



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Estudios de Postgrado

Maestría en Artes en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL USO DE BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS PARA EL
AUMENTO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EDIFICIOS
AUTOPRODUCTORES CON TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA**

Ing. Manuel Eliseo Rojas Sicajá

Asesorado por M. Sc. Ing. Electricista Marcos Alberto González Miranda

Guatemala, enero de 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL USO DE BALDOSAS PIEZOELECTRICAS PARA EL
AUMENTO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EDIFICIOS
AUTOPRODUCTORES CON TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. MANUEL ELISEO ROJAS SICAJÁ

Asesorado por M. Sc. Ing. Electricista Marcos Alberto González Miranda

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**MAESTRO EN ARTES EN GESTIÓN DE MERCADOS ELÉCTRICOS
REGULADOS**

GUATEMALA, ENERO DE 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a.i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE DEFENSA DE TESIS

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a.i.)
EXAMINADOR	Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Mtro. Carlos Alfredo Boj de León
SECRETARIO	Mtro. Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL USO DE BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS PARA EL AUMENTO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EDIFICIOS AUTOPRODUCTORES CON TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 06 de agosto de 2022.

Ing. Manuel Eliseo Rojas Sicajá

LNG.DECANATO.OI.036.2024

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 Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL USO DE BALDOSAS PIEZOELECTRICAS PARA EL AUMENTO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EDIFICIOS AUTOPRODUCTORES CON TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA**, presentado por: **Ing. Manuel Eliseo Rojas Sicajá**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Gestión de mercados eléctricos regulados después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. José Francisco Gómez Rivera
Decano a.i.

Guatemala, enero de 2024

JFGR/gaoc



Guatemala, enero de 2024

LNG.EEP.OI.036.2024

En mi calidad de Directora de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

**“EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL USO DE BALDOSAS
PIEZOELÉCTRICAS PARA EL AUMENTO DE GENERACIÓN DE
ENERGÍA ELÉCTRICA EN EDIFICIOS AUTOPRODUCTORES CON
TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA”**

presentado por **Ing. Manuel Eliseo Rojas Sicajá** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Gestión de mercados eléctricos regulados** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Mtra. Inga Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





Guatemala, 27 de julio de 2023

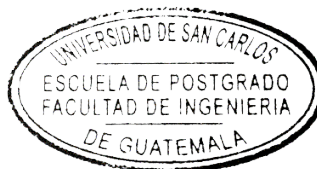
M.A. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

Estimada M.A. Inga. Cordova Estrada

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL y ARTÍCULO CIENTÍFICO** titulado: **EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL USO DE BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS PARA EL AUMENTO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EDIFICIOS AUTOPRODUCTORES CON TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA** del estudiante **Manuel Eliseo Rojas Sicajá** quien se identifica con número de carné **201314518** del programa de Maestria En Gestion De Mercados Electricos Regulados.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el ***Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014.*** Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.



Msc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador
Maestria En Gestion De Mercados Electricos Regulados
Escuela de Estudios de Postgrado

Oficina Virtual



Guatemala, 27 de julio de 2023

M.A. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrados
Presente

Estimada M.A. Inga. Cordova Estrada

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el Trabajo de Graduación y el Artículo Científico: **"EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL USO DE BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS PARA EL AUMENTO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EDIFICIOS AUTOPRODUCTORES CON TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA"** del estudiante **Manuel Eliseo Rojas Sicajá** del programa de **Maestria En Gestion De Mercados Electricos Regulados** identificado(a) con número de carné 201314518.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.



Marcos Alberto González Miranda
Ingeniero Electricista
Colegiado No. 18817

MA. Ing. Marcos Alberto González Miranda
Colegiado No. 18817
Asesor de Tesis

ACTO QUE DEDICO A:

Mi padre

Por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida y ser una persona ejemplar a la que algún día aspiro llegar a ser.

Mi hermana

Quien, desde el cielo, me ha brindado inspiración y perseverancia en momentos de dificultad.

Mis primas

Iris, Susana y Rebeca Us, ya que con su esfuerzo trazaron una ruta en la cual decidí seguir.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser la casa de estudios superior en la que
tuve la oportunidad de forjarme como un
profesional.

Facultad de Ingeniería

Por abrirme sus puertas dando acceso a
conocimientos los cuales llevo con gran aprecio.

Mis amigos

Quienes me han acompañado a lo largo de esta
aventura y espero que sigamos por más.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIII
OBJETIVOS.....	XVII
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Fuentes de energía eléctrica	5
2.1.1. Fuentes de energía no renovables	6
2.1.2. Fuentes de energía renovables	6
2.1.2.1. Energía fotovoltaica	7
2.1.2.2. Piezoelectricidad.....	7
2.2. Mercado eléctrico en Guatemala.....	8
2.2.1. Agentes del mercado mayorista	8
2.2.2. Usuarios	8
2.2.3. Usuario autoprodutor distribuido con excedentes de energía	9
3. MARCO CONCEPTUAL.....	11
3.1. Fenómeno piezoeléctrico.....	11

3.2.	Materiales piezoeléctricos	11
3.3.	Fenómeno fotovoltaico	11
3.4.	Partes de la generación fotovoltaica	12
3.4.1.	Estructuras	12
3.4.2.	Modulo fotovoltaico	12
3.4.3.	Banco de baterías	12
3.4.4.	Regulador de carga.....	13
3.4.5.	Inversor	13
4.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	15
4.1.	Enfoque.....	15
4.2.	Alcance	15
4.3.	Diseño	15
4.4.	Unidad de Análisis.....	16
4.5.	Variables	16
4.6.	Fases del desarrollo de la investigación.....	19
4.7.	Diseño de baldosa piezoeléctrica.....	19
4.7.1.	Diseño físico de la baldosa piezoeléctrica.....	19
4.7.1.1.	Materiales seleccionados	19
4.7.1.2.	Diseño electromecánico	20
4.8.	Características generales del edificio hipotético	21
4.8.1.	Determinación de la población en edificio hipotético.....	25
4.9.	Toma de datos con baldosa piezoeléctrica.	26
4.9.1.	Determinación de tamaño de muestra	27
4.9.2.	Circuito de toma de datos.....	28
4.9.3.	Metodología de recopilación de datos.	33
4.9.3.1.	Medición de masa	33
4.9.3.2.	Mediciones en osciloscopio.....	34

4.10.	Generación de autoproducción con tecnología fotovoltaica instalada	36
5.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	39
5.1.	Diseño, lista de materiales y presupuesto de una baldosa piezoeléctrica.....	39
5.2.	Potencia y energía generada por una baldosa piezoeléctrica	44
5.3.	Aumento de generación en edificio UACEE.	47
5.4.	Gastos de Implementación.	50
5.5.	Lugares estratégicos para aprovechamiento de baldosas.	52
6.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	53
6.1.	Diseño de Baldosa piezoeléctrica.....	53
6.2.	Relaciones de paso potencia producida por una baldosa piezoeléctrica.....	54
6.3.	Aumento de generación en edificio UACEE.	55
6.4.	Lugares estratégicos para aprovechamiento de baldosas.	55
	CONCLUSIONES	57
	RECOMENDACIONES	59
	REFERENCIAS	61
	APÉNDICES	65

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Árbol del problema.....	XIV
Figura 2.	recolección de datos con baldosa piezoeléctrica.	18
Figura 3.	zona 4 ciudad de Guatemala.	22
Figura 4.	Edificio ubicado en zona 4 sexta avenida, vía 1 y ruta 3.	23
Figura 5.	Trafico de entrada y salida de población de planta y visitas.	26
Figura 6.	Circuito de medición.	29
Figura 7.	Curva voltaje vs corriente Diodo XLVG11D.	31
Figura 8.	Resistencia de Diodo XLVG11D.	32
Figura 9.	osciloscopio y circuito de medición para toma de datos.	34
Figura 10.	Curvas de voltaje paso de una persona.....	35
Figura 11.	Gráfico área y potencia paneles solares.....	37
Figura 12.	Diseño mecánico baldosa piezoeléctrica.	41
Figura 13.	Circuito eléctrico baldosa piezoeléctrica.	42
Figura 14.	Baldosa piezoeléctrica.	43
Figura 15.	Gráfico de potencia vs masa obtenidos.	44
Figura 16.	Energía generada por población y baldosas piezoeléctricas.	46
Figura 17.	Energía piezoeléctrica y solar generada en un 1 día.	49
Figura 18.	Porcentaje de la energía solar en función de la población.....	50

TABLAS

Tabla 1.	Matriz de Variables.....	16
Tabla 2.	Matriz de Indicadores	17
Tabla 3.	Edificios de referencia zona 4	24
Tabla 4.	Tamaño de muestra	28
Tabla 5.	Dimensiones de paneles solares y potencias.....	36
Tabla 6.	Presupuesto para la fabricación de baldosa piezoeléctrica.....	39
Tabla 7.	Generación estimada por baldosas piezoeléctricas.	47
Tabla 8.	Comparación entre generación piezoeléctrica y energía solar.	48
Tabla 9.	Inversión, mantenimiento y generación anual.	51

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperio
Dp	Densidad poblacional
f	Frecuencia
k	Kilo
Lb	Libra
m	mili
m	Metro
n	Tamaño buscado de muestra
N	Tamaño de Universo
p	probabilidad de que ocurra un evento esperado
P	Población
Peso	fuerza ejercida por una masa contra el suelo
Ps	Paso
Q	Quetzales
q	probabilidad de que un evento no ocurra
W	Watt
Z	Parámetro estadístico para nivel de confianza

GLOSARIO

AC	Corriente alterna.
AMM	Administrador del Mercado Mayorista.
DC	Corriente directa.
kWh	kilowatt-hora.
LED	diodo emisor de luz.
OBS	Programa de computadora para grabación.
Piezoeléctrico	Característica de un material capaz de reproducir el fenómeno piezoeléctrico.
Piezoelectricidad	Electricidad generada a través del efecto piezoeléctrico.
UACEE	Usuario autoprodutor con excedente de energía.

RESUMEN

La presente investigación nace de la preocupación que se tiene a nivel mundial por los efectos que ha causado el cambio climático estos en gran medida han sido provocados del uso desmesurado de combustibles fósiles. Desde hace unas décadas esta preocupación ha resultado para el sector eléctrico, en el auge de las energías verdes como una alternativa a la dependencia de las fuentes de energía contaminantes.

En esta investigación se analizó el impacto que tendría la implementación de baldosas piezoeléctricas para la generación de energía eléctrica en conjunto a la energía solar en un edificio hipotético basado en características del área metropolitana de la ciudad de Guatemala. Para lo anterior se diseñó, presupuestó y construyó un prototipo de una baldosa piezoeléctrica funcional, la cual se utilizó para la adquisición de datos de una muestra definida por las características del edificio hipotético, haciendo uso de un circuito de medición.

Se obtuvo un valor promedio, de un total de 66 muestras una potencia por paso de 16.82 mW y energía generada por el paso de poblaciones de 800, 1000 y 1500 personas con un porcentaje de visitas del 20% de la población base siendo de 0.0181 kWh, 0.0226 kWh y 0.034 kWh de manera diaria, se compararon las energías eléctricas producidas por la tecnología solar y piezoeléctrica considerando a la energía piezoeléctrica como poco relevante para su implementación en esta configuración de autoproducción con excedentes de energía. Con el fin de generar una cantidad mayor de energía eléctrica se propusieron lugares en los cuales se producen cuellos de botella pudiendo aumentar la cantidad de pasos que se pueden obtener sobre las baldosas.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Conforme a la evolución de la generación de energía y en cumplimiento de los requerimientos actuales cada vez más altos en lo que se refiere a fuentes de energía renovables, se han hecho cada vez más comunes el uso de fuentes de energía alternativas o intermitentes como puede ser las energía solar o eólica en usuario consumidores. En Guatemala estos usuarios se encuentran definidos dentro de la Norma Técnica para la Conexión, Operación, Control y Comercialización de la Generación Distribuida Renovable -NTGDR- y Usuarios Autoproductores con Excedentes de Energía, Resolución CNEE-171-2008.

Por su naturaleza estas tecnologías para generación de energía no son constantes a lo largo del día por eso se conocen en algunas literaturas como fuentes de generación intermitente o alternativa. En el caso de la tecnología de paneles solares ha tenido una gran popularidad por su fácil instalación y el poco espacio que ocupan dentro de una instalación que permite el aprovechamiento de energía eléctrica en un edificio.

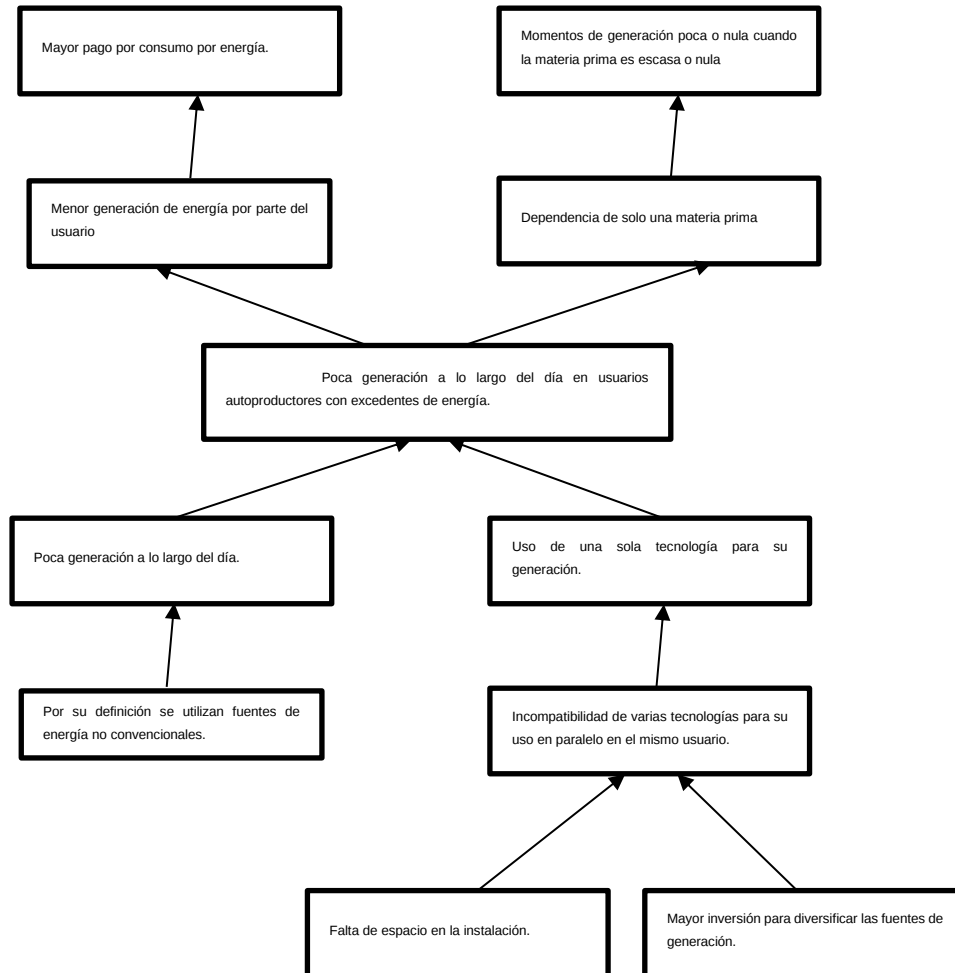
Tomando el caso de un edificio de oficinas con tecnología fotovoltaica instalada contando con la instalación para inyectar energía a la red de distribución se tienen tiempos muertos por la intermitencia y dependencia de los horarios en los que existe radiación, esto supone el desaprovechamiento por periodos de tiempo en el elemento inversor para la conversión de corriente DC a AC. La tecnología fotovoltaica está limitada a su instalación en espacios del exterior por la necesidad de radiación para la conversión de energía solar a energía eléctrica limitándose a áreas como el techo o patios, dentro de una instalación fabricada para resguardar personas se puede llegar a tener un aumento en la generación

y hacer uso de una mayor parte de las instalaciones con la implementación de baldosas piezoeléctricas.

