

Diseño de un sistema de generación de energía eléctrica mediante baldosas con capacidad de conversión energética para alimentar pequeñas cargas ubicadas en el entorno cercano a zonas con alto flujo peatonal dentro de la sede central de la universidad industrial de Santander

Jhonn Daniel Alvarado Quintana, Jaime Andrés Arenas Neira y Juan Manuel Corrales Ceballos

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingenieros Electricistas

Director

Manuel José Ortiz Rangel

Magister en Ingeniería Eléctrica con énfasis en Gestión Integrada de Proyectos

Codirector

Gabriel Ordoñez Plata

Doctor en Ingeniería Industrial, área Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2024

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos.....	16
1.1. Objetivo General.....	16
1.2. Objetivos Específicos.....	16
2. Marco Teórico.....	17
2.1. Energy Harvesting	17
2.2. Potencial energético del movimiento humano.....	17
2.3. Tecnologías de transducción.....	18
2.4. Componentes comunes en los sistemas de recolección de energía.....	20
3. Desarrollo de la Solución.....	22
3.1. Identificación de los corredores peatonales potenciales	22
3.2. Análisis de Flujo Peatonal	23
3.2.1. Metodología del Censo Peatonal	23
3.2.2. Resultados del Conteo.....	24
3.2.3. Análisis Estadístico.....	28
3.3. Estado del arte de las baldosas generadoras de energía.....	29
3.3.1. Comparación de las tecnologías.....	29
3.3.2. Selección de la empresa con el prototipo más indicado	30
3.3.3. Dimensiones de las baldosas y módulos.....	31
3.4. Expectativa de la energía a generar	32
3.4.1 Verificación de la conversión de energía.....	32

3.4.2 Expectativa de generación	34
3.4.3 Área disponible para instalación	35
3.4.4 Planteamiento de escenarios de diseño	36
3.4.5 Selección de la configuración de baldosas.....	39
3.4.6 Presentación de cargas	41
3.4.7 Calculo de la demanda para cada escenario de carga	43
3.4.8 Selección del escenario de carga.....	44
3.5. Dimensionamiento de los componentes del sistema.....	45
3.5.1 Baterías	45
3.5.2 Inversor	46
3.5.3 Armario eléctrico	47
3.5.4 Conductores	48
3.5.5 Protecciones	48
3.5.6 Temporizador digital.....	49
3.5.7 Ductería.....	49
3.5.8 Electrodo de puesta a tierra.....	50
3.6. Diagrama Unifilar del Sistema de Generación	51
3.7. Plano Eléctrico y Modelado 3D del Sistema	51
3.8. Análisis Económico del Sistema.....	52
3.8.1. Factibilidad Económica	52
3.8.2. Viabilidad Económica.....	54
4. Conclusiones	56
5. Recomendaciones	59

Referencias Bibliográficas 61

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Características de los transductores disponibles</i>	19
Figura 1 <i>Diagrama de bloques de un sistema de recolección de energía</i>	21
Tabla 2 <i>Flujo peatonal portería de la carrera 27</i>	26
Tabla 3 <i>Flujo peatonal edificio de la biblioteca</i>	27
Tabla 4 <i>Flujo peatonal edificio de comedores</i>	27
Tabla 5 <i>Mediana para las entradas y salidas de la portería en la Carrera 27</i>	29
Tabla 6 <i>Listado de prototipos de baldosas generadoras de energía por empresa</i>	30
Tabla 7 <i>Cálculo de la potencia generada por una baldosa Pavegen en una hora</i>	34
Tabla 8 <i>Expectativa de generación para una sola baldosa en el corredor seleccionado</i>	34
Tabla 9 <i>Potencia generada por área de entrada y salida</i>	39
Tabla 10 <i>Descripción de las configuraciones propuestas para el diseño del sistema de generación</i>	39
Tabla 11 <i>Tipos de cargas que componen la demanda del sistema</i>	41
Tabla 12 <i>Descripción de zonas y cargas</i>	42
Tabla 13 <i>Estimación de potencia máxima para el escenario de cargas A</i>	43
Tabla 14 <i>Estimación de potencia máxima para el escenario de cargas B</i>	44
Tabla 15 <i>Estimación de potencia máxima para el escenario de cargas C</i>	44
Tabla 16 <i>Relación de costos del proyecto</i>	52
Tabla 17 <i>Costos asociados a la importación y transporte de las baldosas Pavegen</i>	54
Tabla 18 <i>Costos asociados a la construcción del sistema recolector de energía</i>	54

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Diagrama de bloques de un sistema</i>	21
Figura 2 <i>Zonas con alta previsión de tráfico peatonal en el campus de la Universidad Industrial de Santander</i>	22
Figura 3 <i>Comportamiento del flujo peatonal en la portería de la Carrera 27</i>	24
Figura 4 <i>Comportamiento del flujo peatonal en el edificio de la Biblioteca</i>	25
Figura 5 <i>Comportamiento del flujo peatonal en el edificio de Comedores</i>	25
Figura 6 <i>Diseño triangular baldosa Pavegen</i>	31
Figura 7 <i>Diseño del módulo en configuración rectangular de la baldosa Pavegen</i>	32
Figura 8 <i>Dimensiones de las áreas disponibles en la portería de la Carrera 27</i>	35
Figura 9 <i>Disposiciones A, B, C y D de configuración de baldosas</i>	37
Figura 10 <i>Componentes del sistema de generación</i>	45
Figura 11 <i>Diagrama unifilar del sistema de generación</i>	51

Lista de Apéndices

Los apéndices están disponibles en el Repositorio Institucional

Apéndice A. Conteo peatonal realizado en los tres corredores seleccionados.

Apéndice B. Número de asistentes al servicio de alimentación institucional.

