función es proporcionar fuerza para mover o “actuar” otro dispositivo mecánico. |
| Adimensional | Cantidad o valor de magnitud o dimensión uno y que carece de dimensión física asociada. |
| Angstrom | Es una unidad de longitud empleada principalmente para expresar longitudes de onda, distancias moleculares y atómicas. |
| Átomo | Es la unidad más pequeña de la materia que tiene las propiedades de un elemento químico. |
| Campo coercitivo | Es la intensidad del campo magnético que se debe aplicar a un material para reducir su magnetización a cero. |
| Densidad del aire | Relación entre la masa y el volumen siendo su valor $1,22 \text{ kg/m}^3$ a la presión atmosférica normal. |
| Dieléctrico | El dieléctrico es un tipo de aislante que tiene la propiedad de formar dipolos eléctricos en su interior bajo la acción de campo eléctrico. |

| | |
|------------------------------|--|
| Dióxido de Carbono | Es un gas incoloro denso y poco reactivo forma parte de la composición de la troposfera y se genera cuando se quema cualquier sustancia que tenga carbono. |
| Efecto Hall | Es la aparición de un campo eléctrico por separación de cargas en el interior de un conductor por la circulación de un campo magnético. |
| EEGSA | Empresa Eléctrica de Guatemala, Sociedad Anónima. |
| Energía gravitacional | Es la energía potencial que depende de la altura asociada con la fuerza gravitatoria. |
| Exfoliable | Es la tendencia de los materiales cristalinos para dividirse a lo largo de planos estructurales. |
| Inducción remanente | Es el nivel de inducción magnética aun existente en una sustancia ferromagnética después de someterla a la acción de un campo magnético. |
| INE | Instituto Nacional de Estadística. |
| Luz ultravioleta | La luz ultravioleta es un tipo de radiación electromagnética que tiene longitud de onda corta. |

| | |
|------------------------------|---|
| Macroscópico | Es el nivel de descripción en que la posición o estado físico concreto de las partículas que integran un cuerpo. |
| Polarización de carga | Es la modificación de la distribución de carga que ocurre en un material aislador por efecto de campo eléctrico. |
| Pronador | Se le denomina al giro natural del pie hacia adentro al momento de caminar. |
| RENAP | Registro Nacional de las Personas. |
| Sal de Rochelle | Es una sal soluble en agua y ligeramente soluble en alcohol y posee propiedades de la doble refracción y tiene propiedades piezoeléctricas. |
| Sal de Seignette | Es tipo de sustancia tiene efectos piro-eléctricos y es utilizado en tratamiento de metales, plateado de espejos, papel de cigarro entre otros. |
| Súper-condensadores | Son dispositivos electroquímicos capaces de sustentar una densidad de energía inusualmente alta en comparación con los condensadores normales. |
| Supinador | Es el persona que al momento de correr, corre con las piernas separadas y apoyando la zona exterior del pie. |

| | |
|---------------------------|---|
| Tension eléctrica | Es el diferencial de potencial eléctrico entre dos puntos de un circuito. |
| Tetragonal | Es una forma del cristal debido a que la celda unidad de la red cristalina se puede formar en base a un cubo. |
| Transductor | Dispositivo que tiene la misión de recibir energía de naturaleza eléctrica, mecánica y acústica y suministrar otra energía de diferente naturaleza pero en base a la energía que recibió. |
| USAC | Universidad de San Carlos de Guatemala. |
| Zirconato de plomo | Son materiales utilizados especialmente para fabricar materiales cerámicos piro-eléctricos. |

RESUMEN

Debido a la gran demanda de energía eléctrica que se da día con día y que conlleva a que las generadoras de energía eléctrica quemen más combustibles fósiles y como bien se sabe son materiales extraídos de la tierra que muy pronto se acabaran y además son dañinos para el medio ambiente, debido a la emanación de dióxido de carbono que emiten al ser quemados. A razón de esto nacen los sistemas renovables de energía eléctrica que utilizan algún fenómeno natural para su funcionamiento.

El motivo de esta investigación es hacer un estudio que determine la viabilidad de un sistema renovable de energía a base de piezoelectricidad, utilizando un modelo de 10 baldosas que recibirán las pisadas de las personas que pasen por el lugar donde se instalen. El estudio estará enfocado en la cantidad de energía que el sistema pueda recolectar para la utilización en sistemas de iluminación, o dicha energía recolectada pueda ser almacenada en un banco de baterías para su uso posterior.

La cantidad de energía recolectada dictará la viabilidad del sistema piezoeléctricos a razón de generación versus ahorro económico, debido a que lo que se busca es tratar de utilizar este tipo de tecnología para generar energía eléctrica a mayor escala y dejar en el pasado los combustibles fósiles, pero para lograr hacer este gran cambio se necesita que estos sistemas sean rentables para el inversionista y amables con el medio ambiente.

OBJETIVOS

General

Hacer una investigación del aporte energético de la baldosa con características piezoeléctricas para alimentar sistemas de iluminación.

Específicos

1. Conocer los diferentes tipos de energías verdes.
2. Dar a conocer las propiedades y la utilización de materiales piezoeléctricos.
3. Conocer los beneficios en la utilización de la baldosa piezoeléctrica.
4. Hacer un análisis de rentabilidad de un sistema piezoeléctrico.

INTRODUCCIÓN

El objetivos de esta investigación es determinar el aporte energético que pueda llegar a tener la implementación de la baldosa piezoeléctrica como un aporte para la alimentación de sistemas eléctricos de iluminación de bajo consumo, este consiste en la colocación de baldosas en lugares estratégicos donde el flujo peatonal sea alto debido a que esta baldosa requiere de la dinámica peatonal con la cual se logra la compresión de los materiales piezoeléctricos que están contenidos dentro de la baldosa, y debido a esto se obtiene electricidad, que puede ser almacenada o directamente utilizada para iluminar pasillos, señales de tránsito, entre otros.

Y debido a la alta demanda de energía eléctrica y al alto crecimiento de esta, la utilización y demanda de combustibles fósiles conlleva a un consumo alto que ocasionará en un futuro no muy lejano la escases de estos combustibles, y debido a esto el ser humano se ve en la necesidad de implementar nuevas formas de generar electricidad. “Energías Verdes” que son de suma importancia para la conservación del medio ambiente y con esta se garantizará una generación de energía limpia.

Entre las energías renovables se pueden mencionar: Energía Eólica, Energía Solar, Energía Geotérmica, Energía Mareomotriz y Energía Piezoeléctrica, esta última es un tipo de energía que es producida por la compresión de materiales piezoeléctricos, con lo cual se produce electricidad que puede ser almacenada o directamente utilizada. Este tipo de energía es producida de manera limpia que no afecta el medio ambiente y no tiene aporte de dióxido de carbono al medio ambiente.

1. TIPOS DE ENERGÍA RENOVABLES

La energía renovable es el tipo de energía que se encuentra en la naturaleza de forma ilimitada y que una vez utilizada puede ser capaz de regenerarse de manera natural, este tipo de energía es también llamada “Energía Verde”. Con este tipo de energía se espera en un futuro poder reemplazar los combustibles fósiles y con esto reducir la contaminación del medio ambiente.

“Y debido a que los combustibles fósiles son utilizados para generar electricidad y estos son recursos extraídos de la tierra y por lo tanto son recursos limitados cuya reserva se estima que sea de aproximadamente 150 años para el carbón, para el petróleo 42 años y para el gas natural 63 años.”¹ La implementación de energías renovables es de suma importancia, a continuación se mencionan algunas fuentes de energía renovable: energía eólica, energía geotérmica, energía solar, energía mareomotriz, energía hidráulica y energía piezoeléctrica.

1.1. Energía eólica

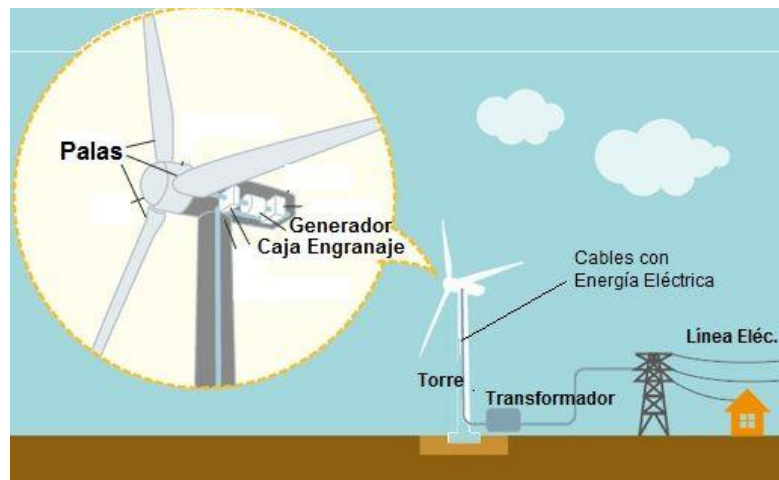
La energía eólica es un tipo de energía que aprovecha la fuerza del viento y la convierte de energía mecánica a energía eléctrica. El principio de funcionamiento de la energía eólica se basa en la instalación de un aspa conectada paralelamente con un aerogenerador, esta aspa atrapa la energía cinética del viento que ocasiona que esta se mueva, esta aspa esta conecta a un eje de baja velocidad y esta velocidad se aumenta mediante un mecanismo de sistemas de engranajes que mueve un eje llamado motriz y este eje mueve

¹ Fuente: www.webaero.net/ingenieria/variros/Expo%20Industria/Industria/reservas_fosiles.htm.
Consulta: 4 de febrero de 2018.

un generador (alternador), con este se genera corriente alterna. La energía que producirá este sistema dependerá del tamaño del aspa, a mayor longitud del aspa se obtiene más potencia.

El sistema completo para generar electricidad a mayor escala consta del aerogenerador, transformador y de las líneas de transmisión. El esquema se muestra a continuación.

Figura 1. **Sistema completo de energía eólica**



Fuente: <http://www.areatecnologia.com/electricidad/energía-eolica.html>. Consulta: 10 de septiembre de 2016.

1.2. **Energía geotérmica**

La energía geotérmica es un tipo de energía renovable que aprovecha el calor del interior de la tierra para producir electricidad, básicamente existen tres tipos de campos geotérmicos que son divididos por la cantidad de calor que generan, estos se muestran en la tabla siguiente:

Tabla I. **Producción de calor geotérmico**

| No. | Nombre | Cantidad de calor |
|-----|------------------|-------------------|
| 1 | Geotérmica alta | 150 y 400°C |
| 2 | Geotérmica media | 70 y 150°C |
| 3 | Geotérmica baja | 20 y 60°C |

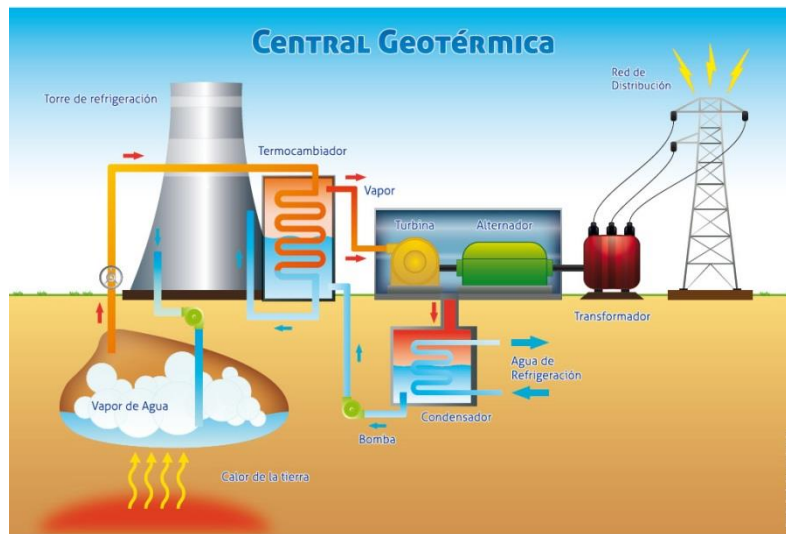
Fuente:UNAM, *Energía e impacto ambiental*.www.energí aunam.wordpress.com/2010/03/12/energía-geotermica-para-generar-electricidad/. Consulta: 10 de septiembre de 2017.

“El proceso de generación de energía eléctrica a base de energía geotérmica inicia con la extracción de la mezcla vapor/agua geotérmica a través de los pozos productores, esta mezcla es separada utilizando un separador ciclónico, ya separados el agua se inyecta nuevamente al suelo y el vapor-agua en estado gaseoso es conducido a la generadora.”² En la central generadora la fuerza del vapor activa una turbina que gira a alta velocidad y esta a su vez activa un generador donde el roce con el campo electromagnético, transforma la energía mecánica en energía eléctrica.

En el sistema de generación de electricidad a base de energía geotérmica la electricidad generada por el generador debe ser transferida a transformadores que elevan la energía eléctrica para posteriormente enviarla a los lugares donde será utilizada. El proceso que sigue la energía geotérmica se muestra en la siguiente figura.

² Fuente: <http://www.lageo.com.sv/?cat=1009>. Consulta: 10 de septiembre de 2017.

Figura 2. **Proceso de generación de energía eléctrica en base a la energía geotérmica**



Fuente: <http://www.mendozapost.com/nota/20633-la-energía-geotermica-ya-se-aplica-en-un-edificio-publico-de-mendoza/>. Consulta: 10 de septiembre de 2017.

1.3. **Energía solar**

La energía solar es un tipo de energía renovable que se basa en el aprovechamiento de la radiación solar que es transformada mediante los dispositivos correctos, para poder transformar esa radiación solar a energía térmica o eléctrica para un uso posterior. El aprovechamiento de la energía solar se puede dar en los siguientes tres casos: energía solar fotovoltaica, energía solar térmica y energía solar termoeléctrica, se hará una descripción de cada uno.

1.3.1. **Energía solar fotovoltaica**

La energía solar fotovoltaica es una forma de generar energía eléctrica de forma directa utilizando la radiación del sol, se trata de una fuente de energía

totalmente limpia que no necesita de reacciones químicas ni provoca residuos que contaminen el medio ambiente y lo más importante es que forma parte una fuente de energía renovable.

La energía solar fotovoltaica contenida en las partículas de luz (fotones) puede ser convertida en electricidad a través del proceso llamado conversión fotovoltaica, este proceso consiste en que al iluminar un material determinado con radiación electromagnética (luz visible o ultravioleta) se producen emisiones de electrones, esto produce el desprendimiento de electrones de los átomos y comienzan a circular por el material y esto provoca un diferencial de potencial entre 0,5 y 0,6 voltios.³

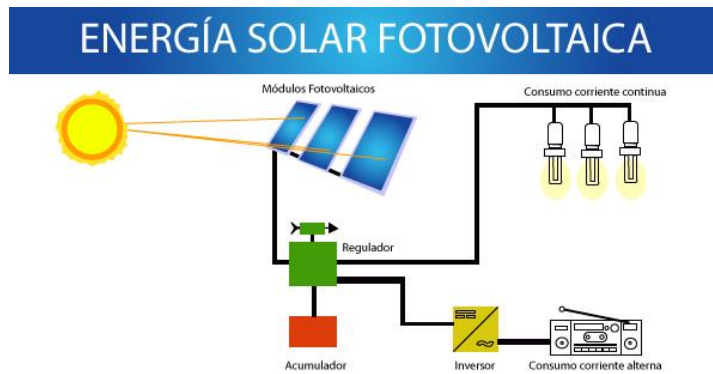
Toda esta energía es obtenida a través de paneles fotovoltaicos los cuales están compuestos por dispositivos semiconductores fabricados de silicio.

El sistema completo de energía fotovoltaica consta de los paneles solares que atrapan la radiación solar y al momento de salir de estos paneles la corriente eléctrica generada es corriente directa (CD), y debe pasar por un inversor para que la convierta en corriente alterna (CA), que podrá ser utilizada inmediatamente o también puede ser almacenada para un uso posterior.

³ Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Conversi%C3%B3n_fotovoltaica. Consulta: 10 de septiembre de 2017.

A continuación se muestra un esquema del sistema eléctrico fotovoltaico.

Figura 3. **Sistema de la energía fotovoltaica**



Fuente: <https://www.emaze.com/@AORFFORTR/Energ%C3%ADa-Solar>. Consulta: 10 de septiembre de 2017.

1.3.2. **Energía solar térmica**

La energía solar térmica o termo-solar es un tipo de energía renovable que se basa en el aprovechamiento de la radiación del calor del sol para transferirla a un medio portador de calor, usualmente podría ser agua o aire, en esta rama existen dos sistemas para producir electricidad basados en la energía solar térmica estos son: de alta concentración y de baja concentración.

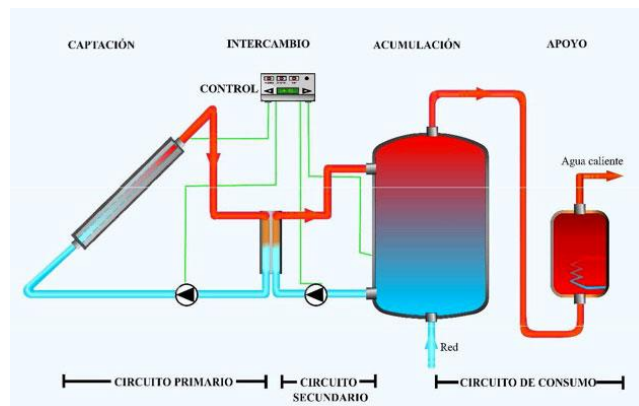
“Los sistemas de baja concentración se basan en los sistemas comunes utilizados en los hogares para poder calentar agua o poder proveer de calefacción los hogares, y los sistemas de alta concentración son utilizados para generar electricidad por medio de calor.”⁴

⁴Fuente: www.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar_t%C3%A9rmica. Consulta: 10 de septiembre de 2017.

El principio de funcionamiento de este sistema se basa en la captación de los rayos solares a través de los paneles solares absorbiendo de esta forma la energía en forma de calor, de los colectores el calor pasa a almacenarse en un deposito llamado acumulador, aquí se almacena la energía preparada para su uso y distribución según sea su demanda.

Los colectores más comunes son llamados colectores solares planos, estos son utilizados a nivel domiciliario utilizados para el calentamiento de agua y calefacción y con varias modificaciones en los diseños de estos paneles y modificaciones en las tuberías del fluido se pueden conseguir temperaturas más elevadas a este nivel ya son llamados de temperatura media, y se pueden utilizar para secado de madera y otros productos, los colectores de alta temperatura alcanzan temperaturas de aproximadamente 500°C y permiten utilizar el calor para poder generar electricidad.⁵

Figura 4. **Sistema de captación de energía térmica**



Fuente: <http://acontermica.es/energía-solar-termica/>. Consulta: 10 de septiembre de 2017.

1.4. **Energía mareomotriz**

Este tipo de energía renovable se basa en el movimiento de las mareas, esta energía generada es aprovechada por las turbinas instaladas dentro del agua, esta turbina genera movimiento en un alternador el cual genera la

⁵Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar_t%C3%A9rmica. Consulta: 10 de septiembre de 2017.

energía eléctrica, las instalaciones de este sistema son realizado en ríos profundos, desembocaduras de ríos, en el cual se aprovechan las corrientes marinas.

Es muy importante saber que el movimiento de la marea es generado por la interacción entre la Luna el Sol y la Tierra debido a la interacción que hay entre la Luna y la Tierra los cuales ejercen una fuerza que atrae los cuerpos hacia ellos por lo cual la Luna y la Tierra se atraerán entre si y debido a la desigualdad de atracciones que la Luna produce sobre la Tierra provocan las mareas en el mar.⁶

Este tipo de generación se divide en tres métodos muy importantes que se describen a continuación.