Por medio del presente esquema se plantean las causas y efectos del problema de estudio.

Figura 1.

Árbol del problema



Nota. Diagrama que muestra el árbol del problema de la investigación. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

La formulación del problema estuvo estructurada por una pregunta central que intenta buscar una solución general, además, fue necesario apoyarse y basarse en cuatro preguntas auxiliares que ayudarán a formular los objetivos específicos, por medio de ese planteamiento se intentó dar una solución viable al problema central.

¿Qué impacto tendrá en la generación producida por usuarios autoprodutores con excedentes de energía el uso de baldosas piezoeléctricas?

Acompañada de las preguntas auxiliares que son necesarias responder para dar una respuesta a la pregunta central.

- ¿Cómo se fabrican y cuál es el costo de estas baldosas piezoeléctricas?
- ¿Cuánta potencia se puede generar por persona en un paso y cuanta energía se puede generar en distintos periodos de tiempo con distintas densidades poblacionales?
- ¿Cuál será el aumento en la generación si se implementa esta tecnología?
- ¿Dónde se encuentran los lugares estratégicos para la colocación de estas baldosas?

A continuación, se presentan las delimitaciones contextual, geográfica e histórica que se tomaron en cuenta para la investigación:

Este estudio se contextualizó en el ámbito de innovación para la generación de energía de maneras alternativas en el país, haciendo uso de instalaciones ya existentes con el fin de aumentar la producción de energía.

Este estudio se limitó a ser teórico y se redactó orientado a un edificio ficticio con el fin de que sea flexible y posible, si el lector lo desea, dar seguimiento

a lo planteado en este trabajo y se adapte para la integración de la tecnología propuesta en este estudio.

Se realizó delimitación para el contexto histórico que se tiene en la república de Guatemala a partir de julio de año 2022, con proyección hacia el futuro considerando la vida útil de la baldosa piezoeléctrica, ya que no se cuentan con estudios de manera formal sobre el acople de estas dos tecnologías, solar y piezoeléctrica, se realizó una proyección con los datos recopilados a manera de apoyo para que el lector pueda decidir si le es factible por la cantidad de energía que podría producir.

OBJETIVOS

General

Evaluar el impacto que tendría la utilización de baldosas piezoeléctricas para el aumento de generación en edificios autoprodutores con tecnología fotovoltaica.

Específicos

1. Diseñar, enlistar materiales y elaborar un presupuesto para una baldosa piezoeléctrica.
2. Determinar cuanta potencia en promedio puede producir una persona por paso y cuantificar la cantidad de energía que se puede producir en periodos de tiempo diferentes con diferentes densidades poblacionales.
3. Describir el aumento de la generación de un autoprodutor, si se implementa esta tecnología.
4. Proponer lugares estratégicos dentro de un edificio donde se pueden aprovechar de una manera más eficiente.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

Esta investigación tiene un alcance teórico con delimitación a un edificio autoprodutor con excedentes de energía que cuenta con tecnología fotovoltaica instalada, el edificio no existe físicamente, para el cálculo de sus dimensiones y población interna se tomaron áreas y cantidad de niveles de 11 edificios en la zona 4 sobre la sexta y séptima avenida de la ciudad de Guatemala utilizando herramientas de *Google Maps*.

Con la población promedio de este edificio se determinó el tamaño de la muestra para la adquisición de datos, dando como resultado 66 muestras. Posteriormente se diseñó un prototipo de una baldosa piezoeléctrica con materiales disponibles en el mercado de la ciudad de Guatemala, orientado el diseño para la toma de muestras considerando que pudiera contener el pie de una persona adulta en su totalidad; descartando materiales como el plástico y la cerámica, utilizando madera para las tapas externas de la baldosa, tornillos, cable, piezoeléctricos tipo *buzzer* y diodos rectificadores. En ese sentido se construyó el prototipo de una baldosa piezoeléctrica funcional con el apoyo de un circuito de medición constituido por un osciloscopio una resistencia y un led se realizaron las mediciones.

Se midió la masa y se tomaron las curvas de voltajes en el circuito de medición al dar un paso sobre la baldosa piezoeléctrica realizando 5 repeticiones para cada una de las 66 muestras durante la toma de datos. Los datos fueron medidos con personal de una planta de producción de insumos farmacéuticos y en las afueras de una congregación cristiana, con los voltajes promedio obtenidos en el circuito de medición y los valores de resistencia del diodo y el resistor se obtuvieron las

potencias instantáneas y con los tiempos de la curva que se apreciaba en el osciloscopio se obtuvo el tiempo promedio que dura el paso de una persona, dato que fue útil para el cálculo de la energía generada por el paso de una persona.

Tomando en cuenta las dimensiones del edificio se utilizó el 20% del área superior para la utilización de generación de energía eléctrica por medio de paneles solares tomando en cuenta el tiempo que pueden generar energía estos dispositivos. Con ambas energías descritas, piezoeléctrica y solar, se realizó una comparación entre el mejor panorama de la energía piezoeléctrica y la solar expresando en porcentajes respecto a la solar el aumento de energía generada.

Con la energía que puede ser generada gracias a la tecnología piezoeléctrica se realiza un breve resumen sobre los gastos que conllevaría la construcción y mantenimiento de las baldosas y la ganancia en descuentos de energía eléctrica consumida que representaría.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se tiene la preocupación acerca de los efectos que provocará el calentamiento climático esto derivado de la irresponsabilidad que ha tenido la humanidad a lo largo de los años en la administración de los recursos que se encontraban en la tierra. Acciones como la deforestación, el uso de carbón y combustibles fósiles siendo estos últimos de los más perjudiciales en incremento de gases de efecto invernadero esto provoco el auge ya unas décadas atrás, de la utilización de energías renovables para la generación de electricidad usando tecnologías que por sí solas generan una cantidad considerable de potencia para la matriz energética donde se encuentren instaladas.

Siguiendo la tendencia de la cultura de energías limpias se han encontrado maneras de generación de energía por métodos no convencionales aprovechando efectos físicos como lo puede ser el efecto piezoeléctrico, el protagonista en esta investigación, el efecto consiste en presionar y provocar una deformación a un elemento de cristal y este en respuesta tendrá movimientos en los electrones que lo conforman, el uso de estos elementos ha dado lugar a investigaciones donde se configuran elementos piezoeléctricos para aplicaciones de baja potencia como puede ser activaciones de sensores o iluminación ornamental aprovechando las vibraciones del ambiente.

El usuario final que cuenta con una fuente de generación de energía eléctrica capaz de aportar energía a la red de distribución eléctrica donde se encuentra conectado se le conoce como usuario distribuido con excedentes de energía, esto en el territorio guatemalteco. La energía solar es una de las que

más popularidad ha tenido para usuarios finales por su fácil implementación bajo costo y poco espacio de utilización representando en Guatemala, un ahorro en el costo mensual de la energía eléctrica consumida. Debido a la naturaleza intermitente de la tecnología solar como fuente de energía se tienen lapsos de tiempo en el que no se genera energía eléctrica y esto se deriva en tiempos muertos o de bajo aprovechamiento de las instalaciones para su funcionamiento.

Para esta investigación se evaluó cual puede llegar a ser el efecto que tendría la implementación de baldosas con elementos piezoeléctricos como apoyo para generación con la que ya cuenta un edificio hipotético catalogado como autoprodutor con excedentes de energía, se fabricó una baldosa piezoeléctrica prototipo se tomaron datos de masa y potencia generada y así conseguir la relación entre masa y potencia que puede generar por el paso de una persona promedio. Se realizaron proyecciones a futuro donde se aprecia cual es el aumento de la generación en distintos periodos de tiempo con distintas poblaciones caminando sobre un porcentaje del edificio cubierto con baldosas piezoeléctricas.

La investigación consta de 5 fases que son: recopilación bibliográfica, durante esta fase se recopilaron datos que se consideraron relevantes para la investigación sobre estudios relacionados; diseño de baldosa piezoeléctrica: se fabricó un prototipo de baldosa piezoeléctrico de manera mecánica y circuito eléctrico acompañado de su presupuesto esta con el fin de utilizarla para la recopilación de datos; características de edificio hipotético: se recopilaron datos de edificios en el área metropolitana para dar dimensiones al edificio hipotético al que va orientada la investigación; toma de datos con baldosa piezoeléctrica: haciendo uso de la baldosa piezoeléctricas se tomaron mediciones, con una muestra de 66 personas, de masa y potencia generada en un paso utilizando estos datos se proyectaron a futuro asumiendo distintas poblaciones.

Generación de autoproducción con tecnología fotovoltaica instalada: con las características del edificio hipotético se determinó la cantidad de paneles solares y energía eléctrica que se podría generar. Con el desarrollo de las fases de investigación se realizó la evaluación del impacto de la implementación de tecnología piezoeléctrica verificando si es viable o no, se determina por qué no es recomendable el implementar esta tecnología con el apoyo de los datos en la presentación de resultados posteriormente se concluyen los resultados obtenidos y se dan las recomendaciones a criterio del investigador acerca de la implementación y diseño de baldosas piezoeléctricas finalizando con las referencias y el apéndice que fueron necesarios para investigación.

1. ANTECEDENTES

Durante la búsqueda de información sobre el uso baldosas piezoeléctricas para la generación de energía eléctrica, se consideraron como bases para comenzar este estudio, los documentos que se presentan a continuación:

El paper *Feasibility Study for Using Piezoelectric Energy Harvesting Floor in Building's Interior Spaces* elaborado para la conferencia internacional de energía alternativa y renovable realizada en febrero de 2017 en España. Se realizó un estudio de factibilidad sobre varias losas piezoeléctricas que se encuentran en el mercado egipcio comparando diferentes opciones desde los 10 watts hasta 0.5 *miliwatts*, ambos por paso, donde se recomienda que para lugares con baja densidad de tránsito como puede ser un apartamento se pueden utilizar losas de alta potencia para aplicaciones como la operación de sistemas de iluminación LED (Mohamed, 2017).

Se toma como antecedente el estudio anterior debido a que en la comparación se toma en cuenta el piezoeléctrico tipo *Buzzer* y se menciona que para la utilización se debe realizar la fabricación de las baldosas, no se profundiza sobre la elaboración, pero fue tomada como una opción por ser piezoeléctricos de bajo costo, la presente investigación tiene previsto utilizar este tipo de elementos.

En los estudios realizados en la tesis *Foot Step Power generation System* presentada en *ANNA University* en abril de 2013, concluye que el uso de elementos piezoeléctricos fue un éxito para la generación de energía de manera económica en áreas donde se tiene un acceso pobre o nulo a la electricidad

menciona que puede alimentar cargas de corriente alterna o corriente directa dependiendo de la fuerza aplicada al cristal piezoeléctrico (KALAIVANAN, 2013). Se consideró este estudio como precedente debido a que en él se comprobó que energía producida es suficiente para algunas aplicaciones de lugares donde se tiene acceso nulo a la electricidad, es de interés el lograr producir la mayor cantidad de potencia en este estudio, aunque no funcionaran en isla los elementos piezoeléctricos se toma en consideración el método por el cual se logró producir una potencia mayor.

En el Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio titulado Optimización de piezoeléctricos comerciales para su uso en sistemas de Energy Harvesting publicado en 2015, en donde se caracterizan materiales piezoeléctricos para el uso de cosecha de energía aprovechándola para alimentar equipos electrónicos de baja potencia también analiza la transformación de vibraciones en captadas en el ambiente y se propone captarlas en capacitores luego de la rectificación de la corriente eléctrica. (Jiménez et al., 2015).

Se considera este estudio como antecedente debido a la propuesta de la captación de energía en capacitores, para el acople de la generación piezoeléctrica con la energía solar puede hacerse de esta manera, inyectando el total de la energía almacenada en los capacitores, minimizando las pérdidas que puede tener el sistema.

Para la *12th International Conference on Vibration Problems* se presentó el *Paper Random Vibration Energy Harvesting by Piezoelectric Stack Charging the Battery* en el que se propone el uso de piezoeléctricos para aprovechar las vibraciones aleatorias del ambiente y con la ayuda de estos elementos realizar la carga de un juego de baterías de litio, este arreglo se utiliza para alimentar una

lampara led durante los momentos de oscuridad. Los datos mostrados son simulados aplicando fuerzas de hasta 2000 Newton a diferentes frecuencias, sobre un cristal piezoeléctrico, obteniendo para 10 Hertz una potencia de salida de 1mw aproximadamente. Para poder estimar el límite de la cosechadora, basada en pilas piezoeléctricas, con precisión se utilizaron herramientas de modelado que permiten el análisis en diferentes condiciones de funcionamiento, pudiendo de esta manera encontrar los parámetros de diseño de pila. (Sergey Shevtsov, 2016).

Se consideró este estudio debido a que en el análisis de a distintas frecuencias se toma en cuenta el circuito de rectificación, las resistencias en la entrada antes del puente de diodos obteniendo que a mayor resistencia de entrada se puede al puente de diodos obtener una mayor potencia de salida del puente rectificador para frecuencias bajas. Para el uso de tránsito de personas, puede considerarse como vibraciones aleatorias de baja frecuencia, se tomará en cuenta para el circuito de diseño de la baldosa piezoeléctrica.