Apéndice C. Resultados del estudio peatonal para los tres corredores seleccionados.

Apéndice D. Análisis estadístico para la portería de la Carrera 27.

Apéndice E. Modelo 3D de las baldosas Pavegen.

Apéndice F. Estimación de generación para una baldosa en una hora.

Apéndice G. Expectativa de generación para cada distribución.

Apéndice H. Descripción de las configuraciones propuestas para el sistema de generación.

Apéndice I. Especificaciones técnicas de las cargas seleccionadas.

Apéndice J. Diagrama de estimación de cargas.

Apéndice K. Dimensionamiento de baterías.

Apéndice L. Especificaciones técnicas de la batería seleccionada.

Apéndice M. Dimensionamiento del inversor.

Apéndice N. Especificaciones técnicas del inversor seleccionado.

Apéndice Ñ. Especificaciones técnicas del armario seleccionado.

Apéndice O. Especificaciones técnicas del conductor seleccionado.

Apéndice P. Especificaciones técnicas de la protección eléctrica seleccionada.

Apéndice Q. Cálculo de la corriente nominal consumida por los equipos.

Apéndice R. Especificaciones técnicas del temporizador seleccionado.

Apéndice S. Especificaciones técnicas de la ductería seleccionada.

Apéndice T. Factores de llenado para diferentes tamaños de conductor y ductos.

Apéndice U. Disposiciones A, B, C y D de distribución de baldosas.

Apéndice V. Dimensiones de las áreas disponibles para instalación en la portería de la Carrera 27.

Apéndice W. Plano eléctrico del sistema de generación de energía eléctrica.

Apéndice X. Modelado 3D del sistema de generación de energía eléctrica.

Apéndice Y. Resumen de costos asociados con el proyecto.

Apéndice Z. Diagrama unifilar del sistema de generación de energía eléctrica.

Glosario

Baldosa recolectora: Es un tipo de pavimento diseñado para captar y convertir la energía del movimiento humano o de vehículos en electricidad.

Censo peatonal: Estudio o registro que contabiliza la cantidad de personas que transitan a pie por un área específica durante un período determinado.

Conductor: Es un material que permite el paso de la electricidad o el calor a través de él.

Corredor peatonal: Espacio designado en la vía destinado exclusivamente para el tránsito de personas a pie, que puede incluir aceras, pasos peatonales y caminos.

Diagrama Unifilar: Representación gráfica simplificada de un sistema eléctrico en la que se muestra la conexión de los componentes mediante una única línea.

Electrodo de puesta a tierra: Es un dispositivo diseñado para conectar un sistema eléctrico a la tierra, proporcionando una vía segura para que las corrientes no deseadas, como las de fallos o descargas eléctricas, se disipen.

Energía potencial: Tipo de energía almacenada en un objeto debido a su posición o estado. Dependiendo del contexto, puede ser energía gravitacional o energía elástica y puede transformarse en energía cinética cuando el objeto se mueve o se libera.

Energía renovable: Fuentes de energía que se obtienen de recursos naturales que se regeneran de manera constante, como el sol, el viento, el agua y la biomasa.

Generación: Proceso mediante el cual se convierte una fuente de energía en electricidad.

Generación Electromagnética: Proceso mediante el cual se produce electricidad a partir de campos magnéticos en movimiento.

Inversor: Dispositivo electrónico que convierte corriente continua (CC) en corriente alterna (CA).

Piezolectricidad: Es la capacidad de ciertos materiales para generar un voltaje eléctrico cuando son sometidos a una presión mecánica, convirtiendo energía mecánica en eléctrica y viceversa.

Protecciones eléctricas: Dispositivos y sistemas diseñados para salvaguardar instalaciones y equipos eléctricos de sobrecargas, cortocircuitos y otros fallos.

Transición energética: Proceso de cambio del modelo energético actual, basado en combustibles fósiles, hacia un sistema más sostenible y diversificado, que prioriza el uso de fuentes de energía renovables.

Transductor: Dispositivo que convierte un tipo de energía en otro, facilitando la medición y control en sistemas eléctricos y electrónicos.

Watt: Unidad de medida de potencia en el Sistema Internacional de Unidades (SI), que equivale a un julio por segundo y es utilizado para cuantificar la tasa de transferencia de energía eléctrica, térmica o mecánica

Watt hora: Unidad de medida de energía que representa la cantidad de energía utilizada o generada durante una hora a una potencia de un watt. Se emplea comúnmente para medir el consumo eléctrico de dispositivos y sistemas.

Resumen

Título: Diseño de un sistema de generación de energía eléctrica mediante baldosas con capacidad de conversión energética para alimentar pequeñas cargas ubicadas en el entorno cercano a zonas con alto flujo peatonal dentro de la sede central de la universidad industrial de Santander.

Autor: Jhonn Daniel Alvarado Quintana, Jaime Andrés Arenas Neira y Juan Manuel Corrales Ceballos.**

Palabras Clave: Transductor, flujo peatonal, factibilidad, viabilidad, técnicas estadísticas.

Descripción: Este documento comprende el diseño de un sistema de generación de energía eléctrica mediante baldosas con capacidad de conversión energética, ubicadas en áreas de alto tránsito peatonal dentro de la Universidad Industrial de Santander (UIS). El objetivo del diseño de este sistema fue capturar la energía cinética generada por el movimiento de las personas y convertirla en energía eléctrica utilizada para alimentar distintas cargas de baja potencia, para ello, se identificó y analizo mediante un censo peatonal y técnicas estadísticas los corredores con mayor circulación en la sede principal de la UIS permitiendo seleccionar el más indicado. Posteriormente, se recopiló información sobre tecnologías de transducción y empresas con soluciones comerciales disponibles, obteniendo los parámetros necesarios para estimar la generación de energía, con los cuales se definió la topología de construcción y diseño del sistema junto al dimensionamiento de sus componentes.