1.4.1. Generador de corriente de marea

Estos hacen uso de la energía cinética del movimiento de agua para mover las aspas instaladas dentro del agua y este movimiento hace que la turbina genere electricidad.

Figura 5. **Generador corriente de marea**



Fuente: http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno12/costosernc/D._Mare.html. Consulta: 10 de septiembre de 2017.

⁶Fuente: http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno12/costosernc/D._Mare.html. Consulta: 10 de septiembre de 2017.

1.4.2. Presa de mareas

Este tipo de presa toma la energía potencial que se genera en la diferencia de alturas entre la marea alta y baja.

Figura 6. Presa de marea



Fuente: http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno12/costosernc/D._Mare.html. Consulta: 11 de septiembre de 2017.

1.4.3. Energía mareomotriz dinámica

Este tipo de tecnología se basa en la explotación de la interacción de la energía cinética y potencial en las corrientes de marea.

“Teniendo como propuesta que la construcción de presas sea de aproximadamente 40 metros de largo que vaya desde la costa hasta las afueras del mar, pero cabe mencionar que esto es aun de forma teórica.”⁷

1.5. Energía hidráulica

La energía hidráulica o hídrica se basa en el aprovechamiento de la energía cinética y potencial que provoca el agua por su caída a una determinada altura, este recurso puede obtenerse de manera natural con el

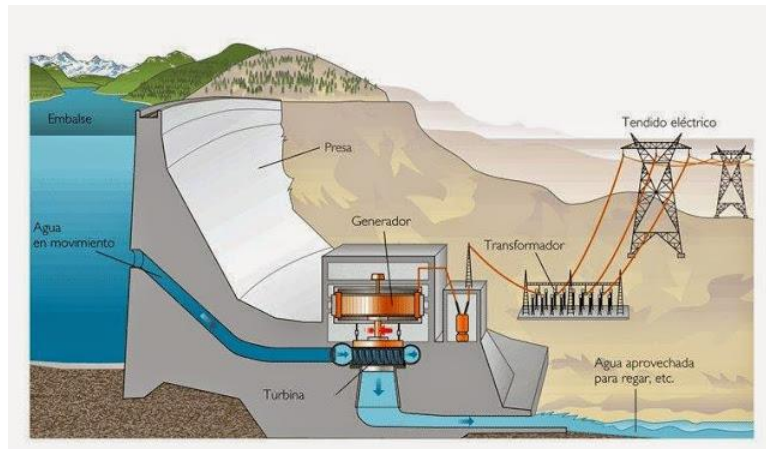
⁷Fuente: http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno12/costosernc/D._Mare.html. Consulta: 10 de septiembre de 2017.

aprovechamiento de alguna catarata o con la construcción de presas que generen una caída de agua artificial, para poder aprovechar al máximo esta energía se deben tener muy en cuenta los factores caudal (Cantidad de agua que fluye) y la altura del salto de agua, estos dos factores están estrictamente en función de la época del año debido a la época del año que determina un caudal más elevado.

La casa de máquinas de una hidroeléctrica está generalmente constituida por la toma de agua, la turbina y el generador, el funcionamiento de estas tres partes están relacionadas entre sí, y la función básica de una hidroeléctrica es tomar el agua y enviarla por una tubería que está conectada con una turbina, el paso de agua choca con la turbina y transfiere su energía cinética para que la turbina la convierta en energía mecánica, y debido que, entre la turbina y el generador hay un eje compartido, la turbina mueve al generador y este movimiento provoca la generación de energía eléctrica por medio del generador, y para completar el sistema de generación hidráulica este generador está conectado hacia transformadores que elevan la corriente generada, para luego ser conectada a líneas de transmisión que llevarán la energía eléctrica a lugares donde será consumida.

A continuación se muestra el sistema de generación de una hidroeléctrica.

Figura 7. **Sistema de generación de una hidroeléctrica**



Fuente: <http://patriciayamanda99.blogspot.com/2016/05/energía-mareomotriz.html>. Consulta. 11 de octubre de 2017.

1.6. **Energía piezoeléctrica**

Este tipo de energía es muy poco conocida pero pertenece a la rama de las energías renovables, este estudio está basado básicamente en el aporte que puede generar este tipo de energía, A pesar de que fue descubierta hace más de un siglo, fue hasta hace pocos años que se pudo utilizar como una fuente masiva, básicamente es obtenida de la compresión de una baldosa que está hecha de materiales piezoeléctricos que necesitan de la compresión para poder generar electricidad.

Esta baldosa necesita básicamente de las pisadas humanas para poder generar electricidad y la electricidad generada depende de la cantidad de compresión que reciba, esto básicamente indica que el peso de la persona es una parte esencial del efecto piezoeléctrico. En los siguientes capítulos se hará

un estudio de los materiales piezoeléctricos y las reacciones que tienen estos materiales al ser comprimidos.

2. MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS

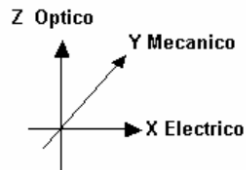
Los materiales piezoeléctricos son básicamente cristales naturales o sintéticos que no poseen centro de simetría, estos materiales tienen la necesidad de ser comprimidos para convertir la energía mecánica en eléctrica, actualmente existen dos tipos de materiales piezoeléctricos ampliamente aceptados estos son: la cerámica y los polímeros piezoeléctricos. Los piezopolímeros están mejor preparados para actuar como sensores porque añaden una rigidez mínima a la estructura dada y además son fáciles de fabricar.

Antes de seguir y estudiar los efectos en los materiales piezoeléctricos es de suma importancia saber lo siguiente:

Si se asocian tres conjuntos de ejes usando coordenadas cartesianas se pueden dividir los efectos uno por cada eje en dichas coordenadas por ejemplo:

- El eje longitudinal que une las puntas al final del cristal se llama eje Z u óptico y si aplicamos tensiones eléctricas a este eje no se produce efecto piezoeléctrico.
- El eje X o eléctrico pasa diagonalmente a través de las esquinas opuestas del hexágono.
- El eje Y o eje mecánico es perpendicular a la cara del cristal

Figura 8. **Distribución de los ejes coordenados para dividir los efectos en un cristal**



Fuente; cristales de cuarzo y efecto piezoeléctrico, www.solecmexico.com/. Consulta: 18 de octubre de 2017.

Debido al gran avance en la tecnología los siguientes materiales son muy utilizados en la electrónica para fabricar componentes, entre ellos se pueden mencionar los siguientes:

- Cuarzo
- Rubidio
- Sal de seignette
- Cerámicas
- Cerámica piezoeléctrica
- Cerámica técnica
- Compuestos piezoeléctricos
- Cristales hidrosolubles.

Entre las aplicaciones que se le pueden dar a estos materiales se mencionan las siguientes:

- Fabricación de bocinas amplificadoras que por las características físicas de los materiales son capaces de aumentar la intensidad del sonido.

- Fabricación de tapetes o losas piezoeléctricas que son utilizadas e instaladas en lugares altamente concurridas por peatones con el fin de recolectar las pisadas de las personas y de esta manera generar corriente eléctrica.

2.1. Historia

El efecto piezoeléctrico fue observado y descubierto en 1880 por los hermanos Pierre y Jacques Curie, ellos se basaron en el estudio de la compresión del cuarzo cuyo proceso consistía en someter dicho material a la acción mecánica de la compresión, que genera una separación de cargas de la materia con lo cual se logra una polarización de la carga que ocasiona un salto de chispas. Pasaron varios años para que se le diera una aplicación útil a estos materiales y esto fue posible gracias a Paul Langevin que fue capaz de fabricar sonares durante la primera guerra mundial.

Langevin utilizó cristales de cuarzo uniendo masas metálicas con lo cual pudo inventar el transductor tipo Langevin para generar ultrasonido, pero debido a la alta tensión que estos transductores requerían se vio en la necesidad de buscar materiales piezoeléctricos sintéticos, pero no fue hasta la época de los 40 y 50 donde la cerámica piezoeléctrica tuvo su auge estas cerámicas piezoeléctricas fabricadas de Titanio de Bario por las entonces URSS y Japón y las cerámicas piezoeléctricas que fueron fabricadas de Titanio de Zirconato de plomo (PZT's) por los EUA. (Estados Unidos de América).⁸

Estas cerámicas piezoeléctricas fueron revolucionarias debido a que presentaban mejores propiedades después de ser polarizadas, actualmente las cerámicas piezoeléctricas PZT. En sus diversas variaciones son las cerámicas predominantes en el mercado.

⁸ Fuente: *ATCP Engenharia Fisica*. <http://www.atcp.com.br/>. Consulta: 18 de octubre de 2017.

2.2. Efecto piro-eléctrico

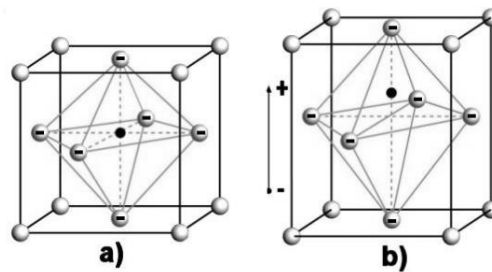
El efecto piro-eléctrico es la característica que tienen algunos materiales que al sufrir cambios por una alteración de temperatura son capaces de generar corriente eléctrica, para denotar la piroelectricidad en un material este tiene que presentar una polarización, esto indica que el material tiene que carecer de campo eléctrico externo, para que ocurra la piroelectricidad en los materiales la variación de temperatura debe variar de manera uniforme, esta variación se refiere al calentamiento o al enfriamiento de dicho material o simplemente el material será sometido a tensiones, con estas variaciones lo que se pretende lograr es un desplazamiento de los iones positivos con respecto a los iones negativos, obteniendo con esto una polarización del cristal.

Para efectos prácticos, para una lámina de un cristal polar, si se procede a variar la temperatura esto provocará una polarización eléctrica entre las dos caras de la lámina, el ángulo formado entre las dos caras de la lámina hacen variar la densidad de polarización eléctrica entre ambas caras, de manera que la máxima polarización se obtendrá en una lámina cortada perpendicularmente a la dirección de polarización del cristal.

La polarización espontánea de un sólido cristalino se da cuando un material carece de centro geométrico, es decir los centros de carga positiva y negativa no deben coincidir al nivel de celda unitaria, como representación de este fenómeno se mostrarán dos materiales: uno con centro geométrico y el otro sin centro geométrico, la variación entre estos dos materiales es el desplazamiento del ion positivo del centro de las cargas negativas, esto ocasiona un momento dipolar eléctrico en la célula unitaria, la polarización se da a niveles macroscópicos de los materiales y consiste en la suma de estos momentos dipolares por unidad de volumen.

A continuación se muestra la diferencia entre un material con centro geométrico y uno sin centro geométrico.

Figura 9. **Representación de un material con centro geométrico (a) y material sin centro geométrico (b)**



Fuente: ATCP del Brasil, soluciones piezoeléctricas.

La representación de la piroelectricidad en relación al diferencial de temperatura se da en la siguiente ecuación:

$$\Delta P = \gamma \cdot \Delta T$$

Dónde:

ΔT = constante en todo cristal

ΔP = incremento de la polarización eléctrica

γ = dirección del vector determinado por los grupos polares

2.3. Efecto electro-estrictivo

Este efecto se da en los materiales piezoeléctricos y es de suma importancia saber de qué se trata.

El efecto electro-estrictivo se da cuando se aplica un campo eléctrico a un material dieléctrico, la aplicación de este campo eléctrico ocasiona una deformación que es proporcional al cuadrado de la intensidad del campo

eléctrico aplicado, la electrostricción es un efecto cuadrático y la deformación electro-estrictiva no está relacionada a la señal de campo eléctrico aplicado, de hecho, la electrostricción es simplemente el resultado de la polarización que se induce durante la aplicación del campo y debido a esto la deformación electro-estrictiva es proporcional al cuadrado de la polarización.

La diferencia entre el efecto piezoeléctrico y el electro-estrictivo está definido por tres factores fundamentales entre ellos se pueden mencionar: El efecto electro-estrictivo que se refiere a la deformación proporcional al cuadrado de la polarización independientemente si el campo eléctrico tiende a ser negativo o positivo, la deformación siempre se dará en la misma dirección, el segundo factor fundamental se refiere al efecto piezoeléctrico que indica la deformación lineal con la polarización y por último la deformación del material (estiramiento o compresión).

Si por ejemplo queremos usar un material piezoeléctrico como actuador es común caracterizarlo por el método estático en otras palabras aplicándole un campo eléctrico en una dirección específica del material y midiendo la deformación en las diferentes direcciones, debido a esto en esta caracterización se pueden dar los dos efectos (piezoeléctrico y electro-estrictivo) lo cual provocará errores al momento de determinar los coeficientes piezoeléctricos, sabiendo esto podemos comprobar este problema aplicando una alta temperatura al material la cual debe ser por encima de la temperatura de transición esto se hará para poder eliminar la polarización instantánea y poder dejar el materia como un dieléctrico común, ya en estas condiciones se le puede aplicar un campo eléctrico externo y se mide la deformación para proceder a conocer las componentes electro-estrictivas.⁹

2.4. Efecto electro-óptico

Algunos materiales piezoeléctricos presentan el efecto electro-óptico entre ellos se encuentra:

⁹ Fuente: ZAMBRANO, Michael. *Materiales y dispositivos piezoeléctricos documento 1*. p. 15.

- Cristales
- Cerámicas transparentes
- Electro-óptico polimérico

La clasificación de estos materiales se da en base a la simetría debido a que pueden ser clasificados en la siguiente forma:

- Ópticamente isotrópicos
- Ópticamente aniso-trópicos

Este efecto consiste básicamente en el reordenamiento a nivel atómico en la presencia de un campo eléctrico aplicado a un material provocando de esta manera cambios en las propiedades ópticas del material, los materiales que presentan estas características ópticas son los materiales o cristales conocidos como birrefringentes que sería igual a decir un material aniso-trópico, que presenta diferentes velocidades de propagación de la luz dependiendo del plano de la polarización y de la dirección de polarización que inciden a través del material.

2.4.1. Material ópticamente isotrópico

Para que un material sea isotrópico se debe de cumplir que tanto las propiedades mecánicas así como las térmicas sean las mismas en todas las direcciones, esto se refiere a que un material pueda ser deformado con la misma facilidad tanto hacia arriba como hacia abajo, los materiales isotrópicos deben de tener estructuras homogéneas o no homogéneas, un claro ejemplo de esto es el acero, este material muestra comportamiento isotrópico aun no conteniendo una estructura homogénea y esto se debe a que la resistencia de

estos materiales no depende, de la dirección en la cual son aplicadas las cargas.

Como muestra de otro ejemplo se puede mencionar las cerámicas ferro-eléctricas no polarizadas, estando en el rango visible del espectro electromagnético donde la permisibilidad eléctrica debe ser:

$$(\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0)$$

Dónde:

ϵ_r = *permitividad del medio*

ϵ_0 = *permitividad eléctrica*

Las propiedades ópticas de una sustancia se puede ver afectada al ser aplicada una tensión mecánica de forma externa en la cual el efecto de foto-elasticidad que comúnmente es conocido como efecto elasto-óptico o también como piezo-óptico y lo más importante es la ocurrencia que tiene en los cristales y materiales piezoeléctricos, y suponiendo que un material no pertenezca al grupo de materiales centro-simétricos o piezoeléctricos, los índices de refracción se ven afectados por algún campo eléctrico de manera externa y por ende a esto se le llama efecto electro-óptico.

Entre las divisiones del efecto electro-óptico se encuentran dos efectos significativamente importantes que se muestran a continuación:

Efecto electro-óptico lineal $\frac{1}{n^2} \propto E$

Efecto electro-óptico cuadrático $\frac{1}{n^2} \propto E^2$

Dónde:

E = campo eléctrico

n = índice de refracción óptica

Entre algunas aplicaciones que se le da al efecto electro-óptico se pueden mencionar las siguientes:

- Guías de ondas integradas
- Deflector de haces de luz
- Multiplicador de frecuencia óptica
- Hologramas

Y entre los materiales isotrópicos se pueden mencionar los siguientes:

- Acero
- Aluminio
- Hormigón
- Hormigón armado

2.4.2. Materiales ópticamente aniso-trópicos

Un material es aniso-trópico cuando sus propiedades dependen de la orientación según se hace la medición de ellas.

Una forma de entender que es anisotropía es por ejemplo tratar de cortar un material en direcciones diferentes y si el resultado es igual de fácil en ambas direcciones el material es isótropo, de lo contrario el material será aniso-trópico.

Otra forma de ver si un material es aniso-trópico es por ejemplo observar si el grafito y la pizarra es exfoliable, en el caso del diamante y el grafito es un ejemplo muy claro de cómo las condiciones de formación influyen en las características de un material, y debido a que estos materiales están formados por átomos de carbono pero con características físicas muy distintas.

Con lo anterior se puede decir que un cuerpo o material aniso-trópico está constituido por sus propiedades distribuidas en todas direcciones y en cualquier punto, esto se refiere a que no hay puntos de simetría de las propiedades de dicho material, y las propiedades del material están en función de la dirección de un punto determinado.

A continuación se presentan algunas cualidades de los materiales aniso-trópicos:

- Conductividad (térmica y electrónica)
- Constantes elásticas
- Crecimiento cristalino
- Magnetismo

El magnetismo y la conductividad son cualidades muy importantes al momento de seleccionar materiales adecuados para poder generar corriente eléctrica, con ello se puede elegir un material aniso-trópico que ayudará a un mejor funcionamiento del material al momento de recibir una compresión externa.

2.5. Algunos materiales piezoeléctricos

El fenómeno de la piezoelectricidad viene de la generación de electricidad en ciertos materiales que son sometidos a ciertos esfuerzos mecánicos, la

influencia de campo eléctrico en estos materiales hace mostrar a los materiales un efecto inverso, los materiales comúnmente conocidos son cristales naturales como:

- El cuarzo
- La turmalina
- La sal de Rochelle

Generalmente estos materiales han sido utilizados como transductores o como una aplicación electro-mecánica, el descubrimiento de las cerámicas piezoeléctricas fue muy importante, porque esto fue un paso importante para nuevas aplicaciones y una cualidad importante de estos materiales es que son químicamente inmunes a la humedad o cualquier otra condición atmosférica, y debido a su naturaleza cerámica se le puede dar cualquier forma o tamaño con su dirección de polarización la cual se elige libremente para lograr que el material cumpla todas las necesidades.

“Todos los materiales piezoeléctricos están relacionados bajo el nombre de “Pie-óxido” los cuales son una contracción del termino oxido piezoeléctrico a los cuales se refieren para abreviar PXE.”¹⁰

A continuación se muestran los diferentes tipos de materiales PXE

- PXE 3: Es una placa cerámica de titanato-zirconato de plomo con un coeficiente de acoplamiento de corte muy bajo.

¹⁰ Fuente: Universidad Tecnológica Nacional. *Materiales piezoeléctricos y efecto piezoeléctrico*. p. 11.

- PXE 4: Es una placa cerámica de titanato-zirconato plomo mejorado que es aplicable en la fabricación de transductores resonantes y generadores de alta tensión.
- PXE 5: Es una placa cerámica de titanato-zirconato, posee un factor de acoplamiento elevado y una muy buena sensibilidad de carga.
- PXE 7: Es similar al PX3, pero con mejores características de estabilidad.
- PXE 10: Posee una constante dieléctrica muy alta, aplicado para funciones mecano-eléctricas.
- PXE 11: Posee una constante de frecuencia muy alta y debido a esta característica es el material ideal para los transductores de muy alta frecuencia, una frecuencia que oscila entre: (10 - 1 000Mhz).

A continuación se muestra una tabla de parametros característicos de estos materiales.