En el estudio que tiene como título *Optimizing orientation of piezoelectric cantilever beam for harvesting energy from human walking* se llevó a cabo un experimento que consistió en integrar un sistema, pegado a la pierna de una persona, de una masa que oscila a cada paso de la persona con el fin de aprovechar la mayor cantidad de energía para abastecer sus aparatos electrónicos, este fue un experimento que puede ser un trampolín para el estudio de recolectores de energía basados en los pasos de una persona y en los múltiples impactos que se generan al caminar (Shevtsov, et al., 2015).

Este documento se incluyó por la estimación que se tiene de la frecuencia de caminata de una persona que se determina a 1Hz y el mejor ángulo para el aprovechamiento de la energía según el estudio, es de 70° respecto a la pierna

que realiza el paso. Datos que se tomaran en cuenta para la elaboración de la baldosa cuando se llegue a esa parte en la investigación.

2. MARCO TEÓRICO

A continuación, se desarrollarán los temas que se consideraron necesarios desarrollar para una mejor comprensión de la investigación.

2.1. Fuentes de energía eléctrica

En la Naturaleza los cuerpos, o un conjunto de cuerpos, que cuentan con una masa tienen mayor o menor capacidad de realizar un trabajo (Roldan, 2008). esta es una propiedad intrínseca de la materia y se conoce como energía. Todos los cuerpos que existen en la naturaleza cuentan con esta cualidad.

La electricidad es la capacidad que tienen los materiales, o un conjunto de ellos, para hacer que los electrones que los conforman realicen un trabajo, a esta capacidad se le conoce como energía eléctrica, puede ser definida también como el medio que utiliza la materia para actuar (Cevallos, 1983). Desde su descubrimiento a lo largo de la historia el ser humano ha encontrado diversas formas para la generación de electricidad con el fin de utilizar la corriente eléctrica en una gran variedad de aplicaciones. A las tecnologías que se utilizan para la generación de energía eléctrica se les suelen nombrar en relación con la materia prima que les es necesaria para lograr esta tarea. Las fuentes de energía se pueden catalogar en dos grandes grupos que son: fuentes de energía renovable y fuentes de energía no renovable.

2.1.1. Fuentes de energía no renovables

Se conocen como fuentes de energía no renovable a las que utilizan recursos finitos, no recuperables o de lenta recuperación que se encuentran en la naturaleza como ejemplo se pueden mencionar a los combustibles fósiles, los isotopos radioactivos utilizados para la energía nuclear y el carbón (Energía Solar Ministerio de industria Energía y Minería [MEM], 2022).

Este tipo de tecnologías, aunque son confiables en lo que estabilidad y tiempos de respuesta se refiere dependen de materias finitas y provocan en su mayoría gases como CO₂ que contribuye a el efecto invernadero y al calentamiento global. Por estos motivos y el temor de que en un futuro la humanidad podría quedarse sin materia prima para la generación de energía eléctrica se han buscado el apoyo de otro tipo de tecnologías.

2.1.2. Fuentes de energía renovables

Las fuentes de energía renovables son aquellas que para su aprovechamiento utilizan recursos de la naturaleza que se reponen más rápido de lo que son consumidos algunos ejemplos de este tipo de fuentes son el viento y la luz solar (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2022). Este tipo fuentes de energía son un factor clave para el amortiguamiento de los efectos del cambio climático, haciendo un uso de tecnología se pueden lograr obtener electricidad de los distintos procesos que ocurren en la naturaleza como el fluir de los ríos, el soplar del viento o la radiación que recibe la tierra del sol.

Las energías renovables dependen de las características naturales del entorno, esto hace que sean instaladas en lugares donde existe un recurso natural en abundancia, una de las tecnologías que ha tenido mayor popularidad

es la que aprovecha la fuente de energía más grande y abundante en la tierra, la radiación proveniente del sol.

2.1.2.1. Energía fotovoltaica

Es la energía eléctrica que se obtiene del aprovechamiento de la radiación del sol por medio de la instalación de paneles fotovoltaicos (Asociación de generadores con energía renovable [AGER], 2022). Este tipo de tecnología es abundante y limpia, pero tiene la limitante de que no se puede transformar la totalidad de la radiación recibida por un panel solar en electricidad además de no poder obtener una eficiencia total, para la generación de grandes cantidades de energía eléctrica se necesitan grandes extensiones de terreno.

A pesar de las limitantes, como su eficiencia y la relación directa en generación y área, las bondades de la generación fotovoltaica han hecho que tenga una buena aceptación y es una de las más populares respecto a energías limpias se refiere.

2.1.2.2. Piezoelectricidad

Es la energía eléctrica que se puede obtener a través del efecto piezoeléctrico. Este es un efecto natural físico que transforma la presión mecánica, aplicada a un material piezoeléctrico, a movimiento de cargas eléctricas. El fenómeno piezoeléctrico fue descubierto por Jacques y Pierre Curie en 1881, mientras hacían investigaciones acerca de la piroelectricidad, fue utilizado para la elaboración de un dispositivo cuyo fin era el de realizar calibraciones (Museo virtual de la ciencia del CSIC, 2022). Este tipo de tecnología aprovecha los movimientos mecánicos y deformaciones que se pueden realizar a un cristal para el movimiento de electrones, electricidad.

La existencia de este fenómeno abre la posibilidad a que se pueda generar energía eléctrica aprovechando procesos cotidianos que involucren movimiento, como vibraciones en los ambientes industriales, el paso de vehículos o el caminar de una multitud, siendo este último el tema principal de esta investigación.

2.2. Mercado eléctrico en Guatemala

Es el conjunto de Operaciones de compra y venta de energía y potencia a corto y largo plazo. En el mercado se encuentran separadas las actividades de la industria eléctrica con el fin de fomentar la libre competencia, para comercialización y generación. Las actividades de transporte y distribución son reguladas cuentan con integrantes de iniciativa pública y privada para prestar estos servicios, estos son otorgados mediante licitaciones públicas (Administrador de mercado mayorista [AMM], 2020).

2.2.1. Agentes del mercado mayorista

Son considerados como agentes del mercado mayorista según la ley general de electricidad los generadores, transportistas, distribuidores, comercializadores e importadores. Estos deben superar el tamaño límite establecido en el reglamento de la ley general de electricidad (Congreso de la Republica, 1996).

2.2.2. Usuarios

Según el reglamento de la Ley General de Electricidad, toda persona o asociación que cuente con un contrato vigente de suministro eléctrico con una distribuidora (Acuerdo Gubernativo Número 256-97, (Reglamento ley general de Electricidad) 1997).

2.2.3. Usuario autoprodutor distribuido con excedentes de energía

Es un usuario, conectado al sistema de distribución, que dentro de sus instalaciones cuentan con una fuente para generación de energía eléctrica, esta debe ser renovable y tener la capacidad de inyectarla energía al sistema. Este tipo de usuarios no recibe remuneración por la energía que inyecta al sistema, pero la potencia generada por sus instalaciones se descuenta de la potencia suministrada traduciéndose en un ahorro al pago del servicio (Comisión Nacional de Energía eléctrica [CNEE], 2014).

3. MARCO CONCEPTUAL

3.1. Fenómeno piezoeléctrico

Se produce al ejercer presión sobre un cristal piezoeléctrico, este fenómeno fue descubierto por Pierre y Jacques Curie en 1881. Al presionar un elemento piezoeléctrico esto causa un desplazamiento de cargas relacionado directamente a la presión ejercida. (Chacón et al., 2012).

3.2. Materiales piezoeléctricos

En el descubrimiento de los hermanos Curie fueron catalogados como materiales piezoeléctricos, tales como el topacio, sal de Rochelle, turmalina y el cuarzo, de estos mencionados únicamente se comercializa con el cuarzo para ser utilizado como sensor piezoeléctrico. (Museo virtual de la ciencia del CSIC, 2022).

3.3. Fenómeno fotovoltaico

A mediados del siglo XIX Becquerel, físico de nacionalidad francesa, descubrió que la radiación solar puede ser transformada en energía eléctrica, por medio de la estimulación sobre un semiconductor a ciertas frecuencias de la luz, midiendo en los extremos del semiconductor una diferencia de potencial. (Gasquet, 2004)

3.4. Partes de la generación fotovoltaica

Para la conversión de la energía radiante a eléctrica por medio de paneles solares se hace el uso de un sistema de generación fotovoltaico el cual consta, principalmente, de los siguientes elementos.

3.4.1. Estructuras

La generación solar es por lo general instalada a la intemperie, y necesita de bases metálicas galvanizadas, permiten sostener el panel solar sobre una superficie estas deben ser lo suficientemente resistentes para sostener el peso y las fuerzas que puede ejercer el viento sobre el o los paneles, tienen también la función de mantener el ángulo óptimo calculado por el integrador del sistema solar.

3.4.2. Modulo fotovoltaico

El módulo fotovoltaico también conocido como panel solar, es el elemento que transforma la energía radiante proveniente del sol a eléctrica utilizando encapsulados de silicio conectados eléctricamente, existen de diversas opciones en el mercado siendo las principales categorías monocristalinos y policristalinos.

3.4.3. Banco de baterías

Para el almacenamiento de la energía generada por el módulo fotovoltaico, es necesario un banco de baterías, este es un conjunto de baterías conectadas en paralelo con el fin de almacenar y surtir energía para momentos de escasa radiación suministrando así un voltaje constante a la salida del sistema antes de ser convertido a corriente alterna.

3.4.4. Regulador de carga

El banco de baterías necesita un dispositivo electrónico cuya función es equilibrar la carga de las baterías de una manera eficiente. De esta manera el conjunto de baterías tendrá una mayor vida útil y no se sobrecargará en momentos de alta radiación solar.

3.4.5. Inversor

A la salida del sistema antes este elemento se obtiene una salida de voltaje y corriente en DC. El inversor es el elemento encargado de convertir la corriente directa proveniente del banco de baterías al sistema de distribución con el que cuenta el usuario.

4. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

Las características del estudio se describen a continuación.

4.1. Enfoque

El enfoque de esta investigación fue cuantitativo considerando que las variables que se necesitan para este estudio son en su totalidad medibles del tipo numéricas, potencia, energía, masa y densidad de población, las variables que pueden resultar también de sus interacciones son todas variables cuantitativas continuas, no se cuenta con variables cualitativas dando al estudio un enfoque cuantitativo.

4.2. Alcance

El alcance de la presente investigación fue diseñar y construir un prototipo de una baldosa piezoeléctrica que apoye en la generación de energía de un hipotético usuario autoprodutor con excedentes de energía, aprovechando las instalaciones y equipo utilizado; así como determinar la capacidad de generación de dicha baldosa, variando al final la población y analizar si es viable su implementación.

4.3. Diseño

El estudio cuenta con un diseño pre experimental, debido a que se midió la potencia generada por una baldosa piezoeléctrica en respuesta al paso de una persona. No se realizó ninguna manipulación de datos tomados, solamente

estimaciones bajo distintos escenarios poblacionales durante diferentes periodos de tiempo.

4.4. Unidad de Análisis

Para la utilización de esta tecnología se consideró un edificio hipotético autoproducer con tecnología fotovoltaica y con una alta afluencia de personas ingresando y saliendo en horas determinadas con el fin de realizar una evaluación de la potencia y energía que esta tecnología podrá generar. El lector del estudio podrá decidir si le es conveniente la implementación por las características de su edificio.

4.5. Variables

Las variables e indicadores considerados para este estudio se presentan a continuación.

Tabla 1.
Matriz de Variables

	Variable	Definición Conceptual	Dimensionales
V1	Potencia eléctrica (w)	Índice de energía transferida, desde una fuente a un sumidero, por unidad de tiempo.	Watts
V2	Energía (Wh)	Cantidad de trabajo eléctrico realizado durante un transcurso de tiempo.	Watt-hora (Wh)

Nota. Variables necesarias para la investigación. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Tabla 2.

Matriz de Indicadores

Indicador	Definición Conceptual	Dimensionales.
Potencia/paso. (w/paso)	Relación de la potencia producida por una persona al dar un paso, ejerciendo una fuerza promedio con base en los datos obtenidos de V2, sobre un piso piezoeléctrico.	Watt/Paso

Nota. indicadores necesarios para la investigación. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Para la recolección de datos se diseñó un circuito de medición, se determinó el tamaño de la muestra y los equipos para la medición. Con relación a la toma de datos, es importante comentar que para cada individuo se midió cinco veces el paso sobre la baldosa, con el fin del error de la medición provocado por condiciones externas tales como la curiosidad o timidez.

A cada persona se le midió la masa en libras y se solicitó que pasara sobre la baldosa piezoeléctrica con un solo pie dando el siguiente paso sobre el suelo firme y regresara a dar un paso con un solo pie sobre la baldosa.

Figura 2.

recolección de datos con baldosa piezoeléctrica.



Nota. Visita a las afueras de una fábrica de productos farmacéuticos. Elaboración Propia, Captura fotos tomadas con smartphone.

Se visitaron las afueras de una planta producción de insumos farmacéuticos recolectando un total de 39 muestras y las afueras de una congregación cristiana recolectando un total de 46 muestras más únicamente fueron tomadas en cuenta las primeras 66 muestras.

Luego se revisaron las grabaciones para analizar las curvas de voltaje para cada medición y tabulándolos, obteniendo los valores promedio de potencia generada, tiempo de paso y energía promedio por paso, esta tabla se puede encontrar resumida en el apéndice como Tabla apéndice 1.

4.6. Fases del desarrollo de la investigación

A continuación, se desglosará las acciones que fueron necesarias para cumplir con los objetivos de la investigación.

4.7. Diseño de baldosa piezoeléctrica

El diseño del prototipo de la baldosa piezoeléctrica considera tanto el diseño del circuito eléctrico para la conducción de la potencia generada por el paso de una persona, como el diseño físico, dimensiones y materiales, para que sea resistente al esfuerzo al cual será sometido y sea de fácil implementación; los cuales se describen a continuación.

4.7.1. Diseño físico de la baldosa piezoeléctrica

Para la construcción de la baldosa piezoeléctrica se consideraron diferentes opciones de materiales que se fueron descartando, llevando al resultado de la baldosa final. Las dimensiones de la baldosa fueron pensadas con la intención de que una persona adulta pueda colocar el pie completo dentro de la superficie de la misma. A continuación, se describe el proceso que llevo a la construcción de esta.

4.7.1.1. Materiales seleccionados

Para la elaboración del prototipo se consideraron materiales como plástico, cerámica y madera, descartando los dos primeros. El plástico por la poca firmeza que puede ofrecer a las personas que circularían sobre ella y el segundo se descarta debido a que los elementos piezoeléctricos necesitan de un movimiento para poder producir una corriente, aunque es del orden de

milímetros, podría resultar en que la baldosa se quebraría debido a su poca flexibilidad, que es necesaria para la dilatación de los elementos piezoeléctricos al tener personas circulando constantemente sobre ella.