Finalmente, se realizó un análisis integral de costos que incluyó los gastos de adquisición, transporte e instalación del sistema, con el fin de evaluar su factibilidad y viabilidad económica, determinando su potencial rentabilidad. Además, se efectuó un análisis que considero el ahorro energético obtenido al implementar esta tecnología promoviendo la incursión en la generación de energías no convencionales.

* Trabajo de Grado

** Facultad de ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Ingeniería Eléctrica. Director: Manuel José Ortiz Rangel. Magister en Ingeniería Eléctrica con énfasis en Gestión Integrada de Proyectos. Codirector: Gabriel Ordoñez Plata. Doctor en Ingeniería Industrial, área Ingeniería Eléctrica.

Abstract

Title: Design of an electric energy generation system using tiles with energy conversion capabilities to power small loads located near high pedestrian traffic areas within the main campus of the Universidad Industrial de Santander.

Author(s): Jhonn Daniel Alvarado Quintana, Jaime Andrés Arenas Neira y Juan Manuel Corrales Ceballos.**

Key Words: Transducer, pedestrian flow, feasibility, viability, statistical techniques.

Description: This document comprises the design of an electrical energy generation system through tiles with energy conversion capabilities, located in high pedestrian traffic areas within the Industrial University of Santander (UIS). The objective of this system's design was to capture the kinetic energy generated by people's movement and convert it into electrical energy used to power various low-power loads. For this, pedestrian traffic was surveyed and analyzed using statistical techniques to identify the busiest corridors on the main UIS campus, allowing for the selection of the most suitable location. Subsequently, information was gathered on transduction technologies and companies offering commercially available solutions, obtaining the necessary parameters to estimate energy generation. These parameters were used to define the construction and design topology of the system, along with the sizing of its components.

Finally, a comprehensive cost analysis was performed, including acquisition, transportation, and installation expenses, to evaluate the system's feasibility and economic viability, determining its potential profitability. Additionally, an analysis was conducted to quantify the energy savings achieved by implementing this technology, promoting the adoption of unconventional energy generation methods.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Electrical, Electronic, and Telecommunications Engineering. Electrical Engineering. Director: Manuel José Ortiz Rangel. Master's in electrical engineering with an emphasis on Integrated Project Management. Co-director: Gabriel Ordoñez Plata. Ph.D. in Industrial Engineering, area of Electrical Engineering.

Introducción

Actualmente, de acuerdo con los datos proporcionados por XM^{**}, la matriz eléctrica colombiana se compone principalmente de generación hidroeléctrica, representando aproximadamente un 63% de la capacidad efectiva neta, seguida de la generación térmica, que aporta alrededor del 30% y tan solo el 7% corresponde a otros tipos de energías renovables como lo son fotovoltaica, eólica, biomasa, etc (XM S.A. E.S.P., 2024). No obstante, es importante destacar que las hidroeléctricas pueden tener un impacto negativo en los ecosistemas, y la continua utilización de centrales térmicas plantea desafíos ambientales. En el contexto específico del departamento de Santander, es relevante mencionar que uno de los recursos energéticos más utilizados es la energía proveniente de la generación hidroeléctrica.

El operador de red Electrificadora de Santander S.A. (ESSA) gestiona dos proyectos hidroeléctricos a filo de agua sin la necesidad de grandes embalses: las centrales Palmas y Cascada, que cuentan con una capacidad instalada de 21.2 MW (Electrificadora de Santander S.A., 2024). Estas centrales contribuyen significativamente a la producción de energía tanto en la región como en el país. Dado este panorama, se hace necesario buscar estrategias y políticas que fomenten aún más la implementación de fuentes de energía renovable en Santander y en todo el territorio colombiano. Por esta razón la Universidad Industrial de Santander (UIS) se une al compromiso con la sostenibilidad, promoviendo el uso responsable de recursos para reducir su huella ambiental y fomentar la implementación de fuentes de energía renovable en Santander y en Colombia. En este contexto, la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T) tiene la

^{**} En Colombia, XM es una empresa especializada en la gestión de sistemas de tiempo real, la administración del mercado de energía mayorista y el desarrollo de soluciones y servicios de energía.

iniciativa de investigar y desarrollar energías no convencionales, con el fin de liderar la transición hacia un sistema energético más sostenible.

La transición energética actual emerge como una respuesta a la creciente preocupación medioambiental que enfrenta nuestra sociedad. La necesidad de abordar este desafío ha llevado a la exploración de fuentes de energía renovable no convencionales. En este contexto, la recolección de energía por medio de transductores se presenta como un campo de estudio innovador y prometedor, que contribuye a abordar de manera efectiva la problemática medioambiental. Este cambio en la matriz energética no solo contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, sino también promueve la independencia energética y la diversificación de fuentes, fortaleciendo la resiliencia de la sociedad actual y la seguridad energética a nivel global.

El desafío que enfrenta el proyecto es el diseño de un sistema de generación de energía eléctrica a través de baldosas con capacidad de conversión energética ubicadas en áreas de alto tránsito peatonal dentro del campus, con el objetivo de capturar la energía cinética generada por el movimiento de las personas y convertirla en energía eléctrica utilizable. Esta energía resultante se tiene prevista para satisfacer las necesidades energéticas de cargas de bajo consumo, que, a pesar de su bajo requerimiento de energía, desempeñan un papel crucial en la comodidad, la seguridad y el funcionamiento eficiente de nuestras instalaciones.