Figura 10. **Parametros característicos de los materiales anteriormente descritos**

| Cantidades y Símbolos | Unidad | PXE 3 | PXE 4 | PXE 5 | PXE 7 | PXE 10 | PXE 11 | |
|---|-------------------------------|-------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Datos Mecánicos | | | | | | | | |
| Masa Específica ρ | 10^3 Kg/m^3 | 7.8 a 7.95 | 7.45 a 7.55 | 7.55 a 7.65 | 7.6 | 7.6 | 4.5 | |
| Módulo de Elasticidad | Y_{11}^E | 10^{11} N/m^2 | 0.88 | 0.77 | 0.65 | 0.82 | 0.58 | 1.2 |
| | Y_{33}^E | | 0.79 | 0.79 | 0.59 | - | - | - |
| | Y_{55}^E | | 0.27 | - | 0.26 | 0.28 | - | 0.41 |
| Calor Específico | $\text{J/Kg } ^\circ\text{C}$ | 420 | 420 | 420 | 420 | 420 | 420 | |
| Conductividad del Calor | $\text{W/m } ^\circ\text{C}$ | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | |
| Compresión | | > 6 | > 6 | > 6 | > 6 | > 6 | > 6 | |
| Tensión | 10^8 N/m^2 | ≈ 0.8 | ≈ 0.8 | ≈ 0.8 | ≈ 0.8 | ≈ 0.8 | ≈ 0.8 | |
| Flexión | | ≈ 1.0 | ≈ 1.0 | ≈ 1.0 | ≈ 1.0 | ≈ 1.0 | ≈ 1.0 | |
| Constante de Poisson σ | | Numerica | ≈ 0.3 | ≈ 0.3 | ≈ 0.3 | ≈ 0.3 | ≈ 0.3 | ≈ 0.3 |
| Datos Eléctricos | | | | | | | | |
| Temperatura Curie (temperatura de transición) | $^\circ\text{C}$ | 395 | 265 | 285 | 320 | 185 | 400 (195) | |
| Constante Dieléctrica Relativa | ϵ_{33}^{T/E_0} | Numerica | 570 | 1500 | 1750 | 680 | 3000 | 450 |
| | ϵ_{11}^{T/E_0} | | 900 | - | 1800 | 1050 | - | 600 |
| Resistividad Volumétrica ρ_{el} (25 $^\circ\text{C}$) | Ωm | 10^{12} | 10^{11} | 10^{14} | - | - | - | |
| Constante de Tiempo $\rho_{el}\epsilon_{33}^T$ (25 $^\circ\text{C}$) | Minutos | > 30 | > 30 | > 300 | - | - | - | |
| Disipación Dieléctrica, Factor $\tan \delta$ ($\times 10^{-2}$) | Numerica | 0.5 | 0.6 | 2.0 | 2.0 | 3 | 2.5 | |
| Datos Electro - Mecánicos | | | | | | | | |
| Factores de Acoplamiento | k_P | Numerica | 0.52 | 0.55 | 0.62 | 0.53 | 0.65 | 0.73 |
| | k_{31} | | 0.30 | 0.32 | 0.36 | - | 0.38 | 0.25 |
| | k_{33} | | 0.65 | 0.68 | 0.70 | - | - | - |
| | k_{15} | | 0.71 | - | 0.66 | 0.66 | - | 0.65 |
| Constantes de Carga Piezoeléctrica | d_{31} | 10^{-12} C/N | -74 | -141 | -178 | -84 | -275 | -44.5 |
| | d_{33} | | 166 | 265 | 356 | - | - | - |
| | d_{15} | | 385 | - | 515 | 350 | - | 235 |
| Constante de Voltaje Piezoeléctrico | g_{31} | 10^{-3} Vm/N | -14.8 | -9.4 | -11.3 | -14.0 | -9.1 | -11.2 |
| | g_{33} | | 34.5 | 20.0 | 23.2 | - | - | - |
| | g_{15} | | 48.5 | - | 32.5 | 44.2 | - | 44.0 |
| Factor de Calidad Mecánica $(Q_m^E)_P$ para modo radial | Numerica | 300 | 500 | 80 | Abt. 80 | Abt. 80 | 270 | |
| Constantes de Frecuencia | N_p^E | Hz.m o m/s | 2300 | 2200 | 2000 | 2250 | 1900 | 3600 |
| | N_1^E | | 1680 | 1620 | 1460 | 1640 | 1390 | 2650 |
| | N_3^E | | 1560 | 1610 | 1390 | - | - | - |
| | N_5^E | | 930 | - | 930 | 970 | - | 1500 |

Fuente: Materiales piezoeléctricos.

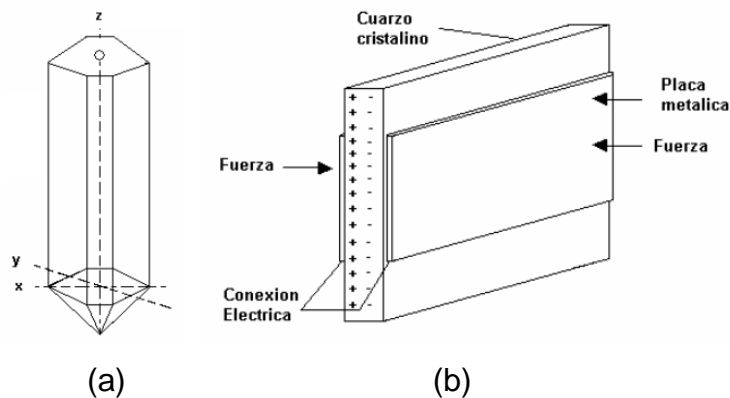
www.frm.utn.edu.ar/tecnologiae/apuntes/piezolectricidad.pdf. Consulta: 18 de octubre de 2017.

2.5.1. Cristales de cuarzo

Este material tiene propiedades piezoeléctricas pero también tiene una característica poco usual, si por ejemplo se cortara un pedazo delgado de este material (cuarzo), y se somete a una tensión eléctrica a través de sus dos caras, el material tiende a entrar en un estado de vibración mecánica y de este efecto nace la piezoelectricidad, en este cristal que se refiere al intercambio de energía eléctrica a energía mecánica y viceversa, los cristales naturales exhiben propiedades piezoeléctricas, más sin embargo, el cuarzo sintético es utilizado más ampliamente para el control de frecuencias en los osciladores.

Los cortes en los cristales de cuarzo en la naturaleza son de forma hexagonal con terminaciones en punta, si se le quitara una sección transversal al cristal de cuarzo y tratando que los lados de ambas caras sean perpendiculares a un eje eléctrico, esto producirá una carga eléctrica en el eje coordenado "Y", por lo tanto debido a que la tensión cambia de compresión a tensión y viceversa, esto ocasiona que la polaridad se invierta.

Figura 11. **a) Corte de cristal de cuarzo, b) Aplicación de fuerzas en las caras del cristal para obtener el efecto piezoeléctrico**

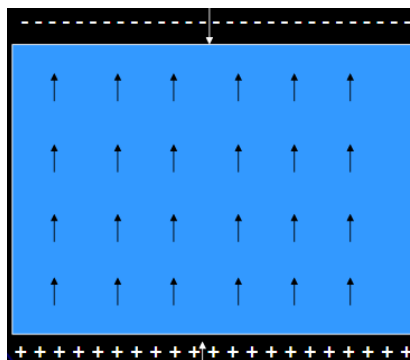


Fuente: *cristales de cuarzo y efecto piezoeléctrico*. www.solecmexico.com/. Consulta: 18 de octubre de 2017.

2.5.2. Mono-cristales piezoeléctricos

El mono-cristal se da cuando el arreglo cristalino es perfecto y quiere decir que se extiende completamente a lo largo del sólido sin interrupción alguna, cuando un mono-cristal es perfecto es debido a que todas las celdas unitarias están unidas de la misma manera, y también poseen la misma orientación o dirección, los mono-cristales pueden ser naturales o artificiales.

Figura 12. Dirección de las celdas cuando se tiene un mono-cristal



Fuente: *Materiales piezoeléctricos y piro-eléctricos*. www.slideplayer.es/slide/1661316/.

Consulta: 19 de octubre de 2017.

2.5.3. Semiconductores piezoeléctricos

Entre los materiales semiconductores piezoeléctricos se pueden mencionar el Silicio (Si) y el Germanio (Ge), pueden existir materiales compuestos entre ellos se encuentra: Carburo de Silicio (SiC), Nitruro de Galio (GaN) y sus derivados, la característica principal de estos semiconductores es que son semiconductores de banda prohibida angosta excepto en GaN.

En la actualidad se han desarrollado investigaciones al Óxido de Zinc (ZnO), debido a que es un semiconductor ópticamente transparente en la región del visible infrarrojo cercano del espectro electromagnético, el principal interés radica en las propiedades de este semiconductor entre ellas se encuentran:

- Opto-eléctricas
- Piezo-electrónicas
- Piezo-ópticas

El uso principal de estos materiales se ha dado en la fabricación de ventanas en celdas solares, sensores de gas, lubricantes sólidos a alta temperatura, en motores de turbina de gas y dispositivos electrónicos.

2.5.4. Cerámicas piezoeléctricas

La característica de la conversión de la energía mecánica en energía eléctrica se da principalmente en los materiales cerámicos piezoeléctricos, este material es extremadamente fundamental en generación de energía eléctrica para poder alimentar sistemas eléctricos.

Generalmente la cerámica está compuesta por cristales finos y cada cristal está compuesto por átomos que poseen carga negativa o positiva, dentro de esta clasificación hay cerámicas dieléctricas llamadas “ferro-eléctricas” son portadoras de cargas positivas y negativas, esto significa que poseen cargas eléctricas sesgadas (polarización instantánea).

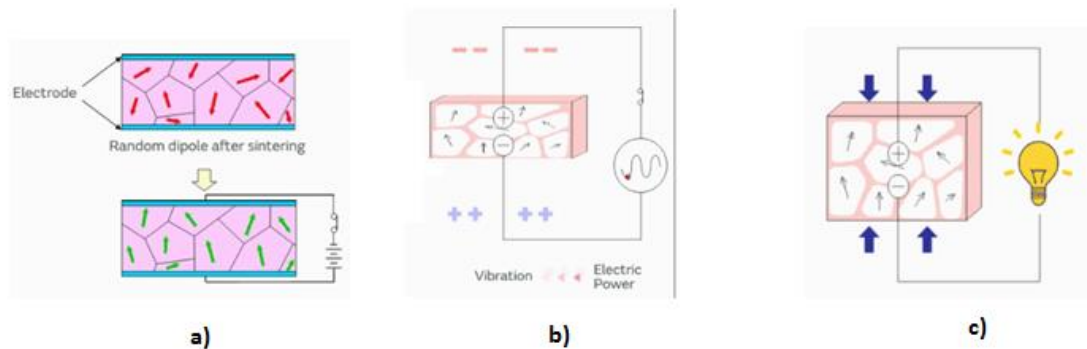
Al aplicarle un disparo la cerámica ferro-eléctrica desarrollará una polarización instantánea con ejes polares aleatorios, que indicará que una cerámica poseerá cargas balanceadas tanto positivas como negativas, mas sin

embargo si se aplica una tensión alta al material los ejes polarizados con la polarización instantánea se alineará en dirección uniforme y debido a esto resulta imposible que se cancelen.

Si por ejemplo este proceso de polarización se le aplica a la cerámica ferro-eléctrica el resultado será la obtención de un material cerámico piezoeléctrico, la aplicación de tensión a este material provoca la atracción o repulsión de las cargas positivas y negativas en base a las cargas eléctricas externas, lo que provoca una expansión o compresión de la cerámica.

Pero aún más importante es la aplicación de una presión a la cerámica piezoeléctrica esto provocará una generación de cargas eléctricas positivas y negativas en la cara opuesta a la cual ha sido aplicada la presión, y si por el contrario no se le aplicará una presión sino una tracción esto ocasionará una inversión de polaridad de cargas eléctricas, la aplicación de una presión a este tipo de material permite la conversión de energía mecánica a energía eléctrica, esta es altamente utilizada en la fabricación de baldosas piezoeléctricas capaces de generar electricidad para que pueda ser utilizada instantáneamente o almacenada.

Figura 13. **a) Polarización de la celulas aplicando una tensión,**
b) Generación de corriente eléctrica y alineación de las
celulas, c) Generación de corriente eléctrica aplicando
compresión al material.



Fuente: <https://www.murata.com/products/timingdevice/ceralock/basic/description>. Consulta: 19 de octubre de 2017.

2.5.5. Polímeros piezoeléctricos

La búsqueda de nuevos materiales piezoeléctricos ha llevado al ser humano al descubrimiento de los polímeros piezoeléctricos, estos polímeros son 10 veces más potentes que los materiales piezoeléctricos clásicos, esta innovación de polímeros hará posible su uso en nuevas aplicaciones como por ejemplo en el sector de transporte y aeronáutico solo por mencionar algunos, haciendo una comparación entre los materiales piezoeléctricos cerámicos clásicos tipo perovskita (cerámicas de titanato de zirconio y plomo) y los polímeros piezoeléctricos, se presenta la siguiente tabla comparativa

Tabla II. **Comparación de polímeros piezoeléctricos contra cerámicas piezoeléctricos**

| | Polímeros piezoeléctricos | Cerámicas piezoeléctricas |
|-------------|---|----------------------------------|
| Ventaja | Mayor elasticidad que las cerámicas | Alto módulo de elasticidad |
| Ventaja | Mejores aplicaciones acústicas. | Aplicaciones acústicas |
| Ventaja | Mayor constante dieléctrica en comparación con las cerámicas. | Elevada constante dieléctrica. |
| Ventaja | Mayor deformación, fragilidad y menor densidad de masa. | |
| Desventajas | | Baja deformación |
| Desventajas | | Fragilidad |
| Desventajas | | Alta densidad de masa |

Fuente: elaboración propia.

Como se puede apreciar en la tabla II, los polímeros piezoeléctricos son mucho más eficientes que las cerámicas piezoeléctricas, pero aun así, el único polímero piezoeléctrico que actualmente circula en el mercado es el polifluoruro de vinilideno (PVDF), una propiedad muy importante en este polímero es la característica de presentar muy buenas propiedades piezoeléctricas a una temperatura de 90°C, el objetivo final de esto es la obtención de polímeros piezoeléctricos denominados polímeros piezoeléctricos amorfos, que mantengan sus propiedades piezoeléctricas a más temperatura con la finalidad de aplicarlos en temperaturas extremas pero esto aún es una visión al futuro.

Estos polímeros piezoeléctricos amorfos han sido objetivo de experimentos en los cuales se ha podido demostrar que la estabilidad piezoeléctrica de estos materiales es a una temperatura de 150°C y teniendo un

límite de degradación a los 400°C, que significa que a esta temperatura estos materiales pierden sus propiedades piezoeléctricas.

2.5.6. Compuestos piezoeléctricos

Los materiales piezoeléctricos compuestos son llamados así debido a que contienen o están constituidos por una fase activa piezoeléctrica y una fase no activa, esto condiciona las propiedades de dichos sistemas compuestos.

2.5.6.1. Propiedades de los materiales compuestos piezoeléctricos

Las propiedades de los materiales compuestos piezoeléctricos se basan en el resultado de la interconexión de las fases.

2.5.6.1.1. Propiedades suma

Este tipo de propiedad dentro de los materiales compuestos piezoeléctricos se refiere a la constante dieléctrica del material en el que se debe cumplir el siguiente parámetro:

- Siempre $A_1 < C < A_2$

Y para poder obtener la propiedad de la componente se tienen:

$$C = nA_1 + (1 - n)A_2$$

Y la asociación es:

$$\frac{1}{K} = \frac{n_1}{k_1} + \frac{n_2}{k_2}$$

Y la asociación paralela es:

$$K = n_1 k_1 + n_2 k_2$$

Al tomar en cuenta un material con constante dieléctrica se tendrá como resultado lo siguiente:

$$\log k = n_1 \log k_1 + (1 - n_1) \log k_2$$

Dónde:

A_i = propiedad del material

C = componente del material compuesto

n = es la proporción del componente 1 en (%)

k = constante dieléctrica resultante

2.5.6.1.2. Propiedades combinación

Esta propiedad es del mismo tipo de las componentes "C", pero su valor puede estar fuera del intervalo definido en la propiedad suma, esto significa que puede ser menor que la componente menor y mayor.

2.5.6.1.3. Propiedades producto

Haciendo una combinación de diferentes propiedades se puede obtener en algunas ocasiones propiedades diferentes lo cual significa la obtención de propiedades que no existen en ninguno de los componentes.

Tabla III. **Combinaciones de propiedades producto**

| Combinación | Resultado |
|---|----------------------|
| Dilatación térmica + conductividad eléctrica. | Termistor |
| Magnetostricción + piezoelectricidad | Magneto-electricidad |
| Efecto hall + conductividad térmica | Magneto-resistencia |
| Piezoelectricidad + dilatación térmica | piroelectricidad |

Fuente. elaboración propia.

La conectividad dentro de los materiales compuestos se entiende como la continuidad de las fases compuestas a través del material y que asoman al exterior de una muestra, según las direcciones (x, y, z) del espacio.

3. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS

Las propiedades de los materiales piezoeléctricos son de suma importancia debido a su clasificación en el manejo de alta potencia a estos se les conoce como “*Hard*”, también están los materiales de alta sensibilidad denominados “*Soft*”.

3.1. Constantes principales de los materiales

En el mercado actual hay muchos materiales piezoeléctricos disponibles que van desde el cuarzo hasta el Titanio de Bario, también se puede mencionar el Zirconato Titanato de Chumbo (PZT's), estos son equivalentes entre sí, pero debido a las diferentes especificaciones de las empresas fabricantes es muy importante saber un patrón de clasificación o un método de selección que ayude a escoger un material, que se acople a las necesidades de aplicación que se requieran.

Las constantes de los materiales piezoeléctricos determinarán las características de uso y aplicación, por eso se hará un estudio de cada constante que definirá si dicho material es utilizable en la aplicación deseada.

Entre las constantes de los materiales piezoeléctricos están los siguientes:

- Constante de carga piezoeléctrica
- Constante de tensión piezoeléctrica
- Coeficiente de acoplamiento
- Factor de calidad mecánico
- Factor de disipación eléctrica
- Temperatura de Curie

- Constante de frecuencia
- Impedancia acústica

3.1.1. Constante de carga piezoeléctrica

La constante de carga piezoeléctrica se divide en los siguientes puntos:

- Esta constante de carga a la cual se le denomina por la letra d_{ij} su función principal es informar cual 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 Coulomb) y la fuerza aplicada en el material, y está dada en (Newtons). Y los índices i y j se describen de la siguiente manera:
 - Tomando en cuenta que el índice “ i ” significa la dirección del campo eléctrico/fuerza aplicada y el índice “ j ” indica la dirección en que está siendo medida la deformación/carga eléctrica, para lo cual los valores de “ i ” y “ j ” toman los siguientes valores según su eje coordenado:
 - Eje coordenado X toman valores de 1
 - Eje coordenado Y toman valores de 2
 - Eje coordenado Z toman valores de 3
- Las unidades de medida de esta constante están dadas en:
 - m/V (metros/Volt)
 - C/N (Coulomb/Newton)

- Los valores típicos aplicados para cerámicas piezoeléctricas PZT son:
 - De 0,2 a 8 Angstrom (10^{-10} metros) por Voltio aplicado
 - De 20 a 800 pico Coulomb por Newton aplicado
- El lugar de aplicación podría ser en proyectos de posicionadores piezoeléctricos y sensores de fuerza/deformación.