Descartando el plástico y cerámica como opciones se optó por hacer uso de madera de pino como el material para las partes exteriores del prototipo por la flexibilidad, robustez y fácil acceso en el mercado. De manera comercial se encuentran maderas de una pulgada de grosor con las variantes de 20 y 30 centímetros de ancho se escogió el ancho de 30 centímetros para cortarla con un largo de 30 centímetros para que la baldosa pueda contener la totalidad del pie de una persona adulta y hacer uso de los elementos piezoeléctricos que contiene en su interior.

4.7.1.2. Diseño electromecánico

La baldosa cuenta de 2 tapas de madera una inferior y una superior, formando una capa entre ellas en donde se ubican los elementos piezoeléctricos de cerámica con un área efectiva de 27mm de uso comercial y fueron considerados por su alta disponibilidad en el mercado.

Debido a que los elementos piezoeléctricos cuentan con una capa de cerámica y una lámina con cables soldados para la conducción de corriente, se limitaba el área efectiva de los piezoeléctricos a los puntos de soldadura. El área de los puntos de soldadura también representaba un riesgo al ser presionado, por la fuerza ejercida podía provocar que quebraran las soldaduras dejando aislado el piezoeléctrico. Para prevenir estas situaciones se colocaron capas de cartón reciclado a cada piezoeléctrico con los propósitos de: proteger las soldaduras dando un alza a la parte efectiva, la cerámica del piezoeléctrico, y tener el efecto de amortiguador dando a la baldosa restableciendo a la posición

inicial quedando lista para ser presionada nuevamente después de cada paso que una persona pueda dar sobre ella.

Los componentes piezoeléctricos generan energía a partir de la deformación del cristal que los forma, generando una pequeña corriente en forma de onda armónica en ese sentido, para obtener el mayor aprovechamiento de la de la corriente generada se colocó en interior de la baldosa un puente rectificador de onda completa utilizando diodos de silicio. Por otra parte, para mejorar la deformación y recuperación al estado inicial de los elementos piezoeléctricos se colocaron piezas de cartón entre las caras internas de las maderas que forman la baldosa.

4.8. Características generales del edificio hipotético

Para la determinación de las características del edificio hipotético de un autoproducer con generación fotovoltaica se realizó una visita de campo en una zona residencial de apartamentos y de oficinas del área metropolitana de la ciudad de Guatemala a fin de establecer el tamaño de una muestra confiable para la toma de datos de potencia con la baldosa piezoeléctrica.

En ese sentido se consideraron los edificios situados a lo largo de la sexta y séptima avenida de la zona cuatro de la ciudad de Guatemala, adicionalmente se consideraron los siguientes supuestos:

- Mayores a cinco niveles.
- Los edificios son únicamente utilizados para oficinas.
- El área social aprovechable es del 20% del total de la construcción.

- El espacio de cada persona en su puesto de trabajo debe ser de dos metros cuadrados. (Acuerdo Gubernativo Número 229-2014 Artículo 16 b, 2016).

Haciendo uso de la herramienta de *internet Google Maps* se delimitó el área correspondiente como se muestra en la siguiente figura:

Figura 3.
zona 4 ciudad de Guatemala.

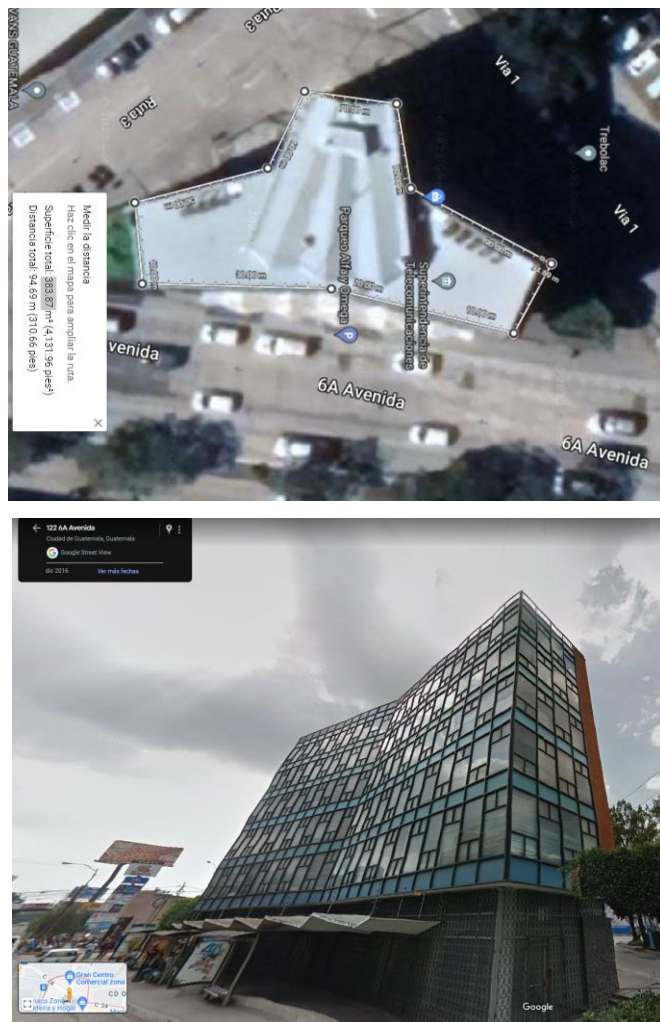


Nota. Área de zona 4 de la ciudad de Guatemala delimitada por línea roja punteada. Captura de PC, Google Maps.

Con el área delimitada se utilizó la misma herramienta para para contar los niveles y áreas de los edificios que cumplieran el filtro antes mencionado, como se muestra en la siguiente figura:

Figura 4.

Edificio ubicado en zona 4 sexta avenida, vía 1 y ruta 3.



Nota. Foto vista superior de edificio para medición de área y panorámica del mismo edificio para conteo de niveles. Captura de PC, Google Maps.

Se realizó este proceso con los edificios que cumplieran el criterio llegando a un total de once edificios, los datos recopilados se muestran a continuación:

Tabla 3.

Edificios de referencia zona 4

Edificio	Niveles	Área m2	Área habitable m2	Población Estimada
Edificio 1	12	1273.6	3056.5	1528
Edificio 2	6	383.9	460.6	230
Edificio 3	5.5	1846.6	2031.2	1015
Edificio 4	7	207.7	290.8	145
Edificio 5	8	282.5	451.9	225
Edificio 6	12	1990.4	4776.9	2388
Edificio 7	14	700.8	1962.2	981
Edificio 8	7	307.9	431.1	215
Edificio 9	9	1000.2	1800.3	900
Edificio 10	16	434.1	1389.2	694
Edificio 11	10	527.7	1055.3	527
Promedios	9	814.1	-----	804

Nota. Detalle de que cumplen los criterios de la investigación. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Como se muestra en la tabla anterior la población promedio en un edificio dentro del área es de 804 habitantes. Tomando esta población como referencia se determina el tamaño de la muestra para toma de datos con la baldosa piezoeléctrica.

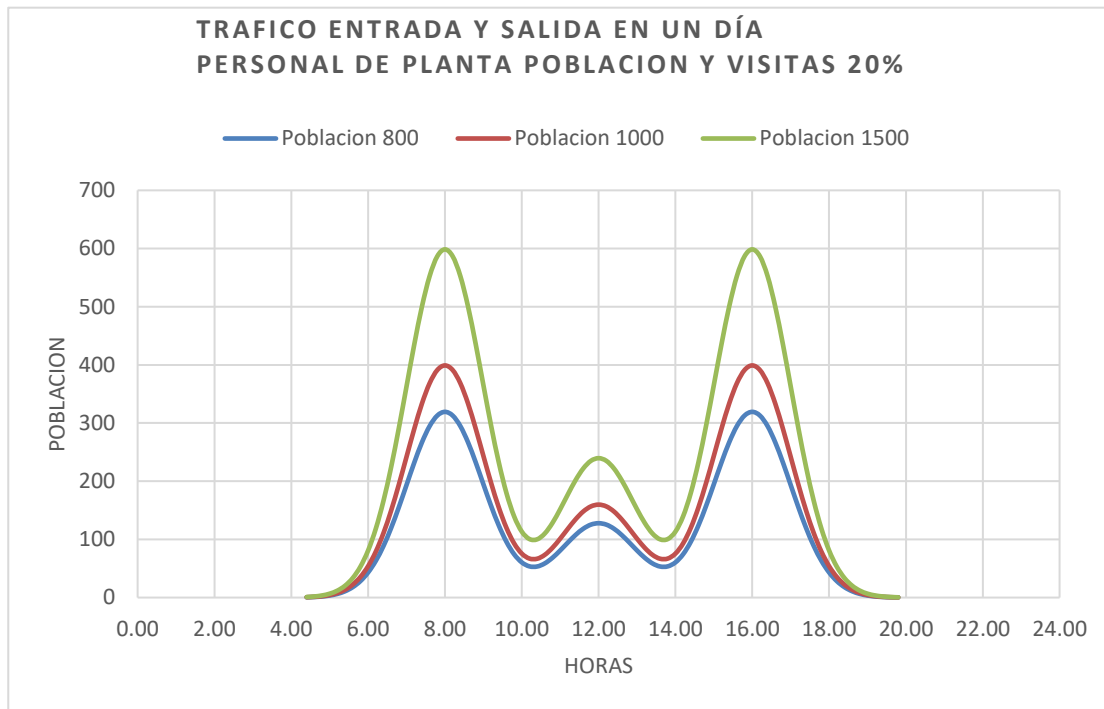
4.8.1. Determinación de la población en edificio hipotético

Para poder realizar la proyección de la energía generada con el tránsito de distintas poblaciones y así poder describir el aumento de la generación se consideraron tamaños distintos de población de un edificio para cuantificar la energía generada en periodos de un día, un mes y un año, utilizando poblaciones de 800, 1000 y 1500 personas para realizar estas proyecciones se definirá el comportamiento de la población con horarios de ingreso a las instalaciones entre 07:00 y 09:00 y un horario de salida de las instalaciones entre 15:00 y 17:00, ingresando y saliendo con una distribución normal.

También se considera un porcentaje de visitas del 20%, respecto a la población base, de manera diaria estas visitas repartidas de manera normal entre las 07:00 y 17:00. Con estas consideraciones se determina la curva de tráfico con la ayuda de Microsoft Excel utilizando dos distribuciones normales con desviación estándar 1 y centros de 08:00, 16:00 para el personal de planta y 12:00 para visitas, obteniendo los siguientes gráficos.

Figura 5.

Trafico de entrada y salida de población de planta y visitas.



Nota. Gráfico con datos de la tabla número 3, localizando ecuación que relaciona las variables área y watts. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

4.9. Toma de datos con baldosa piezoeléctrica.

Para la toma de datos y mediciones con la baldosa piezoeléctrica como primer paso se determinó el tamaño de la muestra para saber cuántos datos se debían obtener para tener información confiable.

4.9.1. Determinación de tamaño de muestra

Con la población promedio que puede circular en un edificio ubicado en el área metropolitana, se pudo determinar el tamaño de la muestra que sea relevante para las mediciones de potencia y energía con la baldosa piezoeléctrica, se hizo uso de la ecuación para cálculo de una muestra cuando se tiene una población finita.

Ecuación 1

$$n = \frac{N * Z_{\alpha}^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z_{\alpha}^2 * p * q}$$

Donde para la ecuación anterior las variables se describen a continuación:

- n: tamaño de la muestra buscado.
- N: Tamaño de la población o Universo.
- Z: parámetro que depende del nivel de confianza.
- e: Error de estimación máximo aceptado.
- p: probabilidad que ocurra el evento estudiado.
- q: (1-p) probabilidad que el evento estudiado no ocurra.

Los valores de nivel de confianza se encuentran definidos de acuerdo con estadística como 1.645, 1.96 y 2.576 para los niveles de confianza de 90%, 95% y 99% respectivamente (*QuestionPro*, 2023). Tomando como universo la población promedio el valor de 804.36, un nivel de confianza de 95%, un error máximo esperado del 5%, una probabilidad de que el evento ocurra del 95% y una probabilidad del 5% que el evento no ocurra. Se obtiene que la muestra buscada tiene un valor de 66.

Tabla 4.

Tamaño de muestra

N	Z	e	p	q	n
804.36	1.96	5%	95%	5%	66

Nota. Datos utilizados para el cálculo de tamaño de la muestra. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Donde para la tabla anterior las variables se describen a continuación:

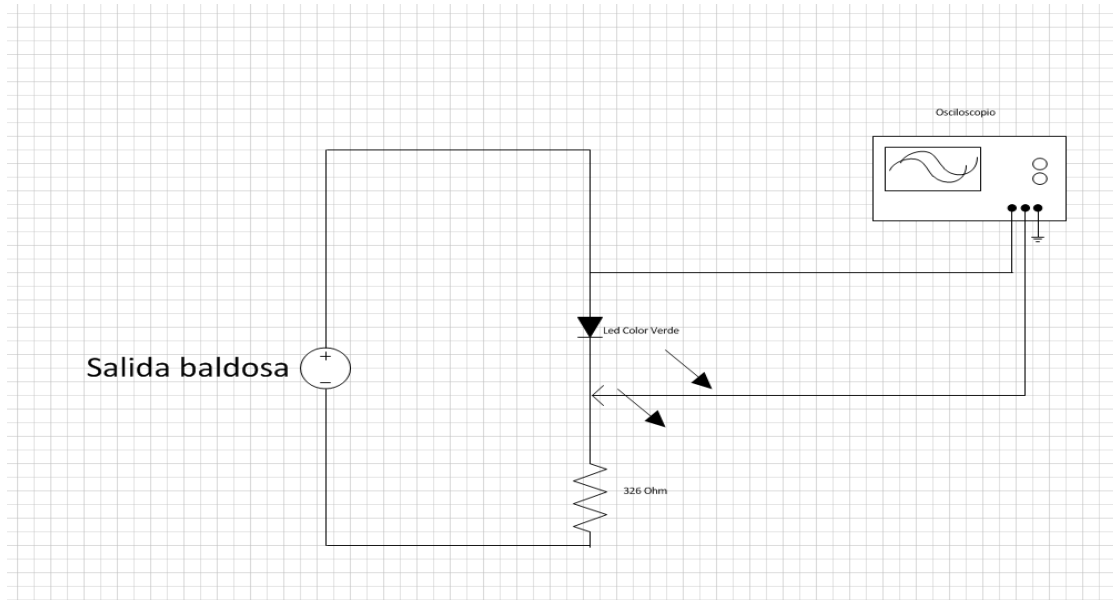
- n: tamaño de la muestra buscado.
- N: Tamaño de la población o Universo.
- Z: parámetro que depende del nivel de confianza.
- e: Error de estimación máximo aceptado.
- p: probabilidad que ocurra el evento estudiado.
- q: (1-p) probabilidad que el evento estudiado no ocurra.