Finalmente, al comparar los estudios previos de esta investigación con el trabajo de grado realizado en el 2011 en la escuela E3T, se observan diferencias significativas tanto en los enfoques como en los resultados. A pesar de que ambos proyectos comparten una estructura de estudio similar sobre la elección de los elementos tecnológicos de transducción, los resultados en términos de generación de energía presentan una notable disparidad. En ambas investigaciones se tomó como referencia al fabricante PAVEGEN, que en el estudio inicial fue seleccionado debido a su

mayor capacidad generativa en comparación con otras empresas. Sin embargo, en el presente proyecto, la elección del fabricante se fundamentó en criterios adicionales como la accesibilidad a la información técnica, las actualizaciones vigentes, la disponibilidad del producto y la flexibilidad en el diseño constructivo de sus componentes.

En las estimaciones de energía, un factor clave considerado fue la desviación del flujo peatonal, ya que algunas personas podrían evitar el accionamiento de todos los dispositivos de generación. En la investigación previa, se utilizaron baldosas cuadradas distribuidas en un área específica, lo que generaba incertidumbre en la generación de energía, pues no se garantizaba que cada persona pisara todas las baldosas. Este desafío se abordó en el trabajo actual mediante la implementación de la configuración triangular de las baldosas de Pavegen, lo que otorga mayor flexibilidad en el diseño de las disposiciones. Esto permite modificar el entorno y redirigir de manera más eficiente el flujo peatonal, mejorando así el uso de los dispositivos generadores y aumentando su factor de utilización.

No obstante, uno de los principales retos compartidos por ambos proyectos es la limitada disponibilidad de información técnica sobre los dispositivos generadores de las distintas empresas. Esta falta de datos detallados provoca discrepancias en las estimaciones de generación de energía, ya que la ambigüedad en la información proporcionada por los fabricantes o extraída de diversas fuentes bibliográficas puede derivar en confusión y en estimaciones alejadas de la realidad.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Diseñar un sistema de generación de energía eléctrica mediante baldosas con capacidad de conversión energética que permitan aprovechar la energía cinética que produce el constante flujo peatonal en distintas áreas dentro de la sede central de la UIS con el fin de proporcionar una fuente alternativa no convencional de energía eléctrica que sea confiable, autónoma y sostenible para el suministro energético de cargas de bajo consumo.

1.2. Objetivos Específicos

1. Identificar los corredores peatonales con mayor circulación de personas de las diferentes áreas internas de la sede principal de la UIS.

2. Realizar un análisis de datos del censo poblacional para identificar y seleccionar las áreas de mayor afluencia de personas, con el propósito de enfocar estrategias y asignar recursos de manera más efectiva en función de la densidad demográfica a su respectivo prototipo de diseño.

3. Seleccionar los elementos que conforman el prototipo del sistema, definiendo su diseño de ingeniería básica y topología, basándose en la información obtenida en las etapas anteriores, incluyendo el análisis de potencial y/o capacidad de generación eléctrica para el diseño eléctrico, con el fin de estimar la capacidad de generación del sistema y definir las características del terreno para su implementación.

4. Realizar el análisis de rentabilidad con un enfoque general de los elementos del sistema y en paralelo, evaluar las reducciones de la facturación del consumo energético en el campus universitario. Además, llevar a cabo un análisis de costos y presupuestos para determinar la viabilidad económica y los posibles ahorros asociados al proyecto.

2. Marco Teórico

2.1. Energy Harvesting

La recolección de energía (Energy Harvesting) es el proceso de capturar y convertir energía ambiental presente en diversas formas, como energía mecánica o térmica, en energía eléctrica utilizable para alimentar dispositivos electrónicos de bajo consumo. Este enfoque se ha desarrollado rápidamente como alternativa a las fuentes de energía tradicionales, debido a la necesidad de reducir la dependencia de combustibles fósiles y minimizar el impacto ambiental. Entre las tecnologías más comunes para la conversión de energía se encuentran los sistemas piezoeléctricos, electromagnéticos, triboeléctricos y electrostáticos, cada uno con características específicas en términos de eficiencia, espacio y potencia de salida. Estas tecnologías permiten aprovechar fuentes abundantes de energía, como el movimiento humano o las vibraciones mecánicas, para generar energía limpia y sostenible (R. Sarker et al, 2019).

2.2. Potencial energético del movimiento humano

El uso de las piernas es una de las actividades que más energía consume en el cuerpo humano. De hecho, un hombre de 68 kg caminando a 5.6 km/h (3.5 mph), o 2 pasos por segundo, utiliza 280 kcal/h o 324 W de potencia. Comparando esto con una tasa de actividad en reposo o caminata ligera, implica que hasta la mitad de esta potencia se usa para mover las piernas. Mientras camina, el caminante aplica hasta un 30% más de fuerza en las puntas de sus pies que la que proporciona el peso corporal (Starner, 1996, pág. 622).

La energía aprovechada de los pasos humanos por medio de transductores es una forma innovadora y sostenible de aprovechar la energía cinética que normalmente se desperdicia durante la caminata o la carrera. Esta energía puede ser capturada y convertida en electricidad por

dispositivos portátiles como plantillas de calzado o puede integrarse en superficies de alto tráfico, como pisos de edificios, aceras y estaciones de transporte público.

2.3. Tecnologías de transducción

Las tecnologías más comunes de recolección de energía incluyen métodos electromagnéticos, piezoeléctricos y electrostático. Los recolectores electromagnéticos utilizan bobinas e imanes para convertir energía mecánica en eléctrica mediante cambios en el flujo magnético, ofreciendo alta eficiencia, aunque son voluminosos. Los sistemas piezoeléctricos generan electricidad a partir de la deformación de materiales bajo presión, siendo compactos, pero con baja eficiencia y vida útil limitada debido al desgaste. Los recolectores electrostáticos, que también son pequeños, producen electricidad a partir de cambios en la capacitancia inducidos por vibraciones, pero tienen una eficiencia de generación muy baja (R. Sarker et al, 2019). También existen otros tipos de sistemas híbridos que buscan combinar las tecnologías para aprovechar las condiciones en las que se genera la energía. Esta integración permite una mayor flexibilidad en el diseño y una mejor adaptación a diferentes tipos de movimiento y condiciones, lo que puede resultar en una mayor densidad de potencia y una mayor capacidad de recolección de energía en aplicaciones prácticas.