3.1.2. Constante de tensión piezoeléctrica

La constante de tensión piezoeléctrica se divide en los siguientes puntos:

- Esta constante se identifica por la letra g_{ij} , y tiene como principal función informar sobre el diferencial de potencial generado (en Voltios) y la fuerza aplicada en (Newton) para una cerámica de compresión de 1 metro.
- Las unidades de medida de esta constante están dadas por los siguientes parametros:
 - Vm/N (Volts x metro/Newton)
- Los valores típicos para una cerámica piezoeléctrica PZT considerando una dimensión del eje en cuestión de 1 metro.
 - De 1 a 60 Voltios para cada Newton aplicado
 - Hay que tomar en cuenta que disminuyendo la dimensión de la cerámica o aumentando la fuerza, el módulo de la tensión generada también aumentará.

- El lugar de aplicación que determina esta constante indica que puede ser utilizado en detonadores de impacto.

3.1.3. Coeficiente de acoplamiento

El coeficiente de acoplamiento se divide en los siguientes puntos:

- Esta constante se identifica por la letra K_{ij} y hace un análisis de la conversión de energía mecánica a energía eléctrica o de energía eléctrica a mecánica, esto dependiendo del tipo de material piezoeléctrico utilizado y la magnitud de fuerza aplicada, este coeficiente de acoplamiento es capaz de determinar la cantidad de transducción o conversión de cuanta cantidad de energía mecánica es transformada en energía eléctrica, en otras palabras, este coeficiente de acoplamiento mide la eficiencia del material en el proceso de conversión.
- Este coeficiente es adimensional lo cual indica magnitud de dimensión 1 y hace ver que no tiene una magnitud física asociada
- Los valores típicos de este coeficiente son:
 - De 0,02 (equivale a 2% de eficiencia) a 0,75 (equivalente a 75% de eficiencia),
- El lugar de aplicación podría ser en un control de calidad de cerámicas piezoeléctricas o en un proyecto donde una vibración o deformación en un eje no genere cargas o diferencias de potencial en otro eje. El coeficiente de acoplamiento dice que a menor factor de acoplamiento el material será un mejor conversor de energía ya sea mecánica o eléctrica.

3.1.4. Factor de calidad-mecánico

El factor de calidad mecánico se divide en los siguientes puntos:

- Este factor está asociado a la letra “Q” cuyo factor es utilizado para indicar una medida que esté relacionada con la disminución mecánica (amortiguamiento) del material. El factor de calidad en los circuitos cuyos elementos son pasivos como la resistencia, bobinas y condensadores es bajo y oscila alrededor de 100, debido al efecto de la resistividad. En los cristales que son resonadores piezoeléctricos llegan a valores de Q de varios miles. En caso de tener un valor alto de Q, esto significa una resistencia pequeña y por ende se tendrá un comportamiento parecido a la bobina ideal.

Las ecuaciones que describen este factor se dan a continuación:

$$Q = \frac{2\pi \text{ Energía máxima almacenada por ciclo}}{\text{Energía disipada por ciclo}}$$

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} = \frac{f_0}{\Delta f}$$

Dónde:

Q = factor de calidad mecánico

f_0 = frecuencia de resonancia

$f_1 - f_2$ = Ancho de banda

Δf = diferencia de frecuencia, ancho de banda

- Este factor es adimensional
- Los valores típicos de este factor son:
 - De 50 a 1 500, para cerámicas piezoeléctricas PZT
- La utilización se daría en proyectos de dispositivos dinámicos de alta potencia.

3.1.5. Factor de disipación dieléctrica

El factor de disipación dieléctrica se divide en los siguientes puntos:

- Este factor está definido por $Tan \delta$ y define a un dieléctrico como un material que no es apto para la conducción de la electricidad y por esta característica es muy utilizado como aislante eléctrico y sometido a campo eléctrico externo y debido a esto, si por ejemplo, al aplicar una corriente altera (CA) a un dieléctrico perfecto, el efecto de la corriente que tiene sobre el voltaje es adelantarlo 90° , y es esta parte en donde se da la perdida de corriente y la corriente adelantará al voltaje a razón de $(90^\circ - \delta)$, pero cuando la corriente y el voltaje están fuera de fase en el ángulo de perdida dieléctrica, provocará una perdida en la potencia eléctrica en forma de calor.

A continuación se muestran las ecuaciones que describen el factor de disipación.

$$FD = Tan \delta$$

$$FD = K Tan \delta$$

Dónde:

FD = factor de disipacion y factor de perdida dielectrica

Tan = Tangente

K = constante de los materiales dielectricos

A continuación se muestran diferentes valores de K para los materiales dieléctricos

Tabla IV. **Constante dieléctrica de algunos materiales**

| Materiales dieléctricos | K |
|--------------------------------|------------------|
| Vacío | 1,0 |
| Aire | 1,1 |
| Teflón | 2,1 |
| Polietileno | 2,25 |
| C_6H_6 | 2,28 |
| PET | 3,1 |
| SiO_2 | 3,9 |
| Papel | 4 - 6 |
| Al_2O_3 | 5,9 |
| TiO_3 | 100 |
| $BaTiO_3$ | 100 ¹ |
| PMN | 1 000 |

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Constante_diel%C3%A9ctrica. Consulta: octubre de 2017.

- Es adimensional
- Los valores típicos de este factor oscilan entre:

2×10^{-3} a 25×10^{-3} para cerámicas piezoeléctricas PZT.

- La utilización se puede dar en proyectos de dispositivos dinámicos de alta potencia y sometidos a altos campos eléctricos.

3.1.6. Temperatura de Curie

Este parámetro se divide en los siguientes puntos:

- El descubrimiento de la piezoelectricidad fue hecho por Pierre Curie junto a su hermano Jacques, con esto establecieron que la susceptibilidad magnética de las sustancias paramagnéticas depende del inverso de la temperatura es decir que las propiedades magnéticas cambian a razón del aumento de la temperatura. Este parámetro está definido por T_c , el efecto de esta temperatura sobre la constante dieléctrica indica lo siguiente:
 - Que por encima de la temperatura Curie crítica, tanto el comportamiento ferro-eléctrico como el dieléctrico dejan de existir dando paso al comportamiento térmico y por eso se pierden las propiedades piezoeléctricas.
 - Y que por debajo de la temperatura Curie crítica siempre predominará el comportamiento eléctrico y las propiedades piezoeléctricas no se perderán.

A continuación se muestran algunos materiales que pasan de ser magnéticos a no magnéticos debido a la temperatura.

Tabla V. **Nivel de temperatura en la cual los materiales dejan de tener propiedades piezoeléctricas**

| Material | Temperatura | Resultado |
|-----------------|--------------------|-----------------------|
| Cobalto | 1 127°C | Material no magnético |
| Hierro | 768°C | Material no magnético |
| Níquel | 357°C | Material no magnético |
| Gadolinio | 17°C | Material no magnético |

Fuente: elaboración propia.

- La temperatura de Curie tiene como magnitud física los grados Celsius.
- Los valores típicos de temperatura para las cerámicas piezoeléctricas PZT, en la que pierden sus propiedades piezoeléctricas están en el rango de 150 a 350°C
- El uso que se le puede dar es en la utilización de un proyecto donde requieran materiales que deberán funcionar a altas temperaturas y de alta potencia.

3.1.7. Constante de frecuencia

La constante de frecuencia se divide en los siguientes puntos:

- Esta constante está determinada por el parámetro N_k , este factor es de suma importancia debido a que con él se puede hacer una estimación de la frecuencia de resonancia necesaria para los dispositivos piezoeléctricos, como ejemplo podemos decir que se usa muy ampliamente para estabilizar osciladores de radiofrecuencias y construir relojes de gran precisión.

- La unidad física con la que se identifica la constante de frecuencia es el Hz.m (Hertz x metro).
- Los valores típicos de frecuencia de este parámetro para materiales cerámicos PZT oscilan entre:
 - 800 a 3 000 Hz.m
- El uso que se le puede dar es en el diseño de dispositivos que funcionan en resonancia.

3.1.8. Impedancia acústica

La impedancia acústica está dividida en los siguientes puntos:

- Este parámetro se identifica con la letra Z, esta impedancia es una característica del medio que mide la oposición o inercia de este a que se propague la onda sonora, hablando en la rama de los materiales piezoeléctricos esta impedancia mide la eficiencia con que la señal es capaz de propagarse en los materiales. La impedancia acústica está dada por la siguiente ecuación:

$$Z = \rho \cdot c$$

Dónde:

ρ = es la densidad del aire

c = la velocidad de propagación del aire

- La unidad de medida que acompaña a la impedancia acústica es el MRayls ($\text{kg} / \text{m}^2\text{s}$)
- Los valores típicos para la impedancia acústica están dados por el rango de 25 a 40 MRayls para cerámica piezoeléctrica PZT
- El modo de utilización se puede dar en proyectos que requieran emitir o captar ultrasonido/vibraciones mecánicas.

3.2. Clasificación de los materiales piezoeléctricos de acuerdo a su propiedad y aplicación

Para poder determinar una clasificación de los materiales piezoeléctricos como primer paso se debe estudiar la curva de histéresis de los materiales piezoeléctricos, debido a que dentro de esta curva se pueden clasificar estos materiales a razón del comportamiento de la curva.

3.2.1. Curva de histéresis

Esta curva enseña acerca de las propiedades magnéticas de los materiales ferromagnéticos usando un plano cartesiano donde el eje “Y” indica densidad de flujo magnético representado por la letra B , y el eje “X” representa la fuerza magneto-motriz representada por la letra H .

La curva de histéresis parte de un material desmagnetizado que esta denotado en la figura 13 y su punto de inicio lo indica la letra a , si se le aplica una excitación magnética o campo H creciente provocará una introducción de corriente a la bobina o material que se muestra en la figura 13a, esta corriente seguirá un camino como el que se indica en la figura 13b hasta alcanzar el

punto *b*, cuando por cualquier razón se hace disminuir la excitación magnética, esto ocasiona una reducción y la disminución del flujo magnético *B*, pero al momento de que esto sucede la desmagnetización no retrocede por el camino que siguió para llegar hasta *a*, sino que busca un camino diferente como el que se muestra en la figura 13*b*.

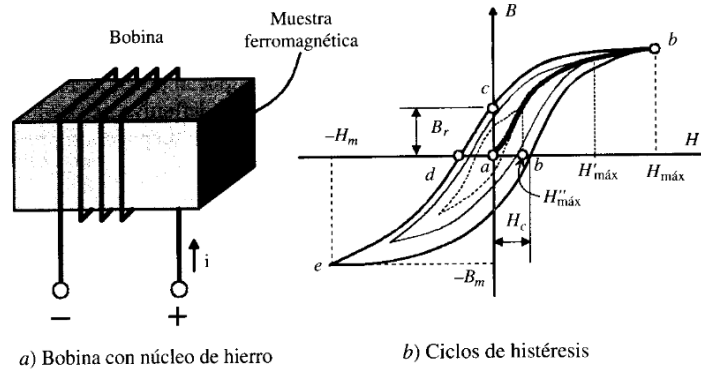
Esto se puede explicar debido a que al momento de volver *H* a cero persiste una cierta magnetización (punto *c*), a razón de esto al valor de *B* en ese punto se le conoce como magnetismo o inducción remanente y constituye el estado de magnetización permanente de la muestra.

El punto *d* determina el campo coercitivo que es el campo opuesto o el necesario que se debe aplicar para desmagnetizar el material al que le fue aplicado una excitación magnética (por inversión en el sentido de la corriente de la figura que representa la muestra, figura 13*a*). Si se continúa hasta un punto *e* y después se invierte el sentido de cambio *H*, se llegará a una forma de curva cerrada y se le conoce como curva de histéresis.

Esta histéresis, que en algunos materiales resulta de gran magnitud, es la que permite la existencia de imanes permanentes muy potentes, y debe de tener un magnetismo remanente intenso y una fuerza coercitiva importante.

A continuación se muestra la curva que representa la curva de histéresis de los materiales.

Figura 14. Ciclo de histéresis

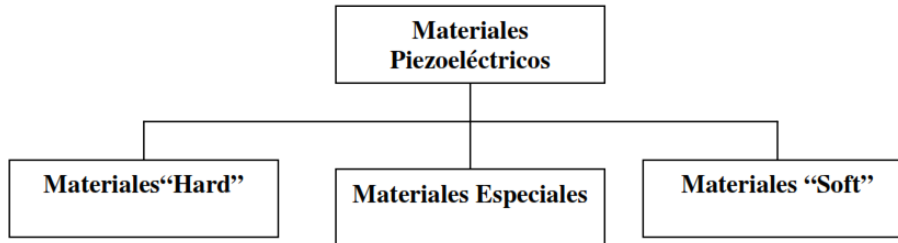


Fuente: MORA, Jesús Fraile. *Maquinas eléctricas*. p. 7.

3.2.2. Clasificación de los materiales piezoeléctricos

La clasificación de los materiales se basa en la curva de histéresis que ya ha sido estudiada, la principal clasificación de los materiales piezoeléctricos se da debido al área encerrada por la curva de histéresis, siendo clasificados como materiales “*Hard*” estos tienen una curva de histéresis cerrada y los materiales “*Soft*” que presentan una curva de histéresis abierta y por último están los materiales especiales que son identificados por cerámicas piezoeléctricas, dentro de ellos se puede incluir los mono-cristales.

Figura 15. **Clasificación de los materiales piezoeléctricos**



Fuente: *Soluciones piezoeléctricas ATCP do Brasil.*

<http://www.atcp.com.br/imagenes/productos/ceramicas/articulos/Documento-3.pdf>. Consulta: 22 de octubre de 2017.

Esta clasificación está normada por normas americanas que subdividen los materiales “*Hard*” y “*Soft*” en subgrupos como lo muestra la siguiente tabla.

Tabla VI. **Clasificación de los materiales de acuerdo a la norma americana DOD-STD-1376A (SH)**

| Propiedad | Navy I | Navy II | Navy III | Navy IV | Navy V | Navy VI |
|------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| K_{33}^T ($\pm 12,5\%$) | 1275 | 1725 | 1025 | 1275 | 2500 | 3250 |
| $\text{tg}(\delta)$ | $\leq 0,006$ | $\leq 0,020$ | $\leq 0,004$ | $\leq 0,010$ | $\leq 0,025$ | $\leq 0,025$ |
| k_p ($\pm 8\%$) | 0,58 | 0,60 | 0,50 | 0,30 | 0,63 | 0,64 |
| d_{33} (e-12 m/V) ($\pm 15\%$) | 290 | 390 | 215 | 140 | 495 | 575 |
| N_p (hz-m) ($\pm 8\%$) | 2200 | 1950 | 2300 | 3150 | 1950 | 1940 |
| ρ (g/cm ³) | $\geq 7,45$ | $\geq 7,60$ | $\geq 7,45$ | $\geq 5,50$ | $\geq 7,40$ | $\geq 7,40$ |
| Q | ≥ 500 | ≥ 75 | ≥ 800 | ≥ 400 | ≥ 70 | ≥ 65 |
| T_C (°C) | 325 | 350 | 325 | 115 | 240 | 65 |
| Tipo | Hard | Soft | Hard | Soft | Soft | Soft |

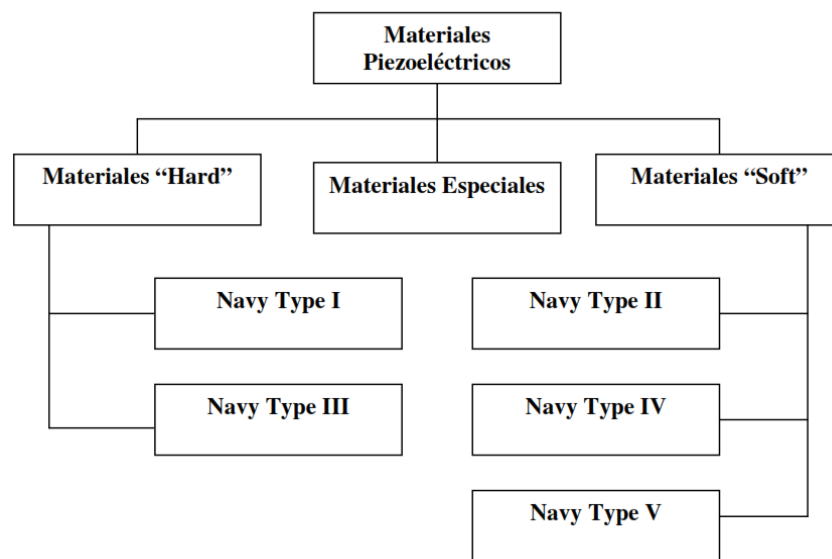
Fuente: *Soluciones piezoeléctricas ATCP do Brasil.*

<http://www.atcp.com.br/imagenes/productos/ceramicas/articulos/Documento-3.pdf>. Consulta: 22 de octubre de 2017.

3.3. División y características de los sub-grupos de los materiales piezoeléctricos

Los materiales “Hard” y “Soft” son divididos en intervalos según las características de los materiales, como lo muestra el esquema siguiente:

Figura 16. División en subgrupos de los materiales “Hard” y “Soft”



Fuente: *Soluciones piezoeléctricas ATCP do Brasil.*

<http://www.atcp.com.br/imagenes/productos/ceramicas/articulos/Documento-3.pdf>. Consulta: 22 de octubre de 2017.

Estos subgrupos tienen características propias que los hacen diferentes y utilizables para diferentes aplicaciones como se describe en los siguientes puntos:

- *Navy Type I “Hard”*
 - Recomendado para aplicaciones de media y alta potencia y es capaz de generar altas amplitudes de vibraciones manteniendo bajas pérdidas mecánicas y dieléctricas.
 - Las propiedades que lo identifican son:
 - $\text{Tan}\delta$
 - Q
 - Sus principales aplicaciones son: Sistemas de limpieza para ultrasonido y sonares. Conocido en el mercado como PZT4.

- *Navy Type II “Soft”*
 - Tiene alta sensibilidad, recomendado para dispositivos de transmisión y recepción de baja potencia, tiene como inconveniente la pérdida de características dieléctricas y mecánicas.
 - Las propiedades que lo identifican son:
 - N_k
 - T_c
 - Sus principales aplicaciones se dan en los hidrófonos y acelerómetros. Es conocido en el mercado como PZT5A.

- *Navy Type III “Hard”*
 - Tiene características parecidas al *Navy Type I*, con la diferencia que este es capaz de convertir el doble de potencia, manteniendo bajas las pérdidas mecánicas y dieléctricas.
 - Las propiedades que lo identifican son:
 - $\tan\delta$
 - Q
 - Conversión de máxima potencia.
 - Principalmente usado en soldadura por ultrasonido y procesamiento de materiales.

- *Navy type IV “Soft”*
 - Actualmente ya no es utilizado debido a que ha sido reemplazado por *Navy Type I*.
 - La propiedad que lo identifica es T_c .
 - Su uso principal es la manutención de equipamientos antiguos, conocido comercialmente como Titanio de Bario.

- *Navy Type V “Soft”*
 - Es utilizado para aplicaciones que requieran altas energías y diferencia de potencia.
 - La propiedad que lo identifica es “K”
 - Sus principales aplicaciones son: Detonadores de impacto, y es conocido en el mercado como PZT5J.

- *Navy Type VI “Soft”*
 - Es utilizado en aplicaciones que requieran grandes deformaciones mecánicas.
 - La propiedad que lo describe es “K”.
 - Puede ser utilizado en aplicaciones como posicionadores y actuadores, es conocido comercialmente como PZT5H.

3.4. Limitaciones de los materiales piezoeléctricos

En la elección de algún material cerámico piezoeléctrico es de suma importancia saber las limitaciones del mismo, sin embargo esto no garantiza un buen funcionamiento de la estabilidad y larga vida útil en el dispositivo en el que será utilizado debido a que puede ser dañado por alguna falla muy grande y los materiales se destruyan totalmente, es de suma importancia tener conocimientos de las limitaciones que los materiales puedan tener en determinada aplicación evitando de esta manera re-proyectos que

ocasionaran gastos innecesario. Entre las limitaciones que existen en los materiales cerámicos piezoeléctricos están los siguientes: envejecimiento natural, inestabilidad de las propiedades en función de variaciones de temperatura y límites de excitación eléctrica y mecánica.