4.9.2. Circuito de toma de datos.

Para la toma de mediciones fue necesario un circuito a través del cual la corriente que generará la baldosa piezoeléctrica, por tratarse de corrientes del orden de miliamperios se optó por un circuito que encendiera un led color verde, con el fin de que el led sirviera de indicador que la baldosa fue presionada, y una resistencia que limitaría el paso de la corriente y la diferencia de potencial que podría llegar a dañar el led.

Figura 6.

Circuito de medición.



Nota. Circuito de medición con baldosa piezoeléctrica representada como una fuente DC, diodo Led resistencia y osciloscopio. Elaboración propia, realizado por Microsoft Visio.

En el circuito anterior se representa la baldosa piezoeléctrica como una fuente de corriente continua, la corriente atraviesa el led, la resistencia de 326 ohm y retorna hacia la fuente. Se colocó un osciloscopio tomando las mediciones de voltaje de total del circuito y el voltaje sobre la resistencia para poder obtener de manera indirecta la corriente que atraviesa el circuito haciendo uso de una de las variantes de la Ley de Ohm.

Ecuación 2

$$P = \frac{V_{tot}^2}{(R + R_{Diodo})}$$

Teniendo el voltaje total del sistema y el voltaje que en la resistencia se pudo determinar la potencia generada por el paso de una persona, se realizó la diferencia entre los promedios del voltaje total y el voltaje en la resistencia del total de las mediciones para definir el voltaje de trabajo del led, dando un resultado de 2.27 V, este siendo tomado como constante en el circuito para definir el voltaje total se utilizó la siguiente ecuación:

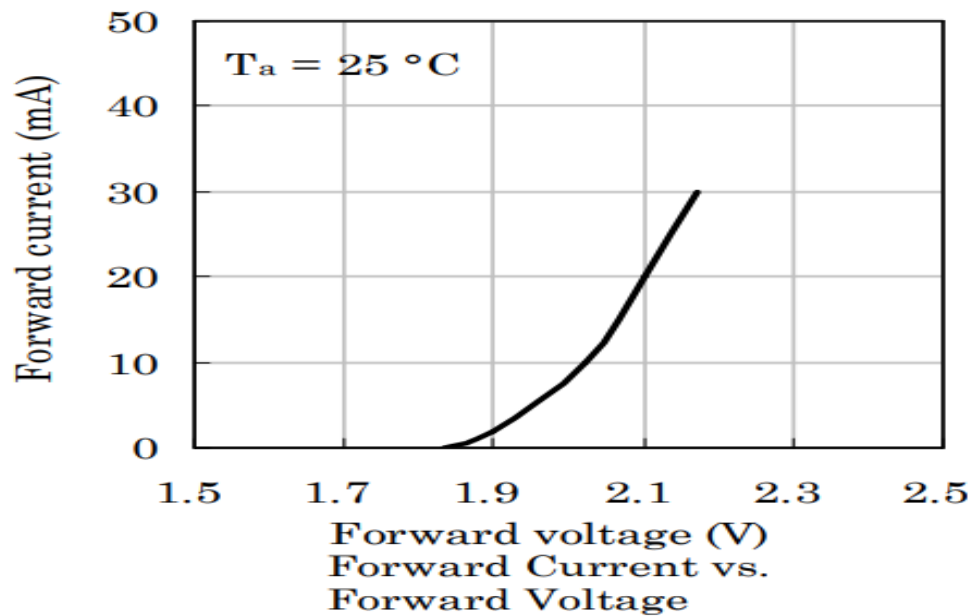
Ecuación 3

$$V_{tot} = 2.27 + V_R$$

Este V_{tot} fue calculado para cada uno de los datos y utilizado con la ecuación (2), para el cálculo de la resistencia del diodo se utilizó la hoja de datos técnicos de SunLED para un led de color verde número de parte XLVG11D, donde para el led de color verde se puede apreciar la siguiente curva:

Figura 7.

Curva voltaje vs corriente Diodo XLVG11D.

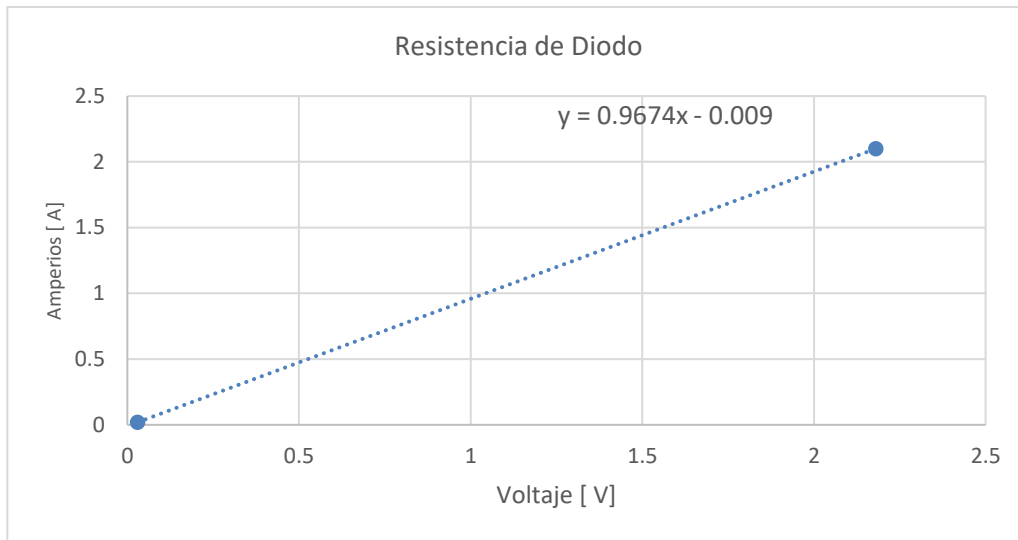


Nota. Curva de trabajo de diodo. Obtenido de (SunLED, 2016), Part Number: XLVG11D, consultado 15 agosto 2023. De dominio público.

De la curva anterior, se aprecia que el led a partir de 1.8V se comporta como una resistencia lineal que depende del voltaje aplicado con una resistencia determinada por la curva característica, se tomaron los puntos (2.18V, 0.03A), (2.1V, 0.02A) linealizándolos con la herramienta de *Microsoft Excel* obteniendo el siguiente grafico:

Figura 8.

Resistencia de Diodo XLVG11D.



Nota. Puntos de la curva de diodo representados en grafico para obtener ecuación de resistencia de diodo. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Sustituyendo el valor de 2.27 V en la ecuación de la recta del grafico anterior se obtiene un valor de 2.19 Ω con las constantes obtenidas y sustituyendo en la ecuación (1) se tiene que:

Ecuación 4

$$P = \frac{(2.27 + V_r)^2}{(326 + 2.19)}$$

Simplificando:

Ecuación 5

$$P = (2.27 + V_r)^2 / (328.19)$$

Con esta ecuación fueron calculados los datos en la tabla en Apéndice 1.

4.9.3. Metodología de recopilación de datos.

Con el tamaño de la muestra definido y circuito de medición listo para la recopilación de datos, se definió las acciones que se llevarían a cabo para la toma de datos.

4.9.3.1. Medición de masa

Con la muestra definida anteriormente, se midió y recolecto la masa de 66 personas en libras mediante la utilización de una báscula electrónica “*Xiaomi Mi Smart Scale 2*”:

Para la medición de la masa en libras se solicitó a las personas que se pusieran de pie, con calzado, sobre la báscula durante cinco segundos, las personas que se midieron contaban con ropa de trabajo o de un día normal. La bascula cuenta con una precisión de 50 gramos (0.11 lb) según las especificaciones por lo que se considera desprecia el error que podría tener.

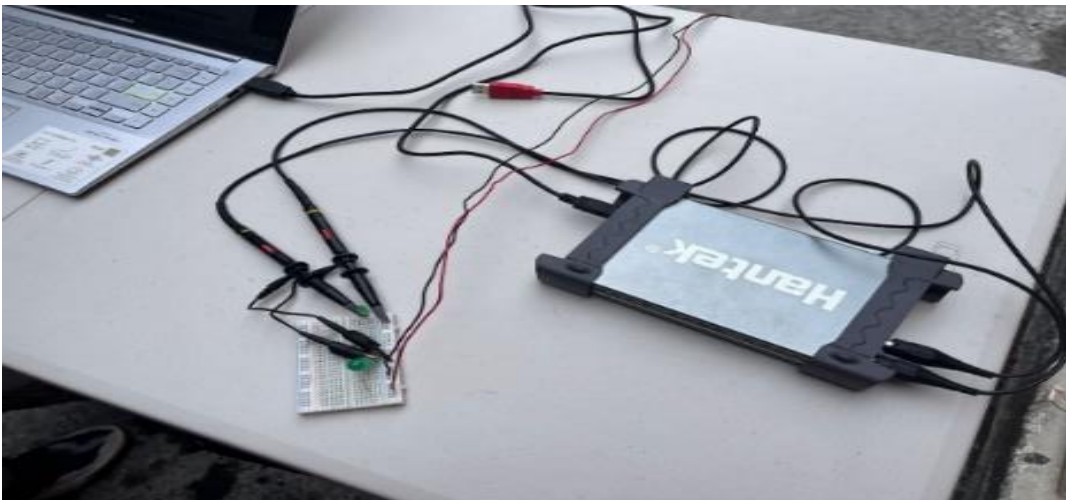
4.9.3.2. Mediciones en osciloscopio

Para la recolección de datos con la muestra se hizo uso del circuito de medición conectado al osciloscopio, como se explicó anteriormente, se utilizó un osciloscopio marca Hantek6022BE, el cual es compatible con computadoras que tengan instalado el sistema operativo *Windows 7* y se aprovechó la portabilidad utilizándolo en conjunto con una laptop logrando tomar las mediciones de las personas en su lugar de trabajo o donde se tenga una alta concentración de personas.

La medición del de los voltajes se realizó en campo y se capturo la pantalla de cada medición con el programa OBS para analizar posteriormente cada curva generada en las diferentes mediciones y poder tabular los datos a continuación, se presentan los equipos.

Figura 9.

osciloscopio y circuito de medición para toma de datos.

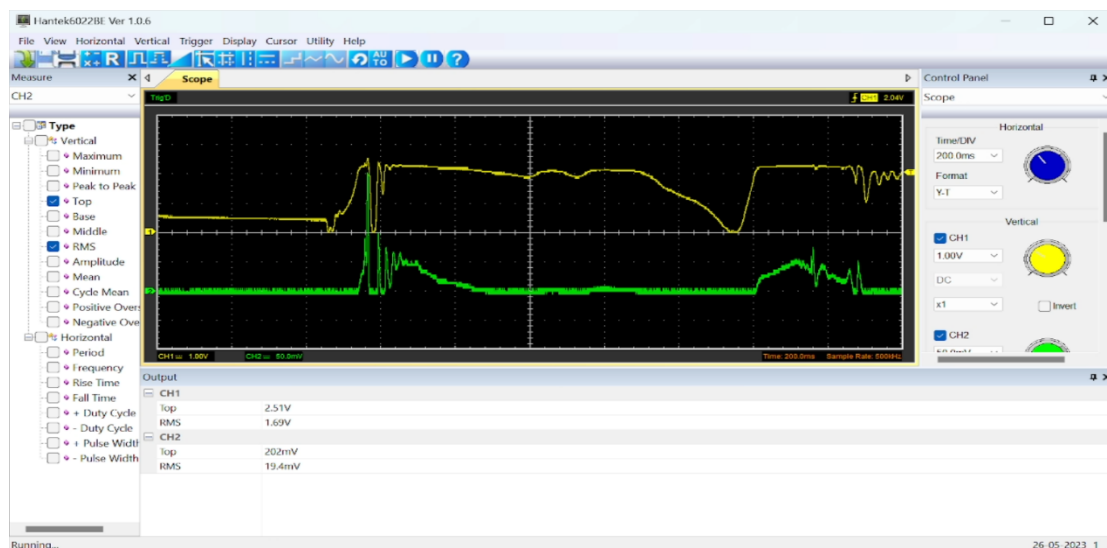


Nota. Osciloscopio Hantek6022BE conectado a PC.

Cuando se realizaron las mediciones posteriormente el material grabado fue analizado para curvas de voltajes percibidas por el osciloscopio teniendo, localizando el voltaje medio para cada curva y el tiempo que duraba el paso de las personas, se presenta un ejemplo de curva de voltaje en la siguiente imagen:

Figura 10.

Curvas de voltaje paso de una persona.



Nota. Vista de Osciloscopio Hantek6022BE conectado a PC con curvas de voltajes generados por el paso de una persona. Elaboración Propia, Captura de pantalla Windows.

Para las curvas se puede apreciar el paso completo de una persona, donde la curva amarilla es el voltaje total del circuito de medición y la curva verde es el voltaje que se tiene en la resistencia del circuito. Se puede apreciar, en la gráfica color verde dentro de los recuadros rojos, un ruido inicial que es el transcurso de tiempo en el que la persona comienza a apoyar el pie sobre la baldosa. un momento estable donde la presión del pie contra la baldosa es estable y constante dando como resultado un voltaje constante y luego un

descenso hasta no tener voltaje que es el punto donde la persona queda totalmente sobre la baldosa, unos instantes de inactividad y luego ver el cómo el ciclo se repite de manera inversa que es la acción de cuando la persona abandona la baldosa continuando con su camino generando un ruido al terminar el contacto entre pie y baldosa.

4.10. Generación de autoproductor con tecnología fotovoltaica instalada

Para determinar el aumento que producirían las baldosas piezoeléctricas a un autoproductor con excedentes de energía fue necesario poder estimar cual sería la potencia y energía que podría generar un autoproductor en el área metropolitana. Para poder estimar estos datos se hizo uso de la tabla numero 1 donde se encuentran los edificios tomados en cuenta como referencia para esta investigación, promediando las áreas de los once edificios se obtuvo que el área promedio es de 814.12 metros cuadrados. Esta área siendo la total de la parte superior del edificio utilizando la columna de área en metros cuadrados, se supondrá un aprovechamiento de un 20% por temas de mantenimientos espaciado de paneles quedando un total de 162.82 metros cuadrados. Los datos para la estimación de potencia instalada se investigaron los sobre las dimensiones que tienen los paneles solares y las potencias nominales que representan mostrando la información representada en la siguiente tabla:

Tabla 5.