La Tabla 1 presenta algunas características importantes de los diferentes transductores utilizados para la recolección de energía. Es crucial destacar que la eficiencia de estas tecnologías depende en gran medida de los materiales utilizados y del diseño implementado.

Tabla 1*Características de los transductores disponibles*

Tecnología	Eficiencia	Ventajas	Desventajas
Electromagnética	~5% – 30%	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Altas corrientes de salida ✓ Larga vida útil demostrada ✓ Robustez. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Bajas tensiones de salida. ✓ Puede ser costoso (material). ✓ Baja eficiencia en frecuencias bajas y tamaños pequeños.
Piezoeléctrica	~5% – 30%	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Altas tensiones de salida ✓ La conversión de mecánica a eléctrica es simple y rápida. ✓ Larga duración y durabilidad. ✓ La eficiencia general del sistema es alta. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Materiales costosos ✓ El coeficiente de acoplamiento está vinculado a las propiedades del material
Electroestática	~13.33%	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Bajo costo para construir los sistemas ✓ Ajustar el coeficiente de acoplamiento no es difícil ✓ La reducción de tamaño incrementa las capacitancias 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Requiere capacitancias altas y su efecto de aumentar el costo ✓ El alto impacto de las capacitancias parasitarias

-
- ✓ Necesidad de controlar dimensiones en μm
-

Nota: Adaptado de *Review of piezoelectric energy harvesting system and application of optimization techniques to enhance the performance of the harvesting system* (p.14), por R. Sarker, M., Julai, S., Mohd Sabri, M. F., Mohd Said, S., Islam, M., & Tahir, M. (2019), *Sensors and Actuators. A. Physical.*, 300, 111634-, 1-14.

2.4. Componentes comunes en los sistemas de recolección de energía

En general, los sistemas de generación de energía que emplean los distintos tipos de transductores mencionados comparten una topología común en su diseño como se muestra en la Figura 1. Estos sistemas requieren varias etapas funcionales para convertir la energía mecánica, generada por el movimiento humano, en energía eléctrica útil. Las etapas principales incluyen una etapa de adaptación de señales eléctricas, una etapa de control que garantiza los parámetros adecuados para el uso de la energía generada, y finalmente, una etapa de almacenamiento que acumula la energía generada para su posterior uso.

Etapas de adaptación de las señales eléctricas: Esta primera etapa es crucial, ya que las señales eléctricas generadas por los transductores suelen ser variables en magnitud, frecuencia y tipo dependiendo de la tecnología utilizada. Esta etapa de adaptación se basa en circuitos de rectificación, acondicionamiento de señal y regulación de tensión para transformar estas señales en una forma estable y útil. La rectificación convierte la corriente alterna en corriente continua, indispensable para la mayoría de los sistemas de almacenamiento y uso.

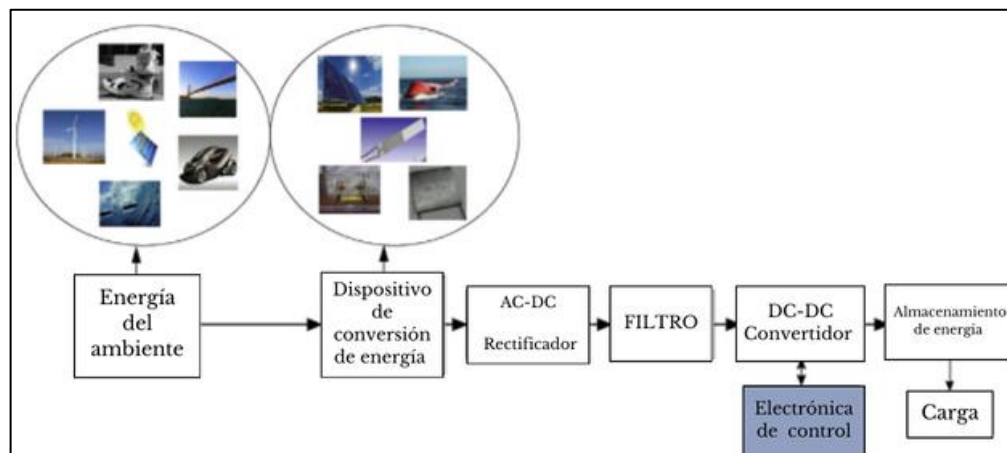
Etapas de control y gestión de la energía: Una vez que la señal ha sido acondicionada, la energía pasa a través de una etapa de control, que es responsable de gestionar y controlar el flujo de energía dentro del sistema. Esta etapa garantiza que los parámetros de operación, como el

voltaje, la corriente y la carga de energía, se mantengan dentro de los niveles adecuados para que el sistema funcione de manera eficiente.

Etapa de almacenamiento de energía: El almacenamiento de energía es un componente esencial en la mayoría de estos sistemas, dado que el suministro de energía generado por el movimiento humano o las vibraciones no es continuo. Los dispositivos más comunes para el almacenamiento incluyen baterías recargables (como las de iones de litio) y supercondensadores.