- Envejecimiento natural: Dentro de este parámetro también se pueden mencionar el envejecimiento por condiciones y tiempo de uso. El envejecimiento natural es en relación al tiempo debido a que la polarización remanente que fue inducida durante la etapa de fabricación de la cerámica piezoeléctrica se desvanece naturalmente no importando los agentes externos que afecten al material, la resonancia es un factor que incide directamente en estos materiales y afectará el desempeño del material.

Tabla VII. **Tasa de envejecimiento de materiales piezoeléctricos**

| (% por década) | PZT-4 | PZT-5 | PZT-5H | PZT-7A | PZT-8 |
|----------------|-------|-------|--------|--------|-------|
| K_P | -2,3 | -0,2 | -0,35 | 0 | -2 |
| K_{33} | -5,8 | -1 | -1,5 | +2 | -5 |
| N_1 | +1,5 | +0,2 | +0,25 | -0,08 | +1 |

Fuente: *Soluciones piezoeléctricas ATCP do Brasil.*

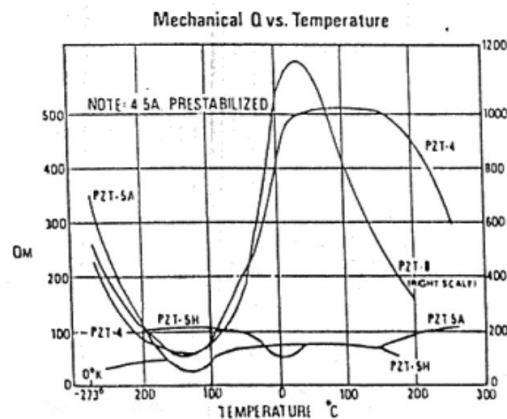
<http://www.atcp.com.br/imagenes/productos/ceramicas/articulos/Documento-3.pdf>. Consulta: 23 de octubre de 2017.

Para la tabla anterior hay que tomar en cuenta que la tasa de envejecimiento es más elevada si el material es utilizado en dispositivos de potencia o sometidos a grandes campos de deformación. También hay que considerar que la temperatura incide en la tasa de envejecimiento de los materiales debido a que si se somete un material a una temperaturas muy elevada por encima de la temperatura crítica de Curie, el material envejecerá

mucho más rápido, una recomendación importante es el sometimiento de los materiales a no más del 60% de temperatura de funcionamiento.

- Inestabilidad de las propiedades en función de variaciones de temperatura: En la electrónica habitual se han observado propiedades de los resistores y semiconductores, en ellos los resistores presentan una mayor resistencia cuando se calientan y para los semiconductores que al calentarse tienen una mejor conducción, estos cambios ocurren también en las cerámicas piezoeléctricas pero a una escala mucho mayor debido al efecto piezoeléctrico, esta inestabilidad se muestra en las siguientes gráficas:
 - El factor de calidad mecánico en función de la temperatura muestra la excelente estabilidad del PZT4, PZT5A y PZTH5 en el rango de 0 a 100°C.

Figura 17. **Calidad mecánica Vs temperatura**

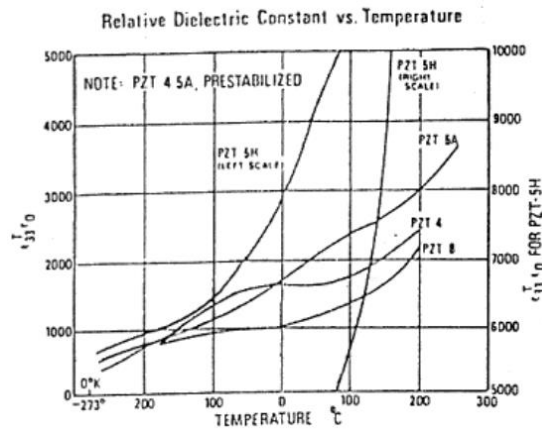


Fuente: *Soluciones piezoeléctricas ATCP do Brasil.*

<http://www.atcp.com.br/imagenes/productos/ceramicas/articulos/Documento-3.pdf>. Consulta: 23 de octubre de 2017.

- En el factor de la constante dieléctrica en función de la temperatura se puede observar que el mejor material es el PZT4 en el rango de 0 a 100°C.

Figura 18. **Constante dieléctrica Vs temperatura**

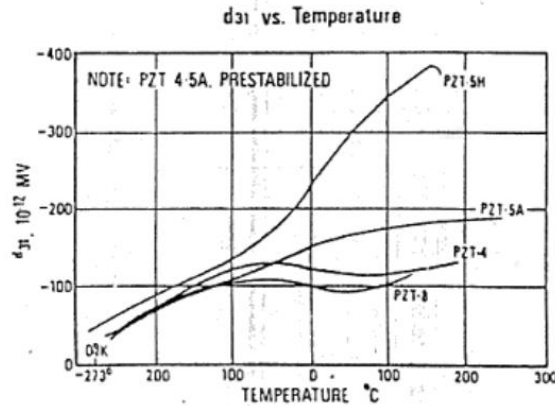


Fuente: *Soluciones piezoeléctricas ATCP do Brasil.*

<http://www.atcp.com.br/imagenes/productos/ceramicas/articulos/Documento-3.pdf>. Consulta: 23 de octubre de 2017.

- La constante de carga piezoeléctrica en función de la temperatura hace resaltar la estabilidad de los materiales PZT4, PZT8 Y PZT5A en el rango de 0 a 100°C.

Figura 19. **Carga piezoeléctrica Vs temperatura**



Fuente: *Soluciones piezoeléctricas ATCP do Brasil.*

<http://www.atcp.com.br/imagenes/productos/ceramicas/articulos/Documento-3.pdf>. Consulta: 23 de octubre de 2017.

- Límites de excitación eléctrico y mecánico: Debido a que los materiales cerámicos son muy frágiles hay que tomar en cuenta los esfuerzos mecánicos que estos deben soportar y con esto se evitará, tener problemas por el uso de un material cerámico piezoeléctrico que no sea útil en determinada aplicación, la siguiente tabla muestra los límites de tracción para algunos materiales piezoeléctricos.

Tabla VIII. **Límite de tracción para algunos materiales piezoeléctricos**

| (psi) | <i>Navy Type I</i> | <i>Navy Type II</i> | <i>Navy Type III</i> | <i>Navy Type VI</i> |
|----------|--------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| Dinámico | 6 000 | 4 000 | 4 000 | 4 000 |
| Estático | 11 000 | 11 000 | 10 000 | 10 000 |

Fuente: *Soluciones piezoeléctricas ATCP do Brasil.*

<http://www.atcp.com.br/imagenes/productos/ceramicas/articulos/Documento-3.pdf>. Consulta: 23 de octubre de 2017.

4. BALDOSA PIEZOELÉCTRICA

La baldosa piezoeléctrica nace de la idea de aprovechar la energía que provoca un ser humano al caminar, aprovechando de esta manera el paso y el peso de dicha persona, la baldosa piezoeléctrica se basa en la compresión de materiales piezoeléctricos que en su mayoría son reciclados, estas baldosas están creadas de materiales piezoeléctricos, su superficie es de goma en un 100% fabricada de materiales reciclados mientras que la parte inferior ocupa un 80% de materiales reciclados, esta baldosa es un concepto revolucionario en la rama de energías verdes debido a que no contamina el medio ambiente y no contribuye inyectando dióxido de carbono al medio ambiente.

La baldosa piezoeléctrica transforma el peso peatonal en energía limpia y renovable, una clave del buen funcionamiento de esta baldosa es la colocación en lugares estratégicos, buscando lugares de mayor flujo peatonal debido a que entre más pisadas reciba esta baldosa mayor será la cantidad de energía que genere. Esta baldosa ha sido fabricada para alimentar sistemas eléctricos de bajo consumo, como por ejemplo: sistemas eléctricos de iluminación LED para pasillos, señales de tránsito, rótulos lumínicos de bajo consumo, entre otros.

Esta baldosa tiene la capacidad de generar en promedio una potencia de 5 Watts por pisada, y ha sido probada con éxito en lugares muy concurridos como por ejemplo: en los Juegos Olímpicos de Londres, en esa prueba se captaron un aproximado de doce millones de pisadas que es igual a la generación de energía para cargar un total de diez mil teléfonos celulares por un lapso de una hora.¹¹

¹¹ Fuente: PAVEGEN. <http://www.pavegen.com/permanent/>. Consulta: 26 de octubre de 2017.

“También se puede mencionar la implementación de este sistema en el Instituto Británico Simon Langton Grammar School, donde las pisadas de los mil cien alumnos son utilizadas para iluminar los pasillos de la institución, también se han utilizado en festivales y eventos de masiva afluencia solo por mencionar algunos.”¹²

4.1. Fabricación

La fabricación de la baldosa piezoeléctrica denominada (baldosa recolectora de energía cinética), se le atribuye al Ingeniero Industrial Laurence Kemball-Cook en el año 2009, a la cual se le dio el nombre de Baldosa Piezoeléctrica Pavegen. Estas baldosas son fabricadas por Pavegen Systems, empresa fundada por el mismo ingeniero inventor, ubicada en el Reino Unido, estas baldosas están hechas de materiales piezoeléctricos, su parte superior está constituida con un 100 % de revestimiento de goma reciclada de neumáticos, los cuales son materiales piezoeléctricos, mientras que la parte inferior de esta baldosa está hecha en un 80 % de materiales piezoeléctricos reciclados.¹³

Este tipo de baldosa está fabricada para soportar los embates del clima, como por ejemplo lluvia extrema, nieve, e incluso pisadas con zapatos que posean tacón y es totalmente impermeable.

La baldosa piezoeléctrica estándar es rectangular y tiene una medida de 45x60 centímetros, está pensada para lugares donde haya mucha afluencia de personas como: Estaciones de Transmetro, pasillos universitarios, entradas a universidades, entre otros. El gran inconveniente de este tipo de baldosa es el alto costo en la fabricación, pero con el pasar de los años los costos se han logrado reducir casi en un 50 %.

¹² Fuente: PAVEGEN. <http://www.pavegen.com/simon-langton-school>. Consulta: 26 de octubre de 2017.

¹³ Fuente: National Geographic. <http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/unas-baldosas-generan-energía-con-nuestras-pisadas>. Consulta: 26 de octubre de 2017.

El diseño estándar de este tipo de baldosa es de forma rectangular pero debido a que esta baldosa requiere de una pisada en un punto caliente en el centro del área, para lograr al máximo su aprovechamiento, esto ha llevado a los diseñadores a mejorar el diseño implementando un diseño triangular que será hasta 200 veces más eficiente que el diseño principal.

El diseño triangular es más delgado y está fabricado de acero y aluminio reciclado y tiene la forma de un triángulo con una medida de 60 centímetros por cada lado.

Sin embargo el estudio se hará en base al diseño rectangular que ya ha sido implementado en muchos lugares de Europa.

Figura 20. **Baldosa Pavegen rectangular recolectora de energía**



Fuente: www.taringa.net/posts/ecologia/16767498/Baldosas-generadoras-de-electricidad-Megapost.html. Consulta: 26 de octubre de 2017.

Figura 21. **Baldosa Pavegen triangular recolectora de energía**



Fuente: <https://applauss.com/las-baldosas-que-pueden-generar-electricidad-mientras-caminas/>.

Consulta: 26 de octubre de 2017.

4.2. Vida útil de la baldosa piezoeléctrica

Este tipo de baldosa es totalmente impermeable y gracias a esto se impide filtraciones de agua, polvo y cualquier otro líquido que pueda dañar su mecanismo.

Esta baldosa puede estar sin mantenimiento aproximadamente 5 años según Pavegen, esta baldosa puede ser limpiada en sus partes externas como cualquier otra superficie conocida, en base a esto se estima que la vida útil de la baldosa es de aproximadamente 10 años, más sin embargo se están haciendo esfuerzos para prolongar la vida útil de dicha baldosa a unos 20 años, para que al momento de adquirir una baldosa de estas se tenga mucho más tiempo en servicio.¹⁴

4.3. Funcionamiento

El funcionamiento de la baldosa piezoeléctrica se basa en reacciones que tienen los cristales, estos contienen moléculas polares como el cuarzo, las tensiones mecánicas aplicadas a los cristales producidos por las pisadas del ser

¹⁴ Fuente: Infobae Argentina: <https://www.infobae.com/2016/03/27/1799323-baldosas-verdes-una-opcion-generar-energía-cada-paso/>. Consulta: 26 de octubre de 2017.

humano y estas producen la polarización de las molécula, este fenómeno es conocido como efecto piezoeléctrico. La polarización del cristal cuando se somete a una tensión, esto causa un diferencial de potencial a través del cristal y es utilizado en este caso por la baldosa para producir corriente eléctrica.

La generación de energía eléctrica a partir de esta baldosa se produce por la estructura de los cristales, ciertas cerámicas piezoeléctricas tienen una estructura tetragonal con un átomo en el centro, cuando el cristal es comprimido el átomo que se encuentra en el centro se desplaza, y debido a esto se genera un diferencial de potencial y cargas eléctricas en su superficie que se manifiestan en forma de chispas.

“El funcionamiento de esta baldosa se basa en la captación de la energía mecánica que recibe al ser pisada por alguna persona, al momento de que la persona pisa la baldosa esta baldosa se hundirá un total de 5mm por pisada.”¹⁵ Con este hundimiento se está logrando la compresión de los materiales piezoeléctricos y de esta manera se generara energía eléctrica por medio de reacciones en los cristales de cuarzo o cerámicas piezoeléctricas.

La generación de energía eléctrica de las baldosas piezoeléctricas está en función del peso de la persona, una persona de aproximadamente 140 libras en promedio que pise la baldosa generara aproximadamente 5 Watt de potencia, según Pavegen System. Esta energía generada puede ser almacenada en un banco de baterías para su uso posterior o puede ser utilizada instantáneamente, por ejemplo, en sistemas de iluminación de bajo consumo, para iluminación de rótulos que contengan bombillas led, también se puede utilizar para cargar teléfonos móviles.

¹⁵ Fuente: <http://www.pavegen.com/products/>. Consulta: 26 de octubre de 2017.

La baldosa Pavegen contiene una luz led en su centro esta consume un 5 % de la energía total producida por la compresión de los materiales piezoeléctricos, el 95 % restante de la energía total es la energía aprovechable que irá hacia un sistema de luminarias led que iluminaran pasillos o rótulos, y esta luz que la baldosa contiene en su centro es un indicador del funcionamiento de la baldosa, sin embargo esta luz podría ser removida para tener un total del 100 % de energía aprovechable.

La funcionalidad de este tipo de energía renovable es dependiente de un flujo peatonal eso podría considerarse como una desventaja, pero como todo tipo de energía renovable es dependiente de algún medio por ejemplo: la energía eólica depende de la cantidad de viento, la hidráulica depende del caudal de ríos, la energía fotovoltaica que usa paneles solares depende en su totalidad de la cantidad de luz solar. Entonces, la estrategia para una buena funcionalidad de este sistema es colocarlo en lugares estratégicos.

Figura 22. **Sistema de recolección de energía por medio de la pisada del ser humano**



Fuente: <http://www.sustentartv.com/baldosas-que-generan-energía-al-caminar/>. Consulta: 26 de octubre de 2017.

4.4. Almacenamiento de la energía generada

El almacenamiento de la energía recolectada en este sistema es de suma importancia debido a la utilidad que se le dará. En el mercado actual existe una gran variedad de baterías que son utilizadas para almacenar energía recolectada o dicho en otras palabras, recolección de energía verde, entre los tipos de recolección de energía verde que se pueden almacenar en baterías están las siguientes:

- **Térmica:** Es un claro ejemplo de la energía que se recolecta con paneles solares.
- **Mecánica:** Este principio es aprovechado por la baldosa piezoeléctrica que aprovecha la energía cinética de los peatones y la almacena como energía eléctrica en una batería.
- **Eléctrica:** Este tipo de energía se almacena en condensadores eléctricos
- **Química:** En los diferentes tipos de baterías.

La energía recolectada por la baldosa piezoeléctrica puede ser utilizada en el instante que es recolectada o puede ser almacenada para un uso posterior, es este caso debido a que la energía que se está recolectando será utilizada únicamente para iluminaciones, entonces debido a esto la energía que se recolecte durante todo el día debe ser almacenada en baterías.

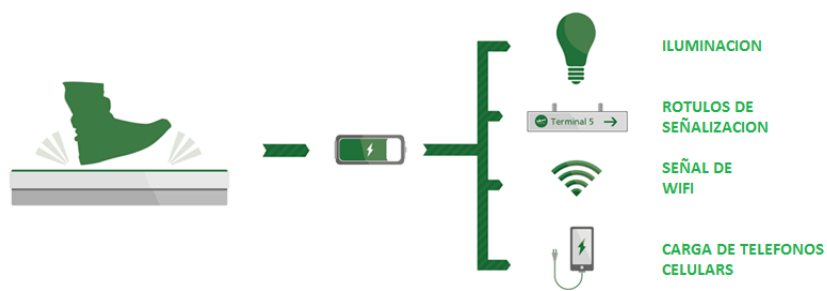
La baldosa piezoeléctrica tiene una batería en su interior que es capaz de almacenar la energía recolectada para su uso posterior, principalmente

pensada para aprovecharse en zonas *Wifi*, paneles de publicidad, pero principalmente enfocado en el objetivo que es la iluminación.

El creador de la baldosa Pavegen, aún guarda muchos secretos de la construcción de su baldosa, y esto puede entorpecer la labor de investigación en la implementación de un sistema de este tipo.

A continuación se muestra un esquema del sistema que se aplica en la baldosa.

Figura 23. **Proceso que se debe cumplir en la implementación de la baldosa piezoeléctrica**



Fuente: www.arquitecturayempresa.es/noticia/energia-en-cada-paso. Consulta: 28 de octubre de 2017.

4.5. Costo de la baldosa piezoeléctrica

Como bien se sabe el costo de la energía renovable es bastante alto y es por esto que algunos países deciden seguir con los combustibles tradicionales (combustibles fósiles), para poder seguir generando energía y a pesar de esto hay países que tienen conciencia ambiental y deciden implementar sistemas

renovables para poder generar energía limpia, que no contribuyan a la contaminación del medio ambiente reduciendo de esta manera el dióxido de carbono que es generado por las generadoras eléctricas, para poder generar energía eléctrica por medio de la utilización de combustibles fósiles, como por ejemplo: El petróleo que es utilizado principalmente como combustible y sus derivados que tienen múltiples aplicaciones, también se pueden mencionar el carbón que es un mineral que se forma a partir de restos vegetales prehistóricos, el carbón es utilizado en la elaboración de una gran variedad de artículos, y por último se tiene el gas natural que está compuesto principalmente por metano que es un compuesto químico hecho de átomos de carbono e hidrogeno.

El costo real de la baldosa piezoeléctrica no se sabe con exactitud ya que el inventor o fabricante no desvela la cantidad exacta que puede costar una baldosa. En cuanto a la comercialización de la baldosa, no se sabe el precio exacto, “pero un portavoz de Pavegen adelanto que, después de acortar los costos a la mitad con relación al año 2012, el objetivo es hacer que el precio gire en torno a \$ 150.00 por baldosa piezoeléctrica e incluso puede llegar hasta los \$ 50,00 por baldosa.”¹⁶ Pero para esta investigación utilizaremos un precio de \$ 150,00 por baldosa “con un valor del dólar de \$1,00 por Q 7,35 con fecha 29 de Octubre del 2017.”¹⁷ Entonces para nuestro sistema cada baldosa tendrá un precio de:

$$V_b = \$150 \times 7,35 = Q1\ 102,00$$
$$V_{10b} = 10 \times 1\ 102,00 = Q11\ 020,00$$

¹⁶ Fuente: <https://www.mediatrends.es/a/54533/pavegen-baldosas-inteligentes-acumulan-energía/>. Consulta: 28 de octubre de 2017.