Dimensiones de paneles solares y potencias

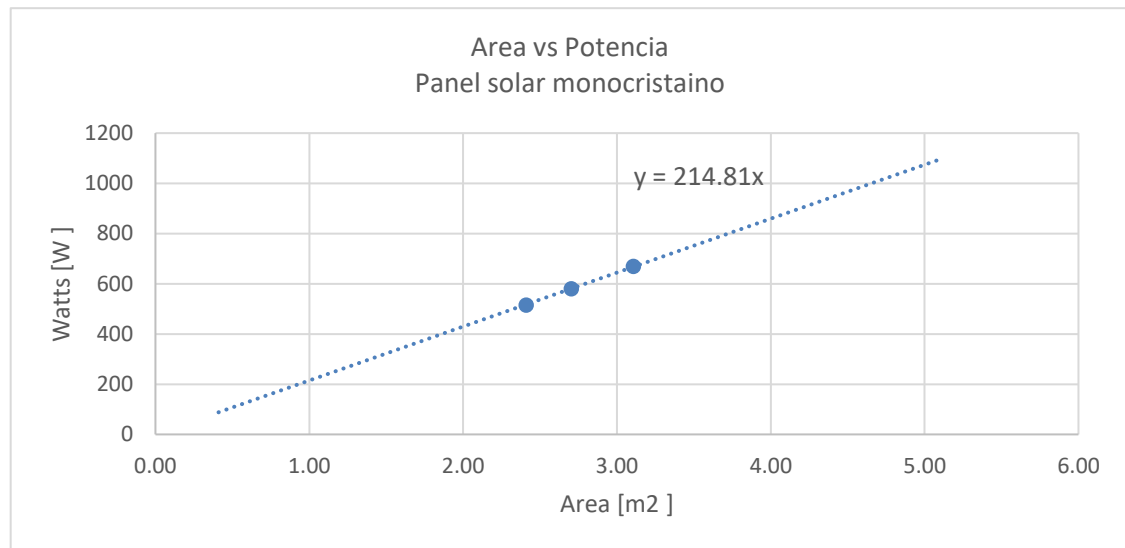
Watts W	Alto mm	Ancho mm	Área m2	Eficiencia %
515	2187	1102	2.41	21.4
580	2384	1134	2.70	21.5
670	2384	1303	3.11	21.6

Nota. Tabla potencias y dimensiones de paneles solares monocristalinos. (Trinasolar, 2023).
Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

La información mostrada en la tabla anterior fue recopilada de las fichas técnicas localizadas en la página web del distribuidor Trinasolar, a partir de la tabla anterior se define que el tamaño promedio de un panel es de 2.73 metros cuadrados se buscó una relación entre potencia y área utilizando la herramienta de Microsoft Excel como se muestra en la siguiente figura:

Figura 11.

Gráfico área y potencia paneles solares.



Nota. Gráfico con datos de la tabla número 3, localizando ecuación que relaciona las variables área y watts. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Con esta relación entre área y watts instalados podemos seleccionar el panel con de 580 watts con un área de 2.70 metros cuadrados, cercano al promedio del área para los paneles. Esta selección aplicada a los 162.82 metros cuadrados con los que cuenta el edificio hipotético se tiene un espacio para 60.22 paneles, dato tomado como 60 paneles lo que se traduce a una potencia instalada de 34.8 kW, con una producción de energía durante 6 horas como se pudo apreciar en las gráficas para la definición de hora pico solar en

documentación del SesLab del Tecnológico de Costa Rica (SesLab, 2023). Combinado con una eficiencia del 21.5% sobre los paneles solares se podría generar 44.89Kwh/día, siendo un equivalente de 1346.76 kWh para un periodo de 30 días.

5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación.

5.1. Diseño, lista de materiales y presupuesto de una baldosa piezoeléctrica.

Parte de los objetivos de la investigación fue el diseño de una baldosa piezoeléctrica la cual fue utilizada para continuar con la generación de datos, se presenta a continuación el listado de los materiales que fueron necesarios para la construcción de la baldosa piezoeléctrica.

Tabla 6.

Presupuesto para la fabricación de baldosa piezoeléctrica

Cantidad.	Material	Descripción.	Costo [Q]
1	Madera de pino de una pulgada de grosor.	Material utilizado para las capas externas que contendrán los componentes piezoeléctricos y piezoeléctricos en su interior.	Q 119.00
32	piezoeléctricos cerámicos.	Piezoeléctricos cerámicos con salidas cableadas y soldadas, 27 milímetros de diámetro.	Q 176.00
5	Diodo rectificador	Componente electrónico de silicio utilizado para rectificar señales.	Q 5.00

Continuación de la tabla 7.

Cantidad.	Material	Descripción.	Costo [Q]
8	Tornillos metálicos.	Tornillos para sujetar las placas de madera.	Q 16.00
1	Cartón.	Base para piezoeléctricos con el fin de optimizar la deformación y proteger las soldaduras de los piezoeléctricos.	Q 00.00 (Reciclado)
1	Mano de Obra	Tiempo utilizado para la recolección tratado y fabricación de prototipo.	Q 350.00
-	Total	Total, de gasto en componentes para la fabricación de prototipo.	Q 666.00

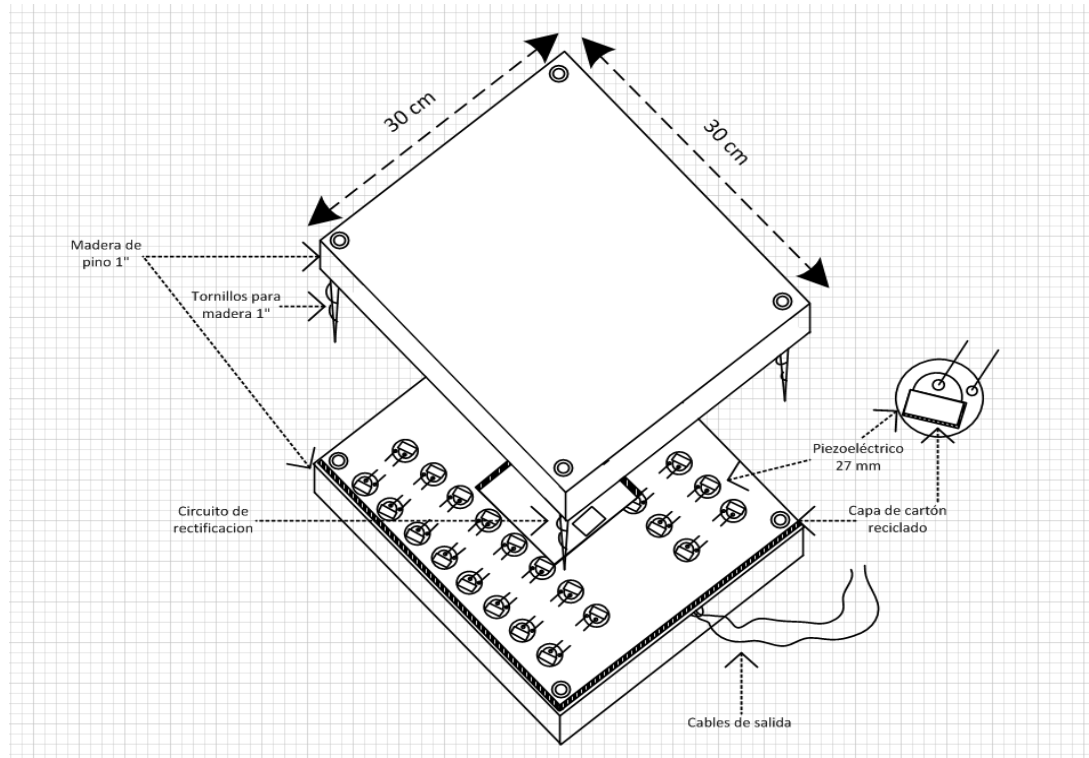
Nota. Tabla con materiales y costos para la fabricación de una baldosa piezoeléctrica. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Se presenta en la tabla anterior la cantidad, el material, costo total y una pequeña descripción de para cada elemento de la tabla. Dando como resultado un total de Q666.00

La elaboración de la baldosa que se realizo fue pensada con la intención de que el pie de una persona adulta pueda ser contenido en su totalidad sobre la superficie de la baldosa, utilizando los materiales descritos en la tabla anterior y se construyó conforme al siguiente diagrama.

Figura 12.

Diseño mecánico baldosa piezoeléctrica.

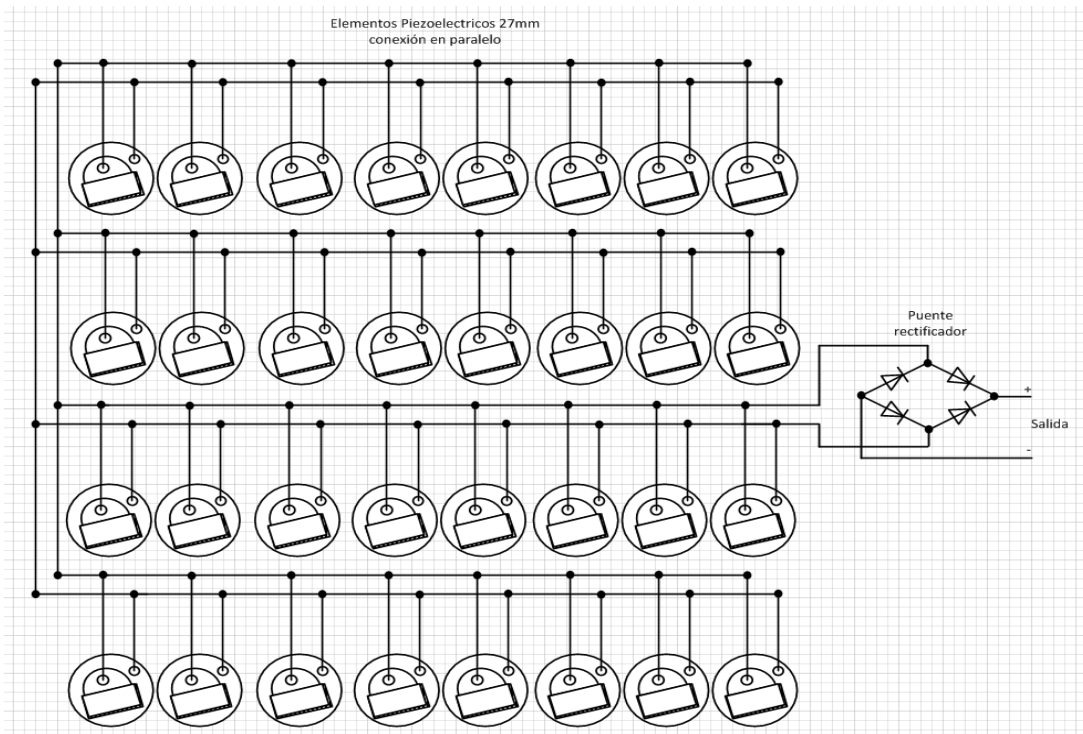


Nota. Diseño de baldosa piezoeléctrica utilizado para la investigación. Elaboración propia, realizado con Microsoft Visio.

El circuito eléctrico constituido por 32 piezoeléctricos de 27 mm formado y un puente de diodos de onda completa para la rectificación de la señal producida al ser presionados. El circuito es presentado en la siguiente imagen:

Figura 13.

Circuito eléctrico baldosa piezoeléctrica.



Nota. Diseño de baldosa piezoeléctrica utilizado para la investigación. Elaboración propia, realizado con Microsoft Visio.

La combinación de los aspectos mecánicos y eléctricos dio como resultado la baldosa presentada a continuación:

Figura 14.

Baldosa piezoeléctrica.



Nota. Diseño de baldosa piezoeléctrica utilizado para la investigación. Elaboración propia, realizado con Microsoft Visio.

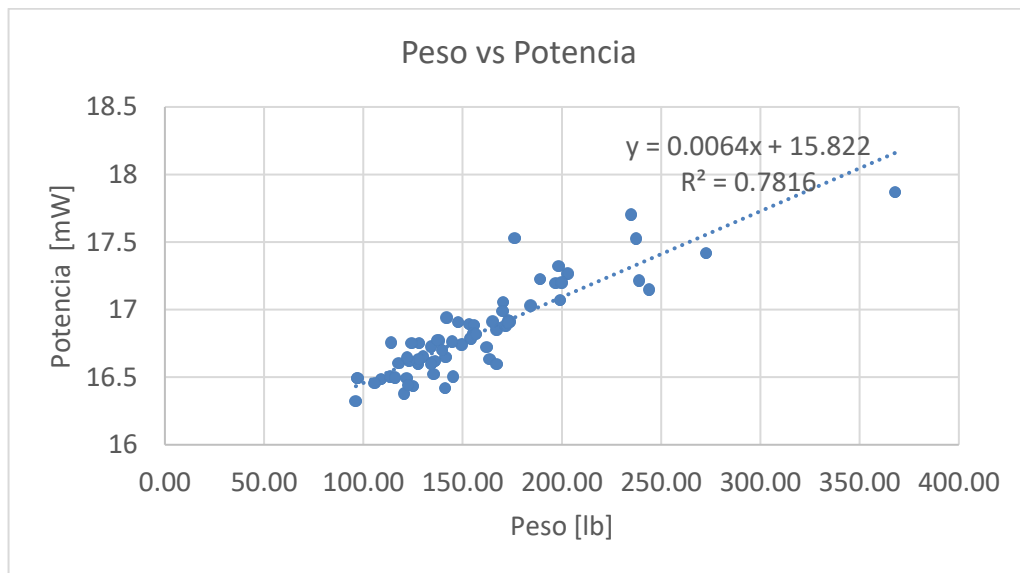
Al finalizar la recopilación de datos la baldosa se encontraba sin daños únicamente suciedad.

5.2. Potencia y energía generada por una baldosa piezoeléctrica

Durante el desarrollo de la investigación se determinó que era necesario realizar mediciones con una muestra de 66 personas, estas mediciones fueron realizadas tomando 5 veces la medición para minimizar la dispersión que se pudiera tener a comparación de una sola medida como se describió anteriormente en el desarrollo de la investigación. Se muestra a continuación la gráfica de los resultados obtenidos de las 66 muestras:

Figura 15.

Gráfico de potencia vs masa obtenidos.