Figura 1

Diagrama de bloques de un sistema de recolección de energía



Nota: Adaptado de *Review of piezoelectric energy harvesting system and application of optimization techniques to enhance the performance of the harvesting system* (p.6), por R. Sarker, M., Julai, S., Mohd Sabri, M. F., Mohd Said, S., Islam, M., & Tahir, M. (2019), *Sensors and Actuators. A. Physical.*, 300, 111634-, 1-14.

Es importante destacar que la eficiencia de estas tecnologías no solo depende de los materiales empleados, sino también del diseño aplicado en cada fase del sistema. No obstante, la mayoría de las empresas especializadas en la fabricación e implementación de estos sistemas ofrecen soluciones integrales que abarcan desde la instalación hasta el control y la gestión de la energía.

3. Desarrollo de la Solución

3.1. Identificación de los corredores peatonales potenciales

Para generar la mayor cantidad de energía, es fundamental seleccionar los corredores peatonales de mayor afluencia dentro del sede principal de la UIS. Esto requiere un análisis del flujo peatonal en diferentes días de la semana con el fin de clasificar la densidad peatonal de cada día ya que la cantidad de energía generada por las baldosas dependerá directamente del número de pasos y la regularidad del tránsito de personas.

En el estudio correspondiente a este proyecto, se identificaron tres zonas estratégicas con alta previsión de tráfico peatonal. Estas zonas corresponden a las entradas de los edificios de biblioteca, comedores estudiantiles y la portería de la carrera 27, como se ilustra en la Figura 2. La selección de estas áreas se basa en su alta densidad de tránsito peatonal, caracterizado por un flujo repetitivo y constante de personas que permite una mayor frecuencia de activación y, por lo tanto, una mayor generación de energía eléctrica por parte de los módulos.

Figura 2

Zonas con alta previsión de tráfico peatonal en el campus de la Universidad Industrial de Santander



3.2. Análisis de Flujo Peatonal

3.2.1. Metodología del Censo Peatonal

Para determinar el corredor peatonal más adecuado para la implementación del sistema de baldosas inteligentes, se llevó a cabo un censo de transeúntes en diferentes zonas del campus universitario. Este estudio consistió en registrar el número de peatones que cruzaban un área específica de los tres corredores propuestos inicialmente en franjas de tiempo de 20 minutos durante una jornada estándar definida de 6:00 a.m. a 7:00 p.m.

Los criterios establecidos por el equipo de trabajo para la contabilización de peatones válidos fueron los siguientes:

- Se consideró peatón válido para el conteo a cualquier individuo, ya sea hombre o mujer, que transitara por el área designada para cada corredor.
- No se incluyó en el conteo a personas que se desplazaran en vehículos motorizados o vehículos de movilidad personal (VMP).
- Las mascotas no fueron consideradas en el conteo.
- Para el corredor de la Carrera 27, se registraron por separado las entradas y salidas de los transeúntes, dado que este se encuentra dividido por un componente estructural.

La recopilación de datos se llevó a cabo desde el jueves 22 de febrero de 2024 hasta el sábado 24 de febrero del mismo año (Anexo A), conforme al cronograma establecido. Es pertinente destacar que el área de los comedores presenta relevancia para el proyecto únicamente durante los períodos de alta afluencia, que coinciden con las horas de desayuno, almuerzo y cena puesto que al ser un espacio con una función tan específica, en los horarios fuera del servicio de alimentación se observa poco tránsito. La información relativa al número de usuarios que asisten a los

comedores en los períodos mencionados fue proporcionada por la Coordinación de Servicios de Alimentación, bajo la responsabilidad del Sr. Jaime Almeyda Oviedo (Anexo B).

Durante el período de recolección de datos del presente estudio, el edificio de la Biblioteca estaba en proceso de remodelación y acondicionamiento. Como resultado, el horario de funcionamiento fue restringido durante los días laborables, limitándose hasta las 17:40 horas, y el servicio no estuvo disponible los días sábado.

3.2.2. Resultados del Conteo

El comportamiento y la recolección de datos de estos corredores se reporta en la Figura 3 a Figura 5 respectivamente.