¹⁷ Fuente: Banco de Guatemala. <http://www.banguat.gob.gt/>. Consulta: 29 de octubre de 2017.

donde:

$V_b = \text{Precio de una baldosa}$

$V_{10b} = \text{Precio de 10 baldosas}$

El fundador de Pavegen y creador de la baldosa piezoeléctrica Lawrence kemball Cook afirma que ha logrado reducir un 70 % los precios y su asociación con firmas tan importantes como Shell o Siemens podrá lograr que el precio baje hasta el objetivo final de unos \$ 50,00 cada una. En la actualidad se estima que cada baldosa podría estar en el rango de \$100,00 a \$200,00 por unidad.

Debido a que no se sabe con exactitud el precio real de la baldosa Pavegen esto afectará de manera significativa el resultado de la investigación y debido al alto precio que tienen estas baldosas, los costos de la implementación de este sistema piezoeléctrico tenderá a ser elevado ya sea por razones de adquisición de estas baldosas o por la instalación de las mismas.

5. CONOCIMIENTOS NECESARIOS PARA EL BUEN DESARROLLO DE LOS CÁLCULOS DEL SISTEMA PIEZOELÉCTRICO

5.1. Flujo peatonal

La estrategia de implementación de este tipo de tecnología se basa en la ubicación de baldosas en lugares con mucha afluencia peatonal y debido a esto se ha pensado en los dos caminos de entrada que posee la Universidad para el flujo de personas que provengan del Anillo Periférico, esta entrada tiene dos caminos diferentes para el ingreso a la Universidad, se aprovechará el flujo de personas provenientes de la Calzada Raúl Aguilar Batres y del Anillo Periférico.

Tomando en consideración que la Universidad cuenta con dos entradas principales, una proveniente de la Avenida Petapa y la otra ya antes mencionada que es por el Anillo Periférico, estas entradas son de máxima afluencia de personas en forma peatonal, el principal objetivo es incluir a los estudiantes debido a que es la máxima afluencia que se tendrá, sin embargo existirán otras fuentes como por ejemplo; personas que laboran dentro de la Universidad, personas ajenas a la Universidad, que serán de gran ayuda para la generación de energía eléctrica, pero que no serán tomadas en cuenta para esta investigación, ya que solo se tomará un porcentaje de la población Universitaria que ingresa por la entrada principal sobre el Anillo Periférico.

De esta manera por cada persona que pase por el lugar será de beneficio para el sistema piezoeléctrico ya que con solo el hecho de pisar la baldosa ya está contribuyendo a generar electricidad de manera limpia, y también están contribuyendo con el medio ambiente evitando con esto contaminarlo con dióxido de carbono así como lo hacen empresas que utilizan combustibles

fósiles para poder generar electricidad, dicho lo anterior se puede ver que este tipo de tecnología está en crecimiento, y así como cualquier tipo de energía renovable siempre depende de algún factor de la naturaleza que ayude a genera energía limpia, por ejemplo se puede mencionar, la energía eólica que necesita del viento para poder mover el aspa y generar electricidad, la energía hidráulica necesita de la fuerza de los ríos para poder mover una turbina conectada a un generador y de esta manera generar electricidad, y la energía piezoeléctrica depende exclusivamente de la energía cinética que un peatón proporciona al pisar dicha baldosa y de esta manera poder generar electricidad.

El estudio del flujo peatonal que ingresa día con día a la Universidad es un tema muy complejo, debido a la gran población existente y la gran diversidad de carreras que ofrece la USAC. De tal manera que para poder determinar un estudio exacto de la población hay que tomar en cuenta muchos factores entre ellos se pueden mencionar:

- Estudiantes que hacen su ingreso en automóvil
- Estudiantes que hacen su ingreso en motocicleta
- Trabajadores de la Universidad que ingresan a pie
- Estudiantes que ingresan a pie
- Personas ajenas a la Universidad que ingresan a pie

Y debido a que el tema de flujo peatonal no es el tema central de esta investigación solo tomaremos en cuenta el 25 % de la población solo para fines demostrativos, porque según una investigación realizada en el Departamento de Registro y Estadística de la Universidad de San Carlos de Guatemala, la distribución de estudiantes por unidad académica está dividida de la siguiente manera:

Tabla IX. **Población estudiantil en la USAC, para el primer semestre del año 2017**

| No. | Unidad Académica | No. De estudiantes |
|------------|---|---------------------------|
| 1 | Agronomía | 1 984 |
| 2 | Arquitectura | 3 563 |
| 3 | Ciencias Económicas | 19 498 |
| 4 | Ciencias Jurídicas y Sociales | 18 030 |
| 5 | Ciencias Medicas | 6 073 |
| 6 | Ciencias químicas y farmacias | 2 041 |
| 7 | Humanidades | 20 931 |
| 8 | Ingeniería | 12 779 |
| 9 | Odontología | 1 063 |
| 10 | Medicina Veterinaria Zootecnia | 1 113 |
| 11 | Ciencias Psicológicas | 4 922 |
| 12 | Historia | 1 218 |
| 13 | Trabajo Social | 1 272 |
| 14 | Ciencias de la Comunicación | 3 866 |
| 15 | Ciencias Políticas | 1 461 |
| 16 | Escuela de formación de profesores de enseñanza media | 4 334 |
| 17 | Ciencias Lingüísticas | 625 |
| 18 | Escuela superior de arte | 474 |
| 19 | Ciencias físicas y matemáticas | 178 |
| 20 | Centros de estudio del mar y acuicultura | 113 |
| | | |
| | Total de la población | 105 598 |
| | 25% de la población | 26 400 Estudiantes |

Fuente: Registro y Estadística, USAC.
https://rye.usac.edu.gt/formularios_rye/AvanceEstad03_2017.pdf. Consulta: 29 de octubre de 2017.

La tabla anterior describe la población de estudiantes por unidad académica, por lo tanto la población que se utilizará será del 25 % de la población que equivale a 26 400 estudiantes.

5.2. Fuerza

Para el cálculo e implementación de un sistema piezoeléctrico hay que tener algunos conocimientos previos que ayudarán a realizar un mejor cálculo de los parámetros que serán de gran utilidad al momento de decidir si el sistema es o no es factible, entre los conocimientos previos que son necesarios se pueden mencionar los siguientes:

- Fuerza eléctrica: Este tipo de fuerza se realiza con una fuente de energía que se mueve a una velocidad determinada dentro de un campo magnético transformando la energía en electricidad.
- Fuerza mecánica: Este tipo de fuerza es producida por un objeto mecánico con una determinada intensidad y que provoca cambios en el receptor.
- Fuerza magnética: Este tipo de fuerza es ejercida de un polo a otro y como consecuencia del movimiento de partículas cargadas como los electrones.

Si por ejemplo suponemos que no actúan otras fuerzas la dirección de la fuerza coincide con la dirección de la aceleración causada, por lo tanto la ecuación que define la fuerza es la siguiente:

$$F = m \cdot a$$

Dónde:

$F = fuerza\ resultante$

$m = masa$

$a = aceleracion$

5.3. Trabajo

El trabajo se define como la fuerza que se le aplica a un cuerpo para poder desplazarlo de un punto a otro, de modo que al aplicar fuerza se libera y se transfiere energía potencial a ese cuerpo y se vence una resistencia, dicho en otras palabras el trabajo se refiere a la aplicación de una cierta fuerza que al ser aplicada a algún cuerpo este permita que se desplace en dirección de la fuerza aplicada, el trabajo está representado por la siguiente ecuación:

$$W = F \cdot d \cdot \cos\alpha$$

Dónde:

$W =$ *trabajo realizado*

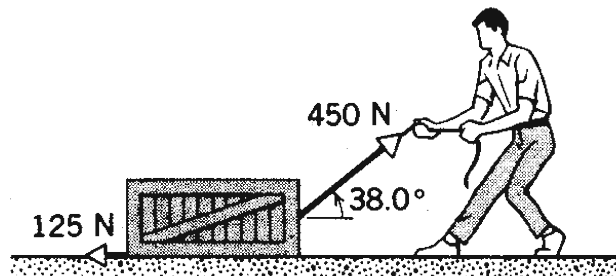
$F =$ *fuerza*

$d =$ *distancia de desplazamiento*

$\cos\alpha =$ *resultante de la fuerza y la dirección que recorre el objeto*

La ecuación indica que el trabajo es el producto de la multiplicación de la fuerza por la distancia y por el coseno del ángulo resultante entre la fuerza y la dirección que recorre el objeto que se mueve.

Figura 24. Representación gráfica del trabajo



Fuente: <http://fisicamagic.blogspot.com/2015/06/trabajo-y-leyes-de-la-conservacion.html>.

Consulta: 30 de octubre de 2017.

5.4. Potencia

La potencia se define como la cantidad de trabajo que se realiza por unidad de tiempo, puede asociarse a la velocidad de un cambio de energía dentro de un sistema, o al tiempo que demora la concentración de un trabajo, por lo tanto resulta igual que decir que la energía total dividida por el tiempo, donde la unidad de medida de la potencia es el Watt, y el equivalente de 1 joule es igual a 1 Watt. La potencia se representa con la siguiente ecuación:

$$P = \frac{W}{t} \text{ (Watt)}$$

Dónde:

P = potencia desarrollada por la fuerza de trabajo

W = trabajo

t = tiempo

5.5. Energía

La energía se define como la capacidad de un objeto para realizar un trabajo, y se entiende como el trabajo realizado por el movimiento provocado por la energía, debido a que la energía puede transformarse pero no se crea ni se destruye, puede ser cuantificada por su conversión o transformación a diferentes formas, la unidad de medida de la energía es el Julio equivalente a la energía transferida a un objeto, para moverlo a una distancia de un metro con una fuerza de 1 Newton.

La energía cinética se puede dividir en lo siguiente.

- Energía cinética (E_K): Energía que tiene un cuerpo en virtud de su movimiento.
- Energía Potencial (E_P): Energía que tiene un sistema en virtud de su posición o condición.

5.6. Energía potencial

La energía potencial es la capacidad que tiene un cuerpo para realizar trabajo de acuerdo a la configuración que posea en un sistema de cuerpos que ejercen fuerza entre sí, dicho en otras palabras la energía es capaz de generar un trabajo como consecuencia de la posición del cuerpo, y cuando un cuerpo se moviliza con relación a un cierto nivel de referencia estará en condiciones de acumular energía. Cuando un cuerpo es levantado a una determinada altura adquiere lo que se le conoce como energía potencial gravitacional. La energía potencial gravitacional se puede definir por medio de la siguiente ecuación:

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

Dónde:

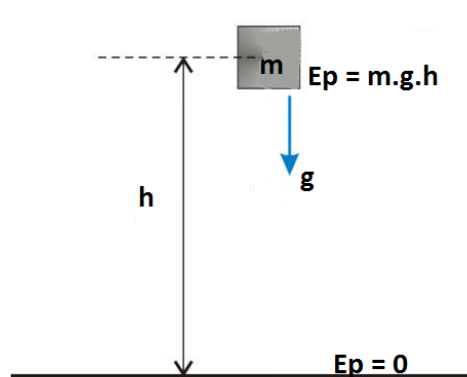
E_p = energía potencial

m = masa del cuerpo que genera trabajo

g = es la fuerza de gravedad

h = es la distancia sobre la cual se realiza el trabajo

Figura 25. **Energía potencial gravitacional**



Fuente: elaboración propia.

5.7. **Peso promedio de una persona en Guatemala**

El peso de una persona podría ser la parte más importante en la generación de energía por medio de las baldosas piezoeléctricas, debido a que el peso de la persona que pise la baldosa piezoeléctrica ayudará a la compresión de los materiales piezoeléctricos para que genere energía eléctrica, de manera que es de suma importancia obtener el peso promedio del Guatemalteco.

Debido a que no existe información que indique el peso promedio que tiene una persona guatemalteca se procedió a recabar información que ayudara a estimar un peso aproximado del guatemalteco, la información recabada es la siguiente:

- Proyección de densidad poblacional del INE(Instituto Nacional de Estadística): A falta de un censo que indique un dato exacto de la población guatemalteca se toma en cuenta la proyección más reciente proporcionada a Prensa Libre por el INE(Instituto Nacional de Estadística) y RENAP (Registro Nacional de la Persona). “En Guatemala hay una población aproximada de 17 millones 154 mil 812 personas.”¹⁸

Las cuales se dividen de la siguiente manera:

- Personas mayores de edad 10 millones 202 mil 976
- Personas menores de edad 6 millones 951 mil 836

Para fines de cálculo se utilizara únicamente personas mayores de edad

- Factor de peso en Guatemala: Según un artículo publicado por Prensa Libre con fecha 5 de Marzo del 2017, indican que el porcentaje de obesidad en Guatemala que afecta a las personas adultas guatemaltecas es aproximadamente 71 %. Tomando en cuenta que el sobrepeso se estipula en un peso promedio de 75 Kg = P_s y el peso normal está en un promedio de 63 kg = P_n .

¹⁸ Fuente: *Prensa Libre*. <http://www.prensalibre.com/guatemala/comunitario/poblacion-supera-los-171-millones>. Consulta: 5 de noviembre de 2017.

5.8. Cálculo del peso promedio de un Guatemalteco

Total de la población adulta = 10 millones 202 mil 976

71 % de la población adulta tienen sobrepeso

29 % de la población adulta no tiene sobrepeso,

$$P_{cs} = 0,71 \times 10\,202\,976 = 7\,244\,113$$

$$P_{ss} = 0,29 \times 10\,202\,976 = 2\,958\,863$$

$$P_{pg} = \frac{(P_s * P_{cs}) + (P_n * P_{ss})}{\text{Total de la población}}$$

Sustituyendo valores

$$P_{pg} = \frac{(75\text{Kg} * 7\,244\,113 \text{ personas}) + (63\text{Kg} * 2\,958\,863 \text{ personas})}{10\,202\,976 \text{ personas}}$$

$$P_{pg} = \frac{729\,716\,844 \text{ kg.personas}}{10\,202\,976 \text{ personas}}$$

$$P_{pg} = 71,52 \text{ kg}$$

Dónde:

P_s = *Peso promedio con sobrepeso*

P_n = *Peso normal*

P_{cs} = *Población con sobrepeso*

P_{ss} = *Población sin sobrepeso*

P_{pg} = *Peso promedio de un guatemalteco*

5.9. Fuerza ejercida hacia el suelo cuando una persona camina

Una investigación hecha por: Nilsson J, Thorstensson A, da a conocer las variaciones en los parametros de la fuerza que se aplica hacia el suelo al caminar o al correr, este estudio se enfocó en la determinación de las tres posiciones del pie al caminar estas son:

- Supinador
- Pronador
- neutro

Estos tres tipos de posición del pie al caminar son determinados por el ángulo de la articulación del tobillo al momento de pisar el suelo, esto afecta y hace variar aspectos a nuestra forma de caminar.

Este estudio determinó que una persona al caminar o correr determina una amplitud máxima en la fuerza de reacción vertical en caminar o el correr de las personas obteniendo valores de: 1,0 a 1,5 y de 2,0 a 2,9 respectivamente. La fuerza pico ante-posterior y la fuerza pico a pico medio-lateral aumentaron aproximadamente 2 veces con la velocidad al caminar y aproximadamente 2-4 veces con la carrera.¹⁹

De lo anterior se tomarán los valores que se asocian al caminar de una persona obteniendo el promedio de los mismos de la siguiente manera.

Valores a razón del peso cuando una persona camina (1 - 1,5)

$$C_{pc} = \frac{1 + 1,5}{2} = 1,25$$

¹⁹ Fuente: NILSSON J., THORSTENSSON A.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/2782094>. Consulta: 15 de Noviembre de 2017.

Dónde:

C_{pc} = Constante promedio a razón del peso de una persona al caminar

El resultado de 1,25 significa que una persona al dar una pisada en el suelo ejerce en total 125 % de su peso corporal sobre el suelo.

5.10. Largo de la zancada de una persona al momento de caminar

La longitud de la zancada cambia en relación si se es hombre o mujer, también cambia en virtud a la estatura de la persona, pero un estudio de la Universidad Estadounidense de la Medicina Deportiva (The American College of Sports Medicine), “reporta que hay aproximadamente 2 000 pasos en una milla (1,6Km), unos 1 250 pasos por kilómetro, el largo del paso promedio es entonces de 0,8 metros.”²⁰

Esto quiere decir entonces que para la persona promedio, la distancia aproximada desde el punto de contacto inicial de su talón izquierdo y el punto de contacto inicial de su tobillo derecho es de aproximadamente 32 pulgadas u 0,8 metros.

Esta medida será de gran utilidad al momento de colocar las baldosas piezoeléctricas debido a que se busca que la persona pise con exactitud las diez baldosas, evitando con esto que las personas pasen por encima de la baldosa sin pisarla para esto se hará una distribución de las baldosas utilizando esta medida.

²⁰Fuente: https://muyfitness.com/la-longitud-promedio-de-la-zancada-al-caminar_13137649/. Consulta: 15 de noviembre de 2017.

5.11. Tiempo promedio que tarda una persona con velocidad moderada dar un paso tras otro

Un estudio realizado por Mayo Clinic, entidad sin fines de lucro, determinó que la distancia recorrida por unidad de tiempo depende de la intensidad o velocidad con la que se está caminando o corriendo, a razón de esto se pudo determinar lo que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla X. **Tiempo promedio que tarda una persona en caminar 10,000 pasos**

| Velocidad al caminar | Tiempo | Cantidad de pasos dados |
|-----------------------------|---------------|--------------------------------|
| Moderada | 1 Minuto | 75 |
| Vigorosa | 1 minuto | 130 |

Fuente: elaboración propia.

Como lo muestra la tabla anterior una persona utiliza un minuto de tiempo para dar un total de 75 pasos, lo que quiere decir que para determinar el tiempo que tarda en dar un paso una persona se hace lo siguiente:

$$t_p = \frac{t}{pasos}$$

$$t_p = \frac{60s}{75 pasos} = 0,8 s/paso$$

Dónde:

t_p = tiempo promedio en dar un paso

t = tiempo en segundos

6. ELABORACIÓN DE LOS CÁLCULOS PARA EL SISTEMA COMPUESTO POR 10 BALDOSAS PIEZOELECTRICAS

Como parte principal en el estudio de la factibilidad económica se pretende hacer un estudio sobre la implementación de un sistema recolector de energía conformado por baldosas piezoeléctricas, que son funcionales a base del flujo peatonal y aprovecharán el flujo proveniente de la Calzada Raúl Aguilar Batres y el flujo peatonal proveniente del Periférico.

Como parte de la investigación se hará un análisis comparativo del aporte de energía que hará este sistema al momento de implementarlo, y se hará un estudio de costo económico al momento de implementar este tipo de tecnología en la Universidad de San Carlos de Guatemala, y su impacto potencial en la generación de energía eléctrica, así como el ahorro económico que se podría tener al momento de adquirir este tipo de tecnología verde.

Para la implementación del sistema piezoeléctrico compuesto por un total de 10 baldosas se hace necesario saber cuánta energía produce una baldosa al momento de ser pisada, y cuanta potencia generan dichas baldosas, pero aún más importante es saber el flujo peatonal con el cual se podrá contar día con día, para el funcionamiento del sistema piezoeléctrico.