Nota. Grafica de dispersión donde se muestran masa en libras vs potencia en mW. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

La potencia generada por una persona dependiendo de su masa puede describirse conforme a la siguiente ecuación:

Ecuación 6

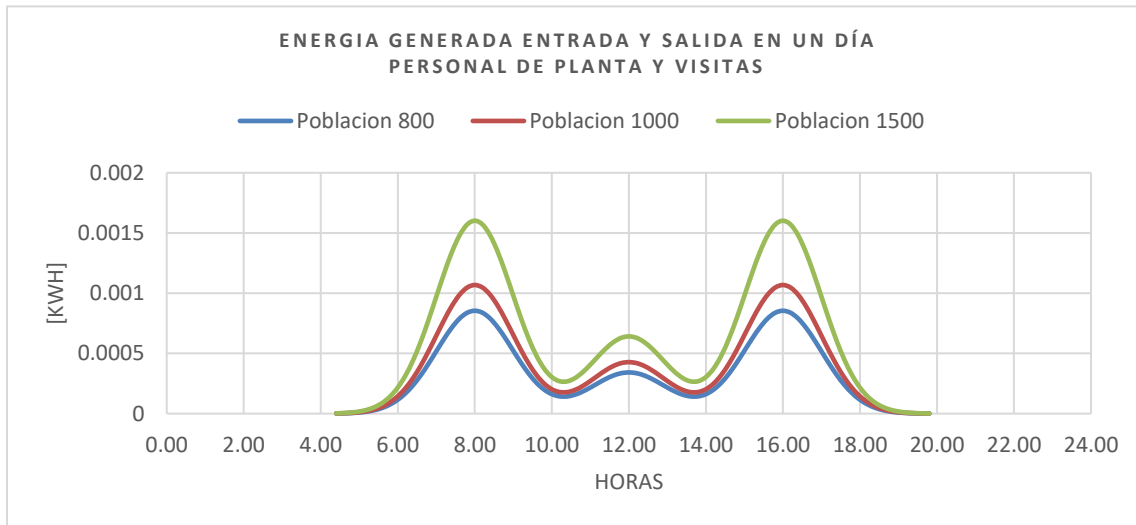
$$(1) \quad P = 0.0064(\text{masa en libras}) + 15.822 \text{ [mW]}$$

Donde 0.0064 es la pendiente para la ecuación, en mW/lb generada con los datos y el circuito de medición descrito en el desarrollo de la investigación y 15.822 es la constante de potencia disipada en el diodo led.

Haciendo uso de un 20% del área de la planta baja del edificio colocando las baldosas sobre una ruta obligatoria para el personal de planta y visitas se pueden colocar un total de 1809 baldosas, y un promedio de energía generada por paso de 1.043×10^{-9} kWh (Promedio de energía paso promedio Tabla apéndice 1) se obtiene el siguiente grafico que representa la energía generada por la interacción entre las baldosas y la población total del edificio.

Figura 16.

Energía generada por población y baldosas piezoeléctricas.



Nota. Gráfico que representa la energía que puede ser generada por la interacción entre las personas que ingresan y salen del edificio con la utilización de 1809 baldosas piezoeléctricas. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

En el gráfico anterior se puede apreciar la estimación de la curva de generación para una cantidad de 1809 baldosas piezoeléctricas y poblaciones de 800, 1000 y 1500 personas con un porcentaje de 20% de visitas al edificio.

La suma de la generación diaria para las poblaciones anteriormente mencionadas se encuentra en la siguiente tabla.

Tabla 7.

Generación estimada por baldosas piezoeléctricas.

Población	Energía 1 día [kWh]	Energía 1 mes [kWh]	Energía 1 año [kWh]
800	0.0181	0.5434	6.5213
1000	0.0226	0.6793	8.1517
1500	0.0340	1.0190	12.2275

Nota. Estimados de generación para periodos de día, mes y año con 1809 baldosas. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

En la tabla anterior se utilizaron las sumas de generación diaria para proyectar la energía generada para los tiempos de un día, un mes y un año.

5.3. Aumento de generación en edificio UACEE.

Para una potencia instalada de 34.8 kW instalados como se definió en el desarrollo de la investigación haciendo uso de un 20% del total del área disponible tanto para la instalación de paneles solares, en el techo, como para las baldosas piezoeléctricas en la planta baja del edificio. Se obtiene la siguiente tabla.

Tabla 8.

Comparación entre generación piezoeléctrica y energía solar.

Tiempo	Energía piezoeléctrica Población 800 [kWh]	Energía piezoeléctrica Población 1000 [kWh]	Energía piezoeléctrica Población 1500 [kWh]	Solar 34.8 kW instalados [kWh]
1 día	0.0181	0.0226	0.0340	44.8920
1 mes	0.5434	0.6793	1.0190	1346.7600
1 año	6.5213	8.1517	12.2285	16161.1200

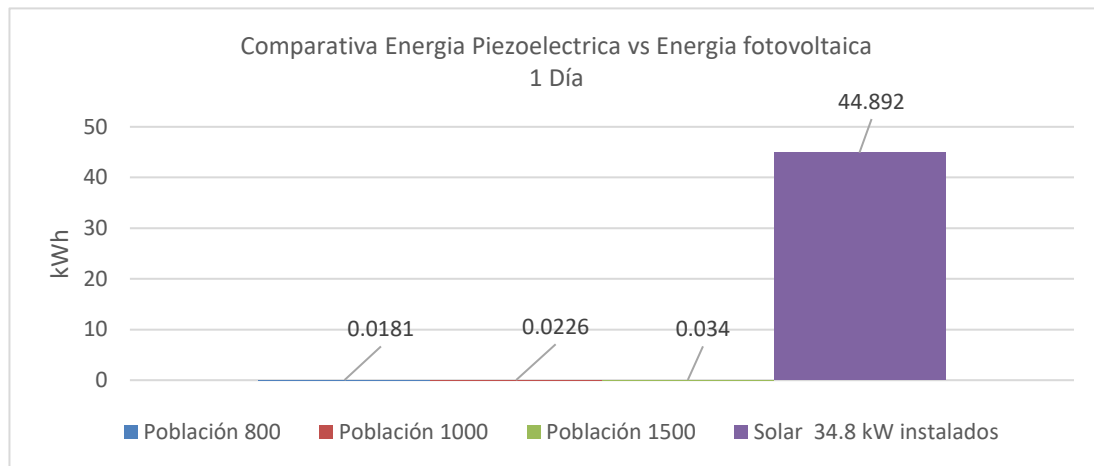
Nota. Estimados de generación para periodos de día, mes y año con 1809 baldosas como se definió en el desarrollo de investigación y 34.8 kW instalados de paneles fotovoltaicos. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Se utilizaron las poblaciones de 800, 1000 y 1500 más el porcentaje definido de visitas de personas tomando como base su generación diaria y para la generación fotovoltaica se tomó la potencia instalada definida con una eficiencia de 21.5 % y 6 horas efectivas de sol.

A continuación, se presentan los datos obtenidos para la tabla anterior de manera gráfica:

Figura 17.

Energía piezoeléctrica y solar generada en un 1 día.

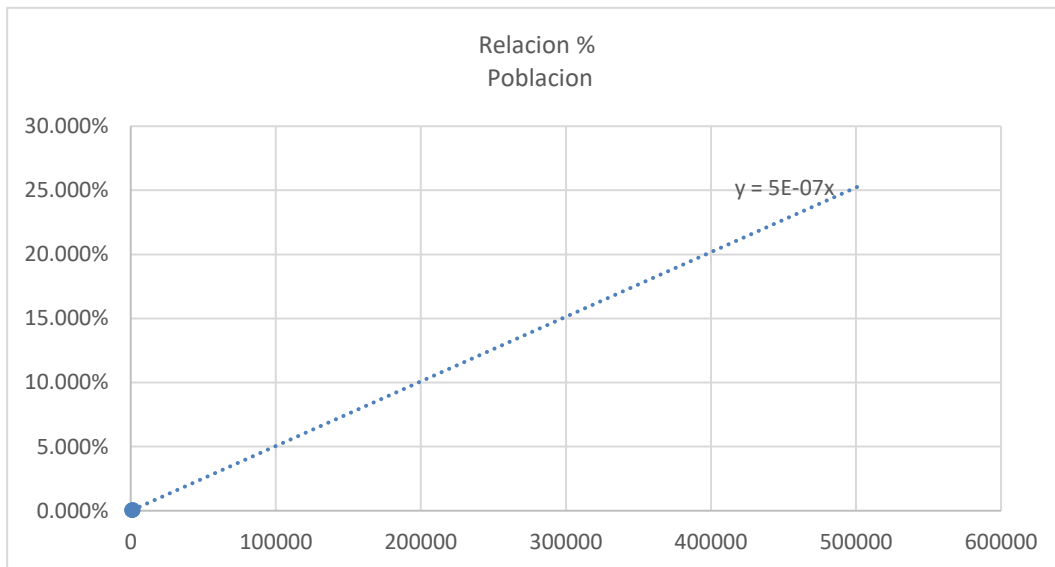


Nota. Gráfico que representa de manera visual la generación solar en el mismo plano que la energía piezoeléctrica, realizado con Microsoft Excel.

Como se muestra en el gráfico anterior la energía generada de manera diaria por la cantidad de 1809 baldosas y poblaciones de 800, 1000 y 1500 personas es bastante menor a la generada por la energía solar instalada, corresponden a un 0.04%, 0.05% y 0.07%, con los puntos de las poblaciones mencionadas y sus respectivos porcentajes se generó el siguiente gráfico:

Figura 18.

Porcentaje de la energía solar en función de la población.



Nota. porcentaje de la energía solar que se puede generar en función de la población para el periodo de 1 día, realizado con Microsoft Excel.

Con el anterior gráfico se puede determinar qué porcentaje de la energía solar, descrita anteriormente (34.8kW instalados), puede alcanzar la energía piezoeléctrica en función de la población que debe transitar sobre las 1809 baldosas.

5.4. Gastos de Implementación.

Tomando en cuenta los beneficios energéticos que presentan las baldosas piezoeléctricas a continuación se hará una estimación del gasto de inversión y el retorno que se podría obtener con la implementación de la tecnología piezoeléctrica en un edificio con las características que se mencionaron anteriormente y una población de 1500 personas.

Para los datos de energía generada presentados anteriormente se consideró una cantidad de 1809 baldosas piezoeléctricas que hacen un total de inversión inicial de Q1,204,794.00 para la producción de las baldosas asignando para mantenimientos un 5% del costo de manera anual. Tomando en cuenta el edificio de población de 1500 personas cuenta con una producción anual de 12.2285 kWh de manera anual se presenta la siguiente tabla.

Tabla 9.

Inversión, mantenimiento y generación anual.

Descripción	Costo	Ingreso
1809 baldosas piezoeléctricas	Q1,204,794.00	0.00
Mantenimiento (5%)	Q6,0239.70	0.00
Generación	Q0.00	Q12.62
Total	Q1,265,033.70	Q12.62

Nota. Gastos de implementación de 1809 baldosas piezoeléctricas e “ingreso” en generación como autoproducción, realizado con Microsoft Word.

Se muestra en la tabla anterior el gasto de inversión inicial el mantenimiento y el ingreso por la generación de energía a partir de los piezoeléctricos esto de manera anual, con la tarifa de 1.032231 Q/kWh conforme al pliego tarifario en la resolución de CNEE 112-2023, es necesario recordar que el ingreso de generación no es una remuneración económica como tal si no un descuento en la factura de consumo como se mencionó anteriormente en el inciso 2.2.3.

5.5. Lugares estratégicos para aprovechamiento de baldosas.

La generación de las baldosas piezoeléctricas depende de la cantidad de personas que circulen a lo largo del día sobre ellas. Conforme al comportamiento planteado en el desarrollo de la investigación se define para nuestro caso los mayores momentos de generación son en la mañana y en la tarde durante la entrada y la salida del personal que labora dentro del edificio. Debiendo de aprovechar la entrada y salida de las instalaciones que son de carácter obligatorio para el acceso al edificio planteado.

Es necesario la búsqueda de cuellos de botella en donde las personas deben pasar proponiendo los siguientes puntos:

- Vestíbulos.
- Rutas de acceso a ascensores.
- Rutas de acceso a Escaleras
- Áreas de baños.
- Abastecimientos de comida.
- Rutas a salas de espera.

Los sitios propuestos son a criterio de las necesidades que pueden tener las personas que laboran dentro de las instalaciones y sus visitantes.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para el desarrollo de esta investigación se obtuvieron los resultados que responden a los objetivos planteados durante el transcurso de la investigación, a continuación, se tendrá una discusión acerca de cada resultado obtenido en el capítulo anterior:

6.1. Diseño de Baldosa piezoeléctrica

Durante el diseño de la baldosa piezoeléctrica se contemplaron factores que van orientados al uso de peatones como el tamaño del pie de una persona adulta tomando en cuenta que durante la investigación se iba a construir únicamente una baldosa y esta debía de cumplir el propósito de realizar mediciones para la toma de datos, este tamaño puede variar al realizar un recubrimiento total o parcial de un suelo.

Para la elaboración de una baldosa piezoeléctrica se utilizaron materiales disponibles en el mercado nacional y no se consideró su compra al por mayor o en el extranjero. Podrían localizarse piezoeléctricos distintos al tipo buzzer o de un tamaño mayor, aunque esto podría aumentar considerablemente el precio de la baldosa por temas de importación, se construyó el prototipo con relativa facilidad siendo el mayor reto que la baldosa contara con movimiento únicamente vertical para hacer presión sobre el total de los elementos piezoeléctricos donde el cartón reciclado cumplió un papel clave para la protección de las soldaduras y ampliación del área efectiva de los piezoeléctricos; sin embargo, no necesariamente es el diseño que puede aprovechar de una mejor manera la fuerza ejercida por el paso de una persona siento el objetivo de la investigación

el crear un prototipo de baldosa para evaluar el impacto que tendría su implementación en masa no se profundizó sobre diseño orientado a la multiplicación de fuerza ejercida.

El costo de una baldosa piezoeléctrica siendo un total de Q 666.00, quetzales se considera como accesible para una implementación de pocas unidades para aplicaciones de baja potencia o sensores detectores de personas o de iluminación ornamental como se había mencionado en los antecedentes.

6.2. Relaciones de paso potencia producida por una baldosa piezoeléctrica

Se puede apreciar una relación directa entre la masa y la potencia generada, esta potencia corresponde a un instante durante el paso y fue obtenida por medio de un circuito de medición como se describió en el desarrollo de la investigación. Se obtiene que la relación de masa y potencia corresponde a un 0.0064 mW por libra que pase sobre ella lo que puede interpretarse como que la potencia producida por el paso de una persona es igual a 0.0064mW/paso, más la constante de 15.822 mW por la potencia constante disipada sobre el diodo led.