Figura 3

Comportamiento del flujo peatonal en la portería de la Carrera 27

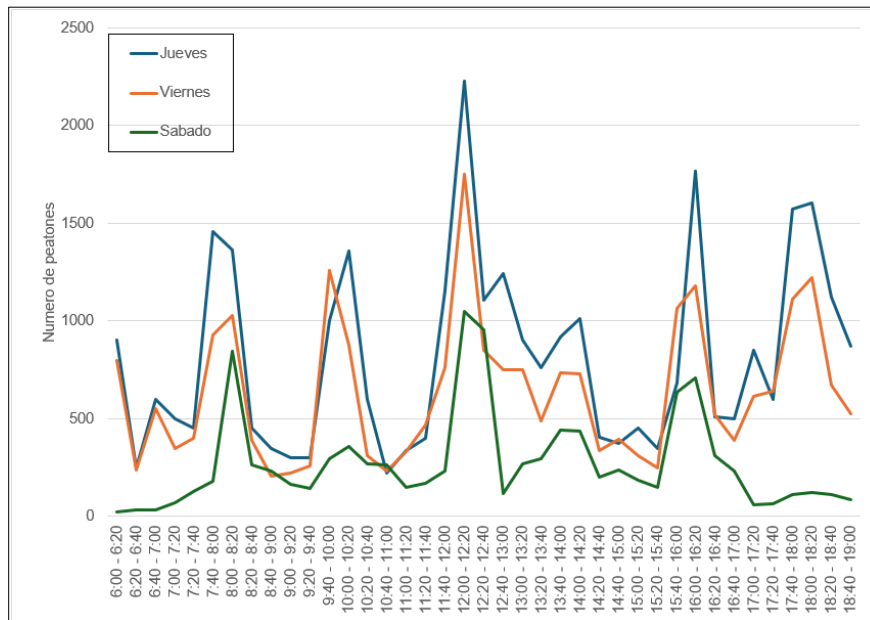


Figura 4

Comportamiento del flujo peatonal en el edificio de la Biblioteca

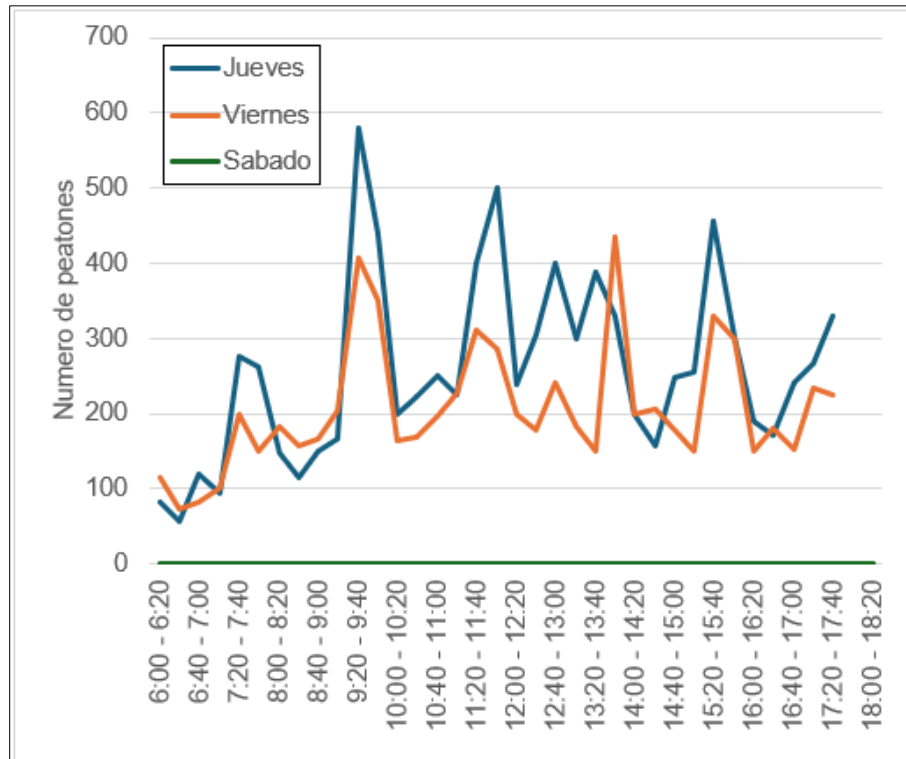
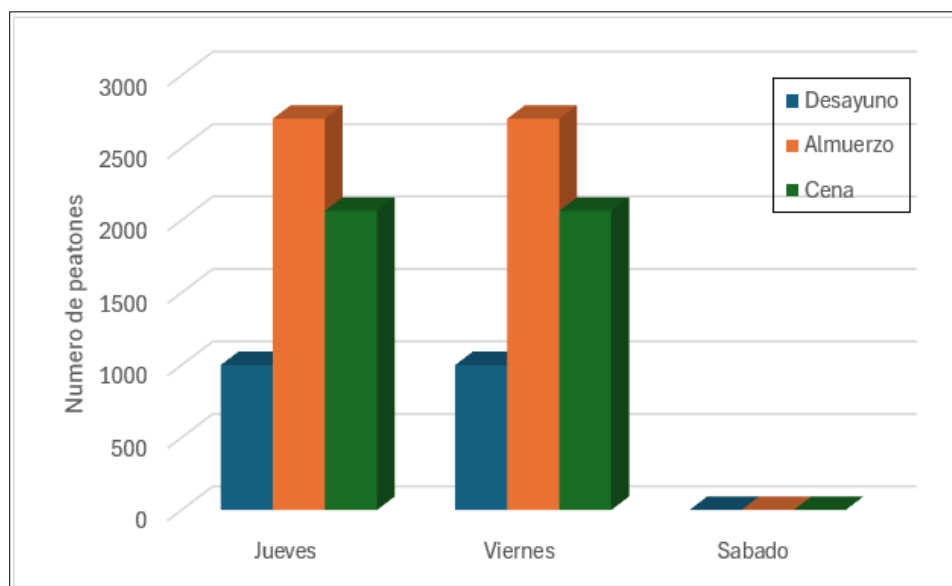


Figura 5

Comportamiento del flujo peatonal en el edificio de Comedores



Con base al análisis de campo, se definieron los tres días seleccionados como días tipo para realizar el análisis cuantitativo del flujo peatonal. El jueves se estableció como día tipo para la semana universitaria estándar, dado que se observa una mayor afluencia de personas en comparación con otros días de la semana. La afluencia que es registrada el jueves se utiliza para extrapolar los datos de los martes y miércoles.

Para el lunes, se emplearon los datos del viernes como referencia, dado que la concurrencia durante estos días tiende a ser menor en comparación con el resto de la semana. Finalmente, el sábado se adoptó como día tipo para representar los fines de semana, ya que, aunque la universidad permanece abierta, la intensidad de las actividades académicas de pregrado es mínima. En estos días, el enfoque se desplaza hacia programas institucionales alternativos, como cursos de idiomas, programas familiares, culturales y posgrados. Los resultados del estudio peatonal (Anexo C) para toda la semana se observan en la Tabla 2 a la Tabla 4 respectivamente.