6.1. Ejemplo de la implementación de un sistema de 10 baldosas piezoeléctricas

La implementación de este sistema busca recolectar la energía cinética producida por la compresión que ejerce una persona al momento de dar un paso sobre ella, obteniendo de esta manera la compresión de los materiales piezoeléctricos por los que está constituida la baldosa, a este sistema se le piensa aplicar una carga de 5 lámparas de alumbrado público de 40W cada una y ver qué tan capaz es de soportar la carga aplicada.

Este sistema será capaz de almacenar la energía recolectada durante todo el día para un uso posterior que se dará durante la noche, y debido al gran flujo de estudiantes que entran y salen de la Universidad se espera que las baldosas seas capaces de generar la suficiente energía eléctrica, para mantener las lámparas LED encendidas durante el tiempo que se requiera.

Este sistema consistirá con un total de 10 baldosas piezoeléctricas puestas estratégicamente en la entrada principal de la Universidad, esta tiene dos caminos diferentes para poder ingresar y por lo tanto dichas baldosas se distribuirán de la siguiente manera:

- Se pretende implementar un sistema compuesto por 5 baldosas piezoeléctricas Pavegen, en la entrada de la USAC aprovechando el flujo peatonal proveniente de la Calzada Raúl Aguilar Batres, cuya entrada está cerca de la ciclo vía.

A continuación se muestra la ubicación

Figura 26. **Implementación de 5 baldosas para flujo peatonal proveniente de la Aguilar Batres**



Fuente: <https://canalantigua.tv/con-senalizacion-pretenden-mejorar-transito-de-la-usac/>.

Consulta: 28 de noviembre de 2017.

- Se pretende implementar un sistema compuesto por un total de 5 baldosas piezoeléctricas Pavegen, en la entrada de la USAC aprovechando el flujo peatonal proveniente del Anillo Periférico, estas baldosas en conjunto con las 5 baldosas anteriormente mencionadas serán capaces de alimentar un total de 5 lámparas LED de alumbrado público de 40 watts cada una.

Figura 27. **Implementación de 5 baldosas para flujo peatonal proveniente del Anillo Periférico**



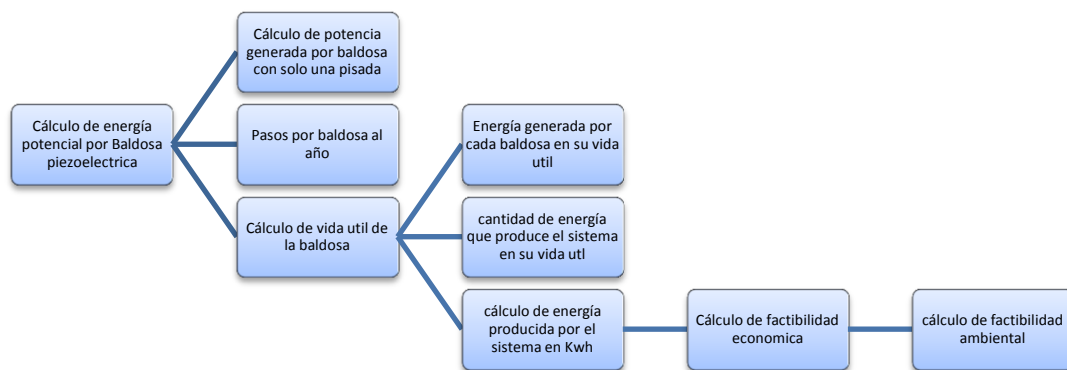
Fuente: <https://canalantigua.tv/con-senalizacion-pretenden-mejorar-transito-de-la-usac/>.

Consulta: 28 de noviembre de 2017.

Debido a lo dicho anteriormente es de suma importancia tener una secuencia de cálculo que será de gran apoyo para tener un orden específico que guiará por el camino correcto y de forma ordenada hasta llegar a los resultados que determinarán la factibilidad del sistema piezoeléctrico.

A continuación se presenta un esquema de los cálculos que se realizarán y con los cuales se determinará si el sistema es rentable o no lo es.

Figura 28. **Secuencia de cálculos**



Fuente: elaboración propia.

Siguiendo la secuencia del diagrama anteriormente elaborado, los cálculos se efectuarán en 9 puntos como se puede ver en el esquema, a continuación se procede a realizar dichos cálculos.

- **Cálculo de energía potencial por baldosa piezoeléctrica:**
El cálculo de energía potencia que genera cada baldosa está en relación del peso promedio que tienen los guatemaltecos, esto es de suma importancia debido a que la baldosa necesita cierta cantidad de peso para poder comprimirse un total de 0,005m, también esta ecuación está afectada por la gravedad de la Tierra que hace que los objetos y personas permanezcan en el suelo. El cálculo de la energía potencia en

cada baldosa será multiplicada por una constante de 1,25 calculada en la sección (5.9), que representa un 25 % más del peso corporal de la persona que pise dicha baldosa, a continuación se presenta la realización de dicho cálculo.

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad \text{Energía potencial}$$

$$E_p = 1,25 \cdot m \cdot g \cdot h \quad \text{Energía potencial con constante de 1,25}$$

Dónde:

$$m = 71,52 \text{ kg}$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$h = 0,005 \text{ m}$$

$$E_p = 1,25 \times 71,52 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m/s}^2 \times 0,005 \text{ m}$$

$$E_p = 4,38 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$\text{donde : } \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} = \text{Joule}$$

$$E_p = 4,38 \text{ Joules}$$

Dónde:

$$m = \text{peso promedio de un guatemalteco}$$

$$g = \text{gravedad del planeta tierra}$$

$$h = \text{altura de compresion de la baldosa piezoelectrica}$$

El resultado indica que una baldosa genera un aproximado de 4,38J al ser pisada por una persona, este cálculo es solamente la antesala para poder determinar cuánto puede llegar a generar de potencia una baldosa que sea pisada en promedio por una persona de aproximadamente 71,52kg.

- Cálculo de potencia generada por baldosa con solo una pisada:
El cálculo de la energía generada por baldosa será el determinante para poder saber cuánto podrá generar nuestro sistema completo, esta ecuación está determinada por la energía potencia calculada anteriormente y se le aplicará el factor determinado en la sección (5.2.1.4), que indica el tiempo que tarda una persona para dar un paso tras otro.

A continuación se realiza el cálculo:

$$P_b = \frac{E_p}{t_p}$$

$$P_b = \frac{4,38 j}{0,8s} = 5,48 j/s$$

donde:

$$\frac{j}{s} = W \cdot s$$

Entonces:

$$P_b = \frac{4,38 j}{0,8s} = 5,48 W$$

Dónde:

P_b = potencia generada por una baldosa en una sola pisada

E_p = energía potencial

t_p = tiempo promedio que tarda una persona en dar un paso = 0,8 s

Según Pavegen, la empresa creadora de dicha baldosa asegura que la cantidad de potencia que genera una baldosa con una sola pisada es de aproximadamente 5 Watts, y debido a que la cantidad de potencia obtenida en la ecuación de potencia generada por una baldosa es de 5,48 Watts se puede ver que se aproxima al valor real que indica Pavegen.

- Cantidad de pisadas por baldosa al año:
Para fines de cálculo se tomara un año comercial que equivale a 360 días y en cuanto a las pisadas que recibirá una baldosa en un lapso de un año equivale al flujo peatonal tomando como referencia 25 % de la población existente en la USAC día con día. Y para esto se tomará en cuenta que cada baldosa recibirá dos pisadas por persona tomando en cuenta la entrada y la salida de dicha persona, por lo tanto se hace el cálculo respectivo para una baldosa.
 - Días feriados en Guatemala = 7
 - Semana santa en la Universidad aproximadamente = 15 días
 - Fin de semestre 20 días por dos semestre = 40 días
 - Días domingo del año = 48

$$D_h = 360 - 7 - 15 - 40 - 48$$

$$D_h = 250 \text{ dias}$$

$$\#P_{bA} = D_h \times \#Estudiantes \times 2$$

$$\#P_{bA} = 250 \times 26\,400 \times 2$$

$$\#P_{bA} = 13\,200\,000 \text{ pisadas. año}$$

Dónde:

D_h = dias habiles (dias de clases normales en la Universidad)

#Estudiantes = estudiantes que llegan a clases regularmente

#P_{bA} = cantidad de pisadas por baldosa al año

2 = significa entrada y salida de la persona

En esta parte del cálculo se tomaron en cuenta los feriados oficiales que hay en Guatemala, la Semana Santa dentro de la USAC, y los fines de semestre donde el flujo peatonal disminuye.

- Cálculo de vida útil de la baldosa:

La vida útil de la baldosa se estima que es aproximadamente de 10 años pero también dependerá en gran parte de la cantidad de uso que se le dé a la baldosa, lo cual quiere decir que en relación al número de pisadas que reciba la baldosa así ira disminuyendo su tiempo de vida, “el fabricante asegura que cada baldosa está capacitada para recibir aproximadamente 20 millones de pisadas.”²¹

El cálculo de la vida útil de la baldosa estará influenciado por la cantidad de pasos que recibe durante un año, haciendo una relación que involucre

²¹ Fuente: PAVEGEN. <http://www.pavegen.com/>. Consulta: 30 de noviembre de 2017.

esta cantidad de pasos con la cantidad de pasos que el fabricante estima como vida útil de la baldosa.

$$V_{us} = \frac{V_{uf}}{\#P_{bA}}$$

Tomando en cuenta que:

$$\#P_{bA} = 13\,200\,000 \text{ pisadas. año}$$

$$V_{uf} = 20\,000\,000 \text{ pisadas}$$

Sustituyendo valores tenemos:

$$V_{ub} = \frac{20\,000\,000 \text{ pisadas}}{13\,200\,000 \text{ años. pisadas}}$$

$$V_{us} = 1,52 \text{ años}$$

Dónde:

V_{us} = vida util del sistema

V_{uf} = vida util de la baldosa segun el fabricante

$\#P_{bA}$ = cantidad de pisadas por baldosa al año

El resultado anterior indica que el sistema tiene aproximadamente un total de 1,52 años de vida que equivalen a 18 meses.

- Cálculo de cantidad de pisadas que recibe el sistema de 10 baldosas: Como ya se había mencionado anteriormente este sistema estará dividido en dos partes que abarcaran el flujo peatonal proveniente del Periférico y de la Calzada Raúl Aguilar Batres, en cada entrada se

colocaran un total de 5 baldosas piezoeléctricas puestas estratégicamente para que cada persona que pase por allí pise las 5 baldosas cuando vayan ingresando a la Universidad así como cuando salgan de ella.

$$\#P_{bAS} = \#P_{bA} \times 10$$

Tomando en cuenta que:

$$\#P_{bA} = 13\,200\,000 \text{ años.pisadas}$$

Sustituyendo valores tenemos:

$$\#P_{bAS} = 13\,200\,000 \text{ años.pisadas} \times 10 \text{ baldosas}$$

$$\#P_{bAS} = 1\,322\,000\,000 \text{ pisadas.año}$$

Dónde:

$$\#P_{bA} = \text{cantidad de pisadas por baldosa al año}$$

$$\#P_{bAS} = \text{cantidad de pisadas al año en todo el sistema}$$

- Cantidad de energía que produce una baldosa durante un año:
Esta cantidad está relacionada con la cantidad de energía que genera cada baldosa con una sola pisada de esta se obtuvo un valor 4,38J, que multiplicándolo por la cantidad de pisadas que recibe dicha baldosa en un año.

$$E_{PbA} = E_p \times \#P_{bA} \times$$

Sabiendo que:

$$E_p = 4,38 \text{joules}$$
$$\#P_{bA} = 13\,200\,000 \text{ años.pisadas}$$

Sustituyendo valores tenemos:

$$E_{PbA} = 4,38 \text{joules} \times 13\,200\,000 \text{ años.pisadas}$$

$$E_{PbA} = 57\,823\,920 \text{ joules} / \text{pisadas.año}$$

- Cálculo de energía producida por el sistema en su vida útil:
El sistema está conformado por 10 baldosas que estarán divididas en 2 sistemas de 5 baldosas colocadas estratégicamente para que dichas baldosas aprovechen al máximo el flujo peatonal proveniente de los dos puntos que corresponden al Anillo Periférico y la Calzada Raúl Aguilar Batres, la vida útil del sistema es muy importante debido a que de esto dependerá el funcionamiento del sistema y su cantidad de generación de energía.

A continuación se realizan los cálculos respectivos para poder determinar la cantidad de energía que genera el sistema.

$$E_s = E_{PbA} \times 10 \times V_{us}$$

Sabiendo que:

$$E_{PbA} = 57\,823\,920 \text{ joules} / \text{pisadas. año}$$

$$V_{ub} = 1,52 \text{ años}$$

10 = *significa el total de baldosas del sistema*

Sustituyendo valores tenemos que:

$$E_s = 57\,823\,920 \times 1,52 \times 10$$

$$E_s = 878\,923\,584 \text{ joules}$$

La energía total generada por el sistema en un lapso de 1,52 años es de 878 923 584 J, y se debe de convertir en KWh, que es el tipo de medida que utilizan las empresas distribuidoras para poder cobra la cantidad de energía utilizada.

- Conversión de la energía obtenida a KWh:
Para poder obtener el total de energía que produce el sistema es necesario convertir los Joule a KWh, porque esta unidad es la que se utiliza generalmente para medir el consumo en el lapso de una hora.

A continuación se convertirán los Joules obtenidos a KWh.

Dado que 1 w es igual a 1 j/s, tendremos que:

$$1\text{Kw}\cdot\text{h} = (10^3 \text{ J/s}) (3\,600\text{s}) = 3,6 \times 10^6 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$$

Convirtiendo la energía obtenida tenemos lo siguiente:

$$E_{s(Kwh)} = \frac{878\,923\,584 \text{ joules}}{3\,600\,000}$$

$$E_{s(Kwh)} = 244,15 \text{ Kw} * h$$

El dato anterior es la energía total generada por el sistema en su vida útil, dado en unidades de KWh, de esta manera se tiene una idea básica de cuanto se puede generar en la implementación de este sistema piezoeléctrico.

6.2. Cálculo de valores de generación de energía, día, semana, mes, año.

Debido a que el resultado obtenido en el punto anterior de la energía generada es el total general esto quiere decir que es la energía que el sistema generará en su vida útil, por lo tanto se hace necesario hacer un cálculo más detallado y de esta manera tener una idea más precisa de la capacidad del sistema en unidades de tiempo más pequeñas como por ejemplo; día, semana, mes, año, se harán los cálculos que indiquen cuanta energía se genera en las unidades de tiempo anteriormente mencionadas.

- Cálculo para generación de energía en un día:

$$E_{s(Kwh)} = E_p \times \#Estudiantes \times 2 \times \#baldosas \times Dias$$

Sustituyendo valores

$$E_p = 4,38 \times 26\,400 \times 2 \times 10 \times 1 = 2\,312\,956,8 J$$

$$E_{s(Kwh)} = \frac{2\,312\,956,8 J}{3\,600\,000} = 0,64 Kw * h$$

- Cálculo para generación de energía en una semana:

$$E_{s(Kwh)} = E_p \times \#Estudiantes \times 2 \times \#baldosas \times Dias$$

Sustituyendo valores

$$E_p = 4,3806 \times 26\,400 \times 2 \times 10 \times 6 = 13\,877\,740,8 J$$

$$E_{s(Kwh)} = \frac{13\,877\,740,8 J}{3\,600\,000} = 3,85 Kw * h$$

- Cálculo para generación de energía en un mes:

$$E_{s(Kwh)} = E_p \times \#Estudiantes \times 2 \times \#baldosas \times Dias$$

Sustituyendo valores

$$E_p = 4,3806 \times 26\,400 \times 2 \times 10 \times 30 = 69\,388\,704 J$$

$$E_{s(Kwh)} = \frac{69\,388\,704\,J}{3\,600\,000} = 19,28\,Kw * h$$

- Cálculo para generación de energía en un año:

$$E_{s(Kwh)} = E_p \times \#Estudiantes \times 2 \times \#baldosas \times Dias$$

Sustituyendo valores

$$E_p = 4,3806 \times 26\,400 \times 2 \times 10 \times 256 = 592\,116\,940,8\,J$$

$$E_{s(Kwh)} = \frac{592\,116\,940,8\,J}{3\,600\,000} = 164,48\,Kw * h$$

A continuación se hace un resumen de la generación de energía generada en función de los días de funcionamiento.

Tabla XI. **Generación de energía**

| No. | Tiempo | Energía en J | Potencia en Kwh |
|-----|-----------|---------------|-----------------|
| 1 | Día | 2 312 956,8 | 0,64 |
| 2 | Semana | 13 877 740,8 | 3,85 |
| 3 | Mes | 69 388 704 | 19,28 |
| 4 | Año | 592 116 940,8 | 164,48 |
| 5 | 1,52 años | 878 923 584 | 244,14 |

Fuente: elaboración propia.

6.3. Banco de baterías

El banco de baterías será la base del funcionamiento del sistema cuando no haya flujo peatonal, con la implementación del banco de baterías lo que se pretende hacer es que el sistema se recargue en su totalidad dándole al sistema en su fase de inicio de un aproximado de dos semanas, para que el sistema este recargado totalmente para que al momento de que el sistema sea utilizado por primera vez pueda ser autónomo.

A continuación se hacen los cálculos para determinar el banco de baterías, para esto se tomarán tres días de autonomía esto quiere decir que el sistema será capaz de funcionar únicamente con el banco de baterías, sin tener una entrada de energía proveniente de las baldosas piezoeléctricas.

Datos a usar:

5 lámparas para alumbrado público de 40w LED = P_i

Tiempo de funcionamiento por día 12 horas = t_f

- Cálculo de consumo:

$$P_i = \#Lamparas \times P_i \times t_f$$

Sustituyendo valores tenemos que:

$$C_l = 5 \text{ lamparas} \times 40W \times 12 \text{ horas}$$

$$C_l = 2\,400 \text{ Wh}$$

Dónde:

$P_i = \text{potencia instalada}$

- Cálculo de la potencia en días de autonomía:

$$P_{ida} = \#días \text{ autonomía} \times P_i$$

Sustituyendo valores tenemos que:

$$P_{ida} = 3días \times 2\,400 \text{ Wh}$$

$$P_{ida} = 7\,200 \text{ Wh}$$

Dónde:

$$P_{ida} = \text{Potencia instalada en días de autonomía}$$

- Cálculo de corriente en las baterías: Para poder determinar la corriente de las baterías utilizaremos 12V (Voltios), debido a que las baterías no usan KWh como parámetro sino que utilizan Ah (amperio hora).

$$B_{ns} = \frac{P_{ida}}{12V}$$

Sustituyendo valores tenemos que:

$$B_{ns} = \frac{7\,200 \text{ Wh}}{12v}$$

$$B_{ns} = 600 \text{ Ah}$$

Dónde:

B_{ns} = *Bateria necesaria para el sistema piezoeléctrico*

- **Conexión del banco de baterías:** La selección del banco de baterías será en base a la corriente obtenida en el punto anterior, esto indica que se debe cumplir con una corriente de 600Ah, para esto se dividirá el banco de baterías en dos baterías de 300Ah conectadas en serie para hacer un total de 600 Ah y cada batería será de 12V.

6.4. Instalación del sistema piezoeléctrico de 10 baldosas

La instalación de este sistema está dividida en dos secciones de 5 baldosas cada una, una sección está pensada para ser instalada en la entrada de la Universidad y se pretende que las personas que provienen del Anillo periférico pasen por las baldosas, un conjunto de 5 baldosas podrán estar ubicadas en la entrada de la Universidad del lado del Anillo Periférico pero ubicando las baldosas cerca de la ciclo vía, esto para poder aprovechar el flujo proveniente de la Calzada Raúl Aguilar Batres.