La potencia generada por la baldosa piezoeléctrica siendo del orden de mili watts no podría ser considerable para una implementación a gran escala ya que la potencia generada no alcanzaría a cubrir los gastos que se necesitan para su propio funcionamiento, tomando en cuenta que los gastos de mantenimiento anual fueron considerados como un 5% de la inversión inicial esto es considerablemente mayor que la generación que se puede producir utilizando la tarifa actual de 1.032231 Q/kWh, CNEE 112-2023.

Para este resultado se observó durante la recopilación de datos que hay varios factores que influyen a la fuerza que puede ejercer una presión sobre el suelo el ángulo propio con el que camina cada persona sobre el suelo, la firmeza de su caminar cualidad propia de cada persona que puede estar relacionada con la edad o la utilización de apoyos para caminar como un bastón, por ejemplo.

6.3. Aumento de generación en edificio UACEE.

La generación fotovoltaica que utiliza como apoyo la energía generada por medio baldosas piezoeléctricas con poblaciones de 800, 1000 y 1500 personas es de 0.04%, 0.05% y 0.07%, sin embargo, la cantidad de 1500 personas utilizada para esta investigación es en un carácter teórico. Se observó que una de las formas que se tiene de aumentar la generación a través de piezoeléctricos es aumentando el tránsito de personas sobre las baldosas.

Una población en un edificio con las características que se presentaron en el desarrollo de la investigación no podría generar energía suficiente como para ser relevante, pero con un tránsito mucho mayor en número y recurrencia como la que se puede dar en un área de entretenimiento o centro comercial donde las personas caminan con la intención distraerse caminando o un gimnasio donde la misma persona podría caminar e incluso saltar sobre una baldosa una gran cantidad de veces podrían cambiar el panorama de la generación para este tipo de tecnología.

6.4. Lugares estratégicos para aprovechamiento de baldosas.

Como se mencionó en el inciso anterior los comportamientos de una población dedicada únicamente a oficinas no puede complementar la generación proveniente de paneles solares en las dimensiones planteadas,

deben buscarse sitios donde se tenga un mayor tránsito dentro de las instalaciones de un edificio con una recurrencia en el tránsito de las poblaciones como áreas de deporte, entretenimiento o servicios indispensables donde se asegure una generación constante por cantidad de pasos con los datos obtenidos en esta investigación nos indican que la masa media por persona es aproximadamente 157 libras, lo que puede ser un parámetro a considerar para una estimación de la energía que se puede producir en conjunto con la propuesta de baldosa que se utilizó para esta investigación.

CONCLUSIONES

1. Para la fabricación de manera artesanal, haciendo uso de materiales entre los cuales destacan: 2 tapas de madera cuadradas de 30cm; 32 piezoeléctricos cerámicos de 27mm de diámetro; un puente rectificador de onda completa y cartón reciclado como se detalla durante el desarrollo de la investigación utilizando materiales disponibles en el mercado metropolitano de la ciudad de Guatemala se hizo una inversión de Q666.00.
2. La potencia por paso de una persona está determinada por la masa con la que esta cuenta, para la investigación se determinó que el promedio de la muestra es de 156.77 lb y la potencia asociada a esta masa es de 16.82 mW. La energía generada por el paso de una persona se encuentra determinada por la potencia y el tiempo que tarda una persona en dar un paso, utilizando poblaciones base de 800, 1000 y 1500 personas con un porcentaje de visitas del 20% se generaría un total de 0.0181 kWh, 0.0226 kWh y 0.034 kWh de manera diaria respectivamente, estos datos se obtuvieron simulando un total de 1809 baldosas como se define en el desarrollo de la investigación.
3. El aumento de la generación para un edificio ficticio autoprodutor con excedentes de energía que cuenta con un área de 814.12 metros cuadrados utilizando un 20% de esta área para la instalación de paneles solares sobre el techo y un 20% de la planta baja para la colocación de 1809 baldosas es de 0.04%, 0.05% y 0.07% para poblaciones de 800, 100 y 1500 personas respectivamente.

4. La generación piezoeléctrica es proporcional a las personas que caminan sobre ellas para obtener una mayor energía generada necesario utilizar lugares como cuellos de botella o rutas hacia servicios necesarios para las personas dentro de las instalaciones con el fin de que una mayor cantidad de personas caminen sobre ellas estos pueden ser lugares como: Accesos y salida a las instalaciones, accesos a ascensores, rutas hacia escaleras, escaleras, rutas hacia baños.
5. La utilización de baldosas piezoeléctricas con las consideraciones que se tomaron en esta investigación, para el apoyo a un edificio teórico en la generación de energía eléctrica a un autoproducción con excedentes de energía con tecnología fotovoltaica instalada, ofrece un aumento poco considerable y además, tomando en cuenta que la generación producida no logra alcanzar los gastos de mantenimiento que esta misma tecnología necesita para su funcionamiento no podría alcanzar en ningún momento la inversión inicial necesaria para su implementación. Por lo mencionado anteriormente, no puede considerarse viable para este tipo de configuración.

RECOMENDACIONES

1. Considerar que una de las manera en la que tener una mayor utilidad las baldosas piezoeléctricas en el aspecto constructivo es con un banco de capacitores conectado en su salida para su aplicación en conjunto en configuración de isla de esta manera podrían alimentar sistemas de iluminación de baja potencia u ornamental con la energía cosechada durante el transcurso del día tomando en cuenta que el funcionamiento aislado de la red para baldosas piezoeléctricas no era el fin investigación no fue contemplado un almacenamiento de la energía en cada baldosa.
2. Considerar que la población es el factor más importante para la mayor generación de energía mientras que el peso o la fuerza ejercida sobre la baldosa es el factor más relevante para la potencia instantánea. para esta investigación, aunque la potencia de salida individual es de baja intensidad es energía limpia y de carácter renovable que vale la pena continuar en la búsqueda de distintas posibles aplicaciones tomando en cuenta diseños orientados a la multiplicación de la fuerza, posiblemente con materiales y no personas u disposiciones orientadas a altas repeticiones de presión sobre la baldosa.
3. Tomar en consideración que para el aumento de la generación en el tipo de configuración como apoyo a un UACEE la energía piezoeléctrica no es factible por los aspectos mencionados anteriormente como el costo de mantenimiento y el aumento poco significativo de energía eléctrica generada que ofrecen. Sin embargo, pueden considerarse sistemas aislados en donde se cuente con un tráfico peatonal o baja afluencia con

una alta repetitividad de tráfico en el mismo lugar es posible integrar sistemas orientados a aplicaciones simples de baja potencia.

4. Tomando los principios mencionados donde se relaciona que la fuerza ejercida es proporcional a la potencia eléctrica y la repetitividad es proporcional a la energía generada, podrían conseguirse configuraciones como gradas por ejemplo donde se podrían tener una alta fuerza por el aumento de la energía potencial cinética de una grada superior a una inferior y la alta afluencia.
5. Considerar que la utilización en grupo de baldosas piezoeléctricas para una aplicación a gran escala requiere de una gran cantidad de tráfico sobre ellas. La utilización de la energía piezoeléctrica en conjunto con el tráfico automovilístico puede ser una opción, en un camino de velocidad regular y alta afluencia vehicular, por la repetitividad y las masas que podrían ejercer presión sobre los elementos piezoeléctricos. Sustituyendo las baldosas piezoeléctricas por elementos propios de una carretera como reductores de velocidad o túmulos podría generarse una energía mayor, pero conllevaría retos distintos en el diseño mecánico.

REFERENCIAS

Administrador de mercado mayorista [AMM]. (2020). *Mercado eléctrico de Guatemala*. AMM.

Asociación de generadores con energia renovable [AGER]. (2022). *Fundamentos de generacion de potencia*. Obtenido de <https://ager.org.gt/energias-renovables/>

Cevallos. (1983). *Hablemos de electricidad*. bibdigital.

Chacon, C., Cortez, J., & Giral, D. (2012). *Piezoelectricidad en un BUZZER*. Ohnemus.

Comisión Nacional de Energía eléctrica [CNEE]. (2014). *Norma Técnica de generación distribuida y usuarios autoproductores con excedentes de energía*.

Congreso de la Republica. (1996). *Ley general de electricidad*.

Gasquet. (2004). *Conversión de la Luz Solar en Energía Eléctrica Manual Teórico y Práctico sobre los Sistemas Fotovoltaicos*. Solartronic.

Google. (2023). *Google Maps*. google.

Jiménez, F., Fruto, J., & Dowe, A. (2015). *Optimización de piezoeléctricos comerciales para su uso en sistemas de Energy Harvesting*. ELSEVIER.

KALAIVANAN, G. P. (2013). *FOOT STEP POWER GENERATION*. ANNA University.

M., P. (2017). *materiales inteligentes*.

Martínez, P. M. (2021). *Transductores piezoeléctricos aplicados a la generación de energía, estudio experimental*. Escuela Politécnica Superior de Chile.

minería, M. d. (2016). *Energía solar* . Uruguay.

Mohamed, A. Y. (2017). *Feasibility Study for Using Piezoelectric Energy Harvesting Floor in Buildings' Interior Spaces*. Enegy Procedia.

Monilor, P. (2020). *Transductores piezoelectricos aplicados a la generación de energía*. Obtenido de Transductores piezoelectricos aplicados a la generación de energía.

Museo virtual de la ciencia del CSIC. (2022). *Fabricacion con arquitectura piezoéctrica*. CSIC. Obtenido de <https://museovirtual.csic.es/>

Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (2022). *Impactos negativos en la salud del ser humano por utilizar materiales contaminantes*. . ONU.

Reglamento ley general de Electricidad. (s.f.). *Acuerdo Gubernativo 256-97*. 1997.

Roldan. (2008). *Fuentes de Energía*. Mc Graw Hill.

Sergey Shevtsov, M. F. (2016). *Random Vibration Energy Harvesting by Piezoelectric Stack Charging the Battery*. Procedia Engineering.

SesLab. (2023). *El Concepto de hora solar pico*. SesLab. Obtenido de http://seslab.org/fotovoltaico/6_el_concepto_de_hora_solar_pico.html

Shevtsov, C., Sergey, G., & Flekc, M. H. (2015). *Optimizing orientation of piezoelectric cantilever beam for harvesting energy from human walking*. Eltram burs.

SunLED. (2016). *XLVG11D solid state Lamp*. SunLED. Obtenido de <https://www.sunledusa.com/products/spec/XLVG11D.pdf>

Trinasolar. (2023). *Pagina Web*. Trinasolar. Obtenido de <https://www.trinasolar.com/lac/product>

APÉNDICES

Se presentan los apéndices que fueron necesarios para el desarrollo de la investigación:

Apéndice 1.

Tabla de resultados obtenidos en las mediciones.

#	Masa [lb]	Pprom [mW]	Tiempo Paso Prom [ms]	Energía Paso Prom [kW.h]
1	235	17.7004	384	1.88804E-09
2	167.3	16.84755322	376	1.75963E-09
3	109	16.48440264	352	1.61181E-09
4	153.5	16.89114464	400	1.87679E-09
5	237.6	17.5225338	368	1.79119E-09
6	120.8	16.37659635	368	1.67405E-09
7	163.8	16.63385809	376	1.73731E-09
8	162.1	16.71940088	368	1.70909E-09
9	145.3	16.50340226	336	1.54032E-09
10	167.4	16.59571987	272	1.2539E-09
11	125.2	16.42945054	392	1.78898E-09
12	174.1	16.90750594	368	1.72832E-09
13	141.2	16.4155854	344	1.5686E-09
14	127.8	17.52837999	264	1.0517E-09
15	117.8	16.59401321	288	1.21689E-09
16	130.2	16.60254738	304	1.3282E-09
17	105.8	16.6509491	280	1.40608E-09
18	239	16.45521562	344	1.27985E-09
19	153.9	17.21408102	296	1.6449E-09
20	173.2	16.78799307	272	1.38035E-09
21	128.3	16.91698189	312	1.27817E-09
22	97.2	16.75082154	264	1.45174E-09
23	124.4	16.48893887	312	1.20919E-09
24	170.4	16.75082154	296	1.45174E-09
25	134.3	17.05223059	288	1.40207E-09
26	113.6	16.72225608	312	1.33778E-09
27	127.3	17.7004	328	1.88804E-09
28	171.9	16.84755322	328	1.75963E-09
24	170.4	16.48440264	296	1.61181E-09
25	134.3	16.89114464	288	1.87679E-09
26	113.6	17.5225338	312	1.79119E-09

Continuación de tabla Apéndice 1.

#	Masa [lb]	Pprom [mW]	Tiempo Paso Prom [ms]	Energía Paso Prom [kW.h]
27	127.3	16.5031186	328	1.43027E-09
28	171.9	16.61108374	328	1.51345E-09
29	149.6	16.87966775	304	1.53793E-09
30	138.1	16.73939243	392	1.41355E-09
31	128	16.76797251	352	1.82585E-09
32	155.6	16.63101044	312	1.62614E-09
33	141.6	16.80802558	368	1.4567E-09
34	139.7	16.64525112	344	1.70151E-09
35	134.6	16.69942127	392	1.59572E-09
36	121.9	16.60539258	336	1.80814E-09
37	273	16.49177433	328	1.53923E-09
38	199.4	17.41455514	352	1.58666E-09
39	144.9	17.06953514	360	1.66902E-09
40	136.4	16.76225454	312	1.67623E-09
41	244	16.61677586	280	1.44012E-09
42	197	17.14693595	320	1.33365E-09
43	189.2	17.19380791	296	1.52834E-09
44	156	17.22567102	304	1.41633E-09
45	173	16.88253661	336	1.42564E-09
46	148	16.89975486	312	1.57731E-09
47	114.2	16.90549623	296	1.46514E-09
48	97.1	16.75367942	320	1.37752E-09
49	142.1	16.49177433	304	1.46594E-09
50	155.4	16.93795328	296	1.43032E-09
51	135.6	16.82234182	296	1.38317E-09
52	96.2	16.52298047	264	1.35856E-09
53	202.9	16.32038574	328	1.19683E-09
54	137.3	17.26336545	296	1.57288E-09
55	116	16.77369145	312	1.37917E-09
56	200	16.49461003	240	1.42953E-09
57	198.4	17.19670334	240	1.14645E-09
58	170.3	17.31853141	296	1.15457E-09
59	134.1	16.98885565	296	1.39686E-09
60	123.2	16.59401321	280	1.3644E-09
61	122.6	16.61677586	264	1.29242E-09
62	154.3	16.43794229	304	1.20545E-09
63	165.3	16.78227169	320	1.41717E-09
64	122.2	16.90836728	296	1.50297E-09
65	184.5	16.6424025	296	1.36838E-09
66	368	17.02917151	272	1.40018E-09

Nota. Datos obtenidos de mediciones descrita en el desarrollo de la investigación. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.