Debido a que no se sabe con exactitud el costo por instalaciones de estas baldosas y mucho menos se cuenta con un precio exacto de las baldosas y debido a que los únicos que instalan estas baldosas es la empresa que las distribuye, se hará de forma aproximada como lo muestra la tabla siguiente:

Tabla XII. **Estimación de instalaciones del sistema piezoeléctrico**

| No. | Descripción | Valor | Cantidad | Total |
|-----|------------------|-------------|----------|-------------|
| 1 | Costo de baldosa | Q 1 102,00 | 10 | Q 11 020,00 |
| 2 | Mano de obra | Q 10 000,00 | 6 | Q 10 000,00 |
| 3 | Gastos varios | Q 10 000,00 | | Q 10 000,00 |
| | | | | |
| | Total | | | Q 31 020,00 |

Fuente: elaboración propia.

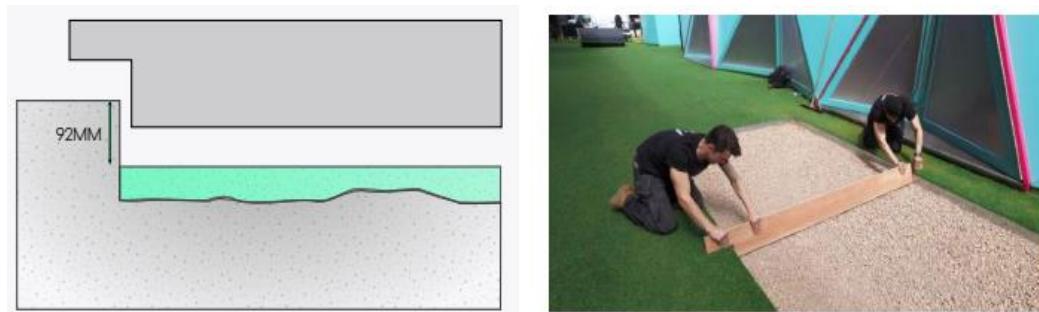
El proceso de instalación de las baldosas está dividido en tres partes lo cual será explicado en los siguientes puntos, tomando en cuenta que el valor de la instalación del sistema piezoeléctrica $V_s = Q 31 020,00$, y sabiendo que no son costos reales debido a que no se tiene información exacta sobre el precio de las baldosas y de la instalación.

- Preparación del sitio de instalación: Esta parte consiste en la excavación, preparación y nivelación del sitio que según Pavegen. “Debe de tener una profundidad de 92mm.”²²

²² Fuente: PAVEGEN. <http://www.pavegen.com/products/>. Consulta: 12 de noviembre de 2017.

Lo cual se muestra en la siguiente figura.

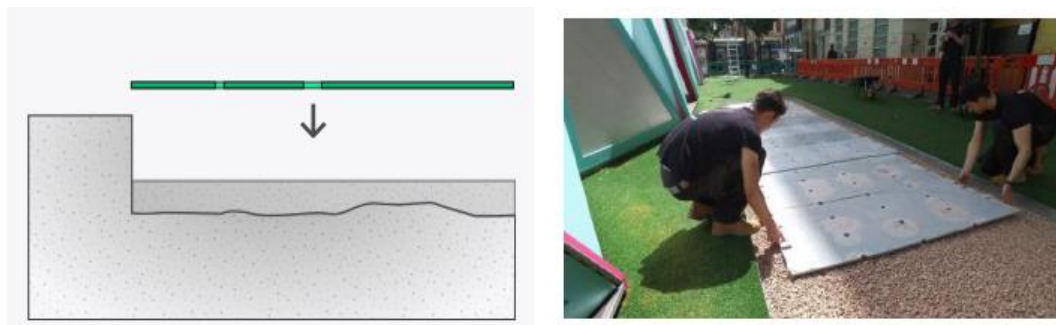
Figura 29. **Preparación del sitio para la instalación de las baldosas piezoeléctricas**



Fuente: <https://mail.google.com/mail/u/0/#inbox/15f6cd28559d19cc?projector=1>. Consulta: 12 de noviembre de 2017.

- Instalación de una base: La instalación de esta base es para hacer soporte a las baldosas para que siempre estén niveladas y no sufran de hundimientos en la tierra.

Figura 30. **Instalación de base para soporte de las baldosas piezoeléctricas**

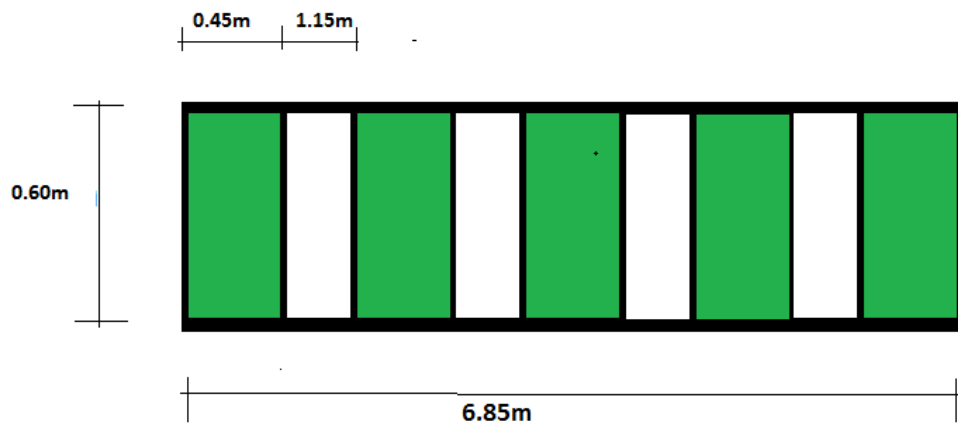


Fuente: <https://mail.google.com/mail/u/0/#inbox/15f6cd28559d19cc?projector=1>. Consulta: 12 de noviembre de 2017.

- Instalación de las baldosas piezoeléctricas: La instalación de las baldosas es exclusivamente hecha por la empresa distribuidora, se han hecho cálculos para la distribución de las baldosas tratando de esta manera que cada persona que circule por dichos lugares pueda pisar todas las baldosas.

A continuación se muestra la distribución de las baldosas.

Figura 31. **Distribución de baldosas**



Fuente: elaboración propia.

6.5. **Valor del consumo de energía en Guatemala**

El consumo de energía en Guatemala se determina a razón de cuanta energía consume un usuario durante una hora, la unidad que es utilizada por las empresas distribuidoras es el KWh (kilovatio por hora), el kilovatio por hora se refiere al término de energía que es utilizada para calcular la cantidad de potencia que se ha utilizado durante un determinado periodo de tiempo en este caso es una hora. Dicho en otras palabras el KWh es el parámetro que mide el consumo de electricidad en algún lugar.

El consumo de energía eléctrica para Guatemala lo determina la CNEE (Comisión Nacional de Energía Eléctrica), que es el ente regulador de las tarifas de cobro por consumo de energía en KWh. A continuación se muestran los valores de cobro por KWh.

Figura 32. **Tarifa de cobro por KWh en Guatemala**

| Tarifa | Ago - Oct 2017, Q/kWh | Nov 2017 - Ene 2018, Q/kWh | Variación Q/kWh | Variación % |
|------------|-----------------------|----------------------------|-----------------|-------------|
| EEGSA TNS | 1.1001 | 1.0898 | -0.01 | -1% |
| DEOCSA TNS | 1.7852 | 1.7790 | -0.01 | -0.3% |
| DEORSA TNS | 1.6759 | 1.6699 | -0.01 | -0.4% |

Fuente: CNEE. <http://www.cnee.gob.gt/wp/?p=3416>. Consulta: 13 de noviembre de 2017.

La tabla anterior muestra las tarifas de cobro por las tres empresas distribuidoras de energía eléctrica, la empresa que distribuye a la Universidad de San Carlos de Guatemala es EEGSA, y se utilizará una tarifa de Q 1,09 por KWh.

6.5.1. **Ahorro económico en relación al costo del KWh y la energía generada**

El ahorro monetario que se obtendrá al utilizar el sistema piezoeléctrico, se calculará en intervalos de tiempo de mes, año y la vida útil del sistema por lo tanto se tiene que:

- Ahorro monetario mensual: Como se pudo determinar con anterioridad el consumo de energía diario para un total de 5 lámparas es de 2,4KWh, por lo tanto tenemos que:

$$A_e = C_l \times P_{kwh}$$

Sustituyendo valores tenemos que:

$$A_m = 30 \times 2,4 \text{ kWh} \times 1,09$$

$$A_m = Q 78,47$$

Dónde:

$$A_m = \text{ahorro monetario en un mes}$$

- Ahorro monetario en un año:

$$A_{ma} = A_m \times 12 \text{ meses}$$

Sustituyendo valores tenemos que:

$$A_{ma} = Q 78,47 \times 12$$

$$A_{ma} = Q 941,58$$

Dónde:

$$A_{ma} = \text{ahorro monetario en un año}$$

- Ahorro monetario en la vida útil del sistema: La vida útil del sistema está estimado en 18 meses por lo tanto el ahorro monetario que se podría dar al momento de implementar este sistema será:

$$A_{ms} = A_m \times V_{us}$$

Sustituyendo valores tenemos:

$$A_{ms} = 78,47 \times 18$$

$$A_{ms} = Q 1 412,38$$

7. FACTIBILIDAD ECONÓMICA

El objetivo principal de este capítulo es poder determinar la viabilidad al momento de querer implementar un sistema de este tipo. Se hará el cálculo de factibilidad y un estudio de la Tasa Interna de Retorno (TIR), para poder saber si el proyecto resulta ser rentable o no.

7.1. Factibilidad económica

El cálculo de la factibilidad del proyecto será en base a la relación que existirá entre el ahorro monetario del sistema en su vida útil y el valor del sistema, por lo tanto:

$$F_p = \frac{A_{ms}}{V_s}$$

Sabiendo que:

$$A_{ms} = Q 1 412,38$$

$$V_s = Q 35 000,00$$

Sustituyendo valores tenemos que:

$$F_p = \frac{Q 1 412,38}{Q 35 000,00}$$

$$F_p = 0,05$$

Dónde:

$F_p = \text{factibilidad del proyecto}$

Como se ve en el resultado anterior, el resultado de la factibilidad del proyecto es muy pequeño y este proyecto no sería rentable al momento de implementarlo.

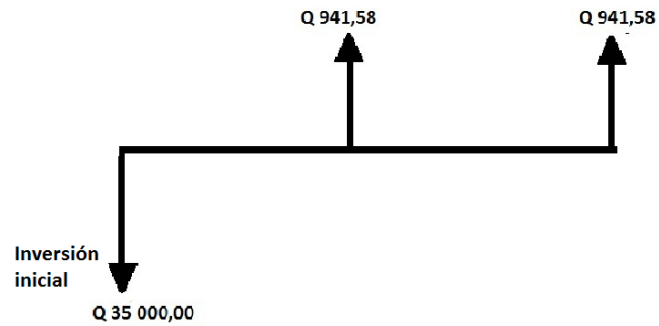
7.2. Tasa interna de retorno (TIR)

La Tasa interna de retorno (TIR) determinará la rentabilidad de la inversión, si se tiene un valor alto de la TIR dirá que el proyecto es rentable y si por el contrario la TIR da un valor negativo o un valor cercano de cero esto indicará que el proyecto no es rentable.

A continuación se hacen los cálculos necesarios para determinar la rentabilidad del proyecto, tomando una base de dos años sabiendo que el proyecto tiene únicamente 1,51 años de vida útil.

- Flujo de caja: El flujo de caja indicara la inversión inicial y el retorno de inversión en años, cabe mencionar que se tomará un periodo de dos años, asumiendo que el sistema tiene como vida útil los dos años de vida útil.

Figura 33. Flujo de caja del sistema piezoeléctrico



Fuente: elaboración propia.

Dónde:

$$A_{ma} = Q 941,58 = \text{ahorro monetario durante un año}$$

$$V_s = Q 31 020,00 = \text{valor de la inversión o instalación}$$

- Cálculo de la TIR:

De la ecuación que denota la TIR

$$VAN = -I + \sum_{n=1}^N \frac{Q_n}{(1+r)^n}$$

Sustituyendo valores tenemos:

$$VAN = -31\,020,00 + \frac{941,58}{(1+i)} + \frac{941,58}{(1+i)^2}$$

Haciendo que el VAN sea 0

$$0 = -31\,020,00 + \frac{941,58}{(1+TIR)} + \frac{941,58}{(1+TIR)^2}$$

$$0 = -31\,020,00(1+TIR)^2 + 941,58(1+TIR) + 941,58$$

Resolviendo la ecuación cuadrática tenemos que:

$$X_1 = 0,19$$

$$X_2 = -0,16$$

Se descarta X_2 por su signo negativo y resolvemos para X_1

$$1 + TIR = 0,19$$

$$TIR = -0,81$$

Con este resultado queda demostrado que la rentabilidad del proyecto es muy mala y por lo tanto no debe llevarse a cabo.

7.3. Cálculo de factibilidad ambiental

El objetivo principal de todo tipo de energía renovable es no contaminar el medio ambiente evitando con esto la emanación de dióxido de carbono a la atmosfera y tener energía limpia y renovable, este tipo de baldosas son amables con el medio ambiente evitando la contaminación del mismo y debido a esto, se hará un estudio del grado de contaminación que pueden ocasionar las baldosas piezoeléctricas.

De esta manera se busca hacer conciencia en las personas de lo útil y necesaria que se ha vuelto la energía renovable y también de esta manera cada persona sentirá que está ayudando al planeta con tan solo pisar las baldosas piezoeléctricas.

El cálculo ambiental es una parte muy importante en la decisión de implementar un proyecto de energía verde, debido a que las emisiones de CO₂ es un problema que afecta a todo el mundo, y por lo cual se buscaran formas de generar energía eléctrica de forma limpia sin contaminar el medio ambiente, en Guatemala se sabe que la generación de energía eléctrica va de la mano con el consumo eléctrico y por ende el consumo eléctrico está estrechamente ligado con la emisión de CO₂, por lo tanto para hacer el estudio de la emisión de gases que se dejara de producir al introducir el sistema piezoeléctrico “debemos usar un factor de red equivalente a 0,49 que determina la cantidad de CO₂ liberada por el consumo de energía eléctrica en la red nacional de Guatemala.”²³

²³ Fuente: MEM. <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2015/05/Balance-Energetico-2016.pdf>. Consulta: 25 de noviembre de 2017.

Y para hacer el cálculo tomamos los siguientes datos:

$$E_{s(Kwh)} = 244,14 \text{ Kw} * h$$

$$F_r = 0,49$$

Sustituyendo valores tenemos que:

$$A_{CO_2} = 244,14 * 0,49$$

$$A_{CO_2} = 119,07 \text{ Kg. } CO_2$$

Dónde:

A_{CO_2} = CO_2 que se deja de producir durante la vida útil del sistema piezoeléctrico.

El anterior resultado indica la gran cantidad de CO_2 que se deja de emitir al medio ambiente al momento de implementar este tipo de sistema.

CONCLUSIONES

1. La demanda de energía eléctrica en el mundo hace que las empresas distribuidoras tiendan a generar más energía para poder cubrir la demanda, esto conlleva a quemar más combustible para poder generar más energía eléctrica sin embargo esto requiere de combustibles fósiles que contaminan con CO_2 el medio ambiente, y debido a que los combustibles fósiles no son infinitos el ser humano se ha visto en la necesidad de implementar sistemas renovables que generen energía eléctrica de manera limpia o verde, la implementación de estos sistemas renovables conlleva a mucha inversión económica y hay sistemas que no son lo suficientemente rentables para invertir en ellos.
2. La implementación de sistemas eléctricos que generen energía eléctrica de manera renovables como el sistema piezoeléctrico que fue objeto de investigación, dependen de una gran inversión inicial, este sistema es dependiente del flujo peatonal, dicho de otra manera si no hay flujo peatonal no hay generación de energía eléctrica, por lo tanto es dependiente en un 100 % del flujo peatonal.
3. La inversión del sistema piezoeléctrico basado en baldosas generadoras de energía eléctrica es muy alta, y poco productiva y en base al estudio realizado se logró comprobar la poca generación de energía que se puede lograr con este sistema, aun teniendo un flujo peatonal muy alto esto no fue de gran ayuda debido a la poca generación de cada baldosa.

4. Las baldosas piezoeléctricas son amigables con el medio ambiente debido a que son en un 80 % hechas con materiales reciclables, pero lastimosamente no puede ser utilizadas como medio de generación para sistemas eléctricos que requieran mayor potencia eléctrica debido al poco aporte energético que tienen, pueden ser utilizadas como parte decorativa de algún lugar concurrido y se buscaría hacer conciencia en las personas, que la implementación de sistemas de generación de energías verdes es importante y es una manera limpia de generar energía para no contaminar al planeta.
5. Con el estudio de la Tasa Interna de Retorno (TIR), se pudo determinar que la implementación del sistema piezoeléctrico es una mala inversión, debido a la poca generación de energía eléctrica y por consiguiente al poco ahorro económico que se puede dar con ese sistema. Es tan poco rentable que el resultado de la TIR dio valores negativos, esto significa y da a conocer que el sistema no amerita una inversión para implementar un sistema de este tipo.
6. En el ámbito ambiental este sistema se destaca y por mucho, debido a la disminución de CO₂ que se evita al generar un KWh, desde el punto de vista ambiental se puede decir que es un sistema apto para instalar en cualquier parte del mundo que busque cuidar el medio ambiente, pero lastimosamente al inversionista poco le interesa el medio ambiente y lo que se busca es una generación de energía mucho más alta para que la inversión inicial sea recuperable en poco tiempo, en pocas palabras se busca un sistema que sea rentable.

RECOMENDACIONES

1. Debido a que el fabricante de las baldosas es muy cuidadoso y no desvela toda la información con respecto a su tecnología y que al ser consultados no proporcionaron mayor información sobre la cantidad exacta de generación eléctrica de las baldosas y del precio exacto de ellas, y aunado a esto, ellos son los únicos que pueden hacer la instalación de dicho sistema, no se recomienda la inversión en dicho sistema.
2. Debido al gran avance tecnológico este tipo de tecnología irá mejorando con el pasar de los años, las baldosas serán más eficientes al momento de generar energía eléctrica y el precio de ellas será mucho menor, esto significará una menor inversión inicial y la rentabilidad del proyecto será aceptable para el inversionista que busca recuperar su inversión en poco tiempo, por eso no hay que dejar este tipo de tecnología por un lado.
3. Debido a que este sistema es totalmente dependiente del flujo peatonal se recomienda hacer un estudio de este antes de implementar dicho sistema.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALVEZ PEREIRA, Antonio Henrique. *Del curso materiales y dispositivos piezoeléctricos fundamentos y desarrollo documento 1*, Brasil: ATCP soluciones piezoeléctricas, 2004. 15 p.
2. ALVEZ PEREIRA, Antonio Henrique. *Del curso materiales y dispositivos piezoeléctricos fundamentos y desarrollo documento 3 de la fase 1*, Brasil: ATCP soluciones piezoeléctricas, 2004. 18 p.
3. ALVEZ PEREIRA, Antonio Henrique, *Cerámicas piezoeléctricas, funcionamiento y propiedades*, Brasil: ATCP, 2010. 7 p
4. GONZALEZ, Adolfo. *Materiales piezoeléctricos y efecto piezoeléctrico*, Argentina. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza. 2009. 19 p.
5. MORA, Jesús Fraile. *Maquinas eléctricas*. 5a ed. España: McGraw-Hill Interamericana, 2003. 757 p.
6. SEAR ZEMANSKY, Young Freedman. *Física Universitaria*. 12a ed. Volumen 1. México: Pearson Educación, 2009. 760 p.
7. VENET ZEMBRANO, Michel. *Del curso materiales y dispositivos piezoeléctricos fundamentos y desarrollo documento 2 de la etapa 1*. Brasil: ATCP soluciones piezoeléctricas, 2004. 20 p.