Tabla 2

Flujo peatonal portería de la carrera 27

	Lunes		Martes		Miércoles		Jueves		Viernes		Sábado		Domingo	
	Ent.	Sal.	Ent.	Sal.	Ent.	Sal.	Ent.	Sal.	Ent.	Sal	Ent	Sal	Ent	Sal
Prom. Hora	1,076	840	1,354	1,094	1,354	1,094	1,354	1,094	1,07	840	453	365	453	365
									6					
Prom. H-Dia	1,916		2,448		2,448		2,448		1,916		819		819	
Total	23,709		29,831		29,831		29,831		23,709		10,444		10,444	

Tabla 3*Flujo peatonal edificio de la biblioteca*

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Prom. Hora	556	697	697	697	556	0	0
Total	7,229	9,061	9,061	9,061	7,229	0	0

Tabla 4*Flujo peatonal edificio de comedores*

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Desayuno	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0	0
Almuerzo	2,700	2,700	2,700	2,700	2,700	0	0
Cena	2,064	2,064	2,064	2,064	2,064	0	0
Total	5,764	5,764	5,764	5,764	5,764	0	0

Con base a los resultados obtenidos del estudio peatonal realizado y tomando los datos de las Tablas 2 a Tabla 4 se determinó que el corredor que cuenta con un mayor flujo peatonal es la portería de la Carrera 27, por lo tanto, es el lugar seleccionando para realizar el diseño con las baldosas generadoras de energía eléctrica.

Aunque el corredor de la biblioteca presenta un flujo de personas que puede considerarse aceptable para la evaluación del diseño, dicho volumen no es suficiente para optimizar la eficiencia de un sistema de generación de energía basado en el tránsito peatonal. Estos sistemas requieren una densidad de tráfico considerablemente mayor para operar de manera efectiva y rentable. Del mismo modo, el corredor de comedores también fue descartado como opción, ya que su máximo

nivel de ocupación se alcanza únicamente durante las horas de servicio, y fuera de estos períodos el volumen de personas es insuficiente para justificar la implementación del sistema.

3.2.3. Análisis Estadístico

En el análisis estadístico (Anexo D) para la portería de la Carrera 27, se identificó una división estructural que separa los senderos de entrada y salida, lo que requiere una evaluación independiente de los flujos de peatones en cada corredor para obtener una muestra representativa del comportamiento de los transeúntes a lo largo de toda la semana. Para ello se calculó la media aritmética diaria tanto para las entradas como para las salidas, con el objetivo de estimar el número de peatones durante una hora típica. Posteriormente, se determinó la desviación estándar para evaluar la variabilidad en los conteos, encontrando que esta diferencia era considerablemente alta lo que se atribuye a los días más concurridos, martes, miércoles y jueves, cuando la presencia de la población universitaria es notablemente más grande, en comparación con los fines de semana, donde la afluencia disminuye y se centra en programas alternativos y académicos de menor asistencia.

Debido a esta dispersión, se utilizó la mediana como la medida más representativa del número típico de transeúntes en la zona por hora. Los resultados de este análisis, presentados en la Tabla 5, muestran que los valores seleccionados por la mediana son 1,076 para la entrada y 840 para la salida y representan el comportamiento en esta portería por lo que son adecuados para dimensionar la expectativa de generación fruto de los pasos de los asistentes considerando que estos son valores conservadores respecto al tránsito promedio censado con la finalidad de encontrar un punto de equilibrio entre los días con gran asistencia de personas frente a los de menor asistencia asegurando un suministro constante en las cargas alimentadas por el sistema.

Tabla 5*Mediana para las entradas y salidas de la portería en la Carrera 27*

Mediana Entradas	Mediana Salidas
453	365
453	365
1,076	840
1,076	840
1,354	1,094
1,354	1,094
1,354	1,094

3.3. Estado del arte de las baldosas generadoras de energía

3.3.1. Comparación de las tecnologías

Diversas empresas han incursionado en el desarrollo de prototipos para la recolección de energía cinética generada por el movimiento de las personas, particularmente a través de sus pasos. Estos sistemas, basados en tecnologías de captación de energía piezoeléctrica y electromagnética, buscan aprovechar el impacto y la presión ejercida sobre superficies como pavimentos y suelos para convertir la energía mecánica en electricidad posicionándose como una alternativa de producción de energía de manera pasiva en zonas de alto tráfico. Las empresas más relevantes junto a sus prototipos de generación se listan en la Tabla 6.

Tabla 6*Listado de prototipos de baldosas generadoras de energía por empresa*

Compañía	Geometría	Dimensiones	Energía producida	Tipo de generación
Energy Floors	Cuadrada	75 x 75 x 20 cm	7 W cada paso	Solar – Piezoeléctrica
Power Leap PZT	Cuadrada	50 x 50 x 8.5 cm	5 W cada paso	Piezoeléctrica
		50 cm por lado		
Pavegen	Triangular	15 cm de espesor	5 W cada paso	Electromagnética
Sound Power	Cuadrada	30 x 30 x 10 cm	2 mW cada 2 pasos	Piezoeléctrica
Waynergy Floor	Cuadrada	50 x 50 x 16 cm	7 W cada paso	Piezoeléctrica

3.3.2. Selección de la empresa con el prototipo más indicado

Las empresas más destacadas en el mercado de baldosas generadoras de energía, debido a su amplia implementación en casos de estudio y su presencia comercial activa, son Pavegen y Energy Floors. Pavegen emplea un sistema de generación basado en tecnología electromagnética, mientras que Energy Floors utiliza un enfoque híbrido que combina la recolección de energía cinética generada por el tránsito peatonal con energía solar (Sharma, Kiran, Azad , & Vaish, 2022). Otras compañías, como Sound Power, Waynergy Floor y Power Leap, desarrollaron prototipos e implementaron pilotos de prueba, pero no se han logrado consolidar con un modelo definitivo o

no se encuentran operativas en la actualidad (Duarte et al, 2013; Energy Floors,2024; Pavegen, 2024; Power Leap, 2024; Sound Power, 2024).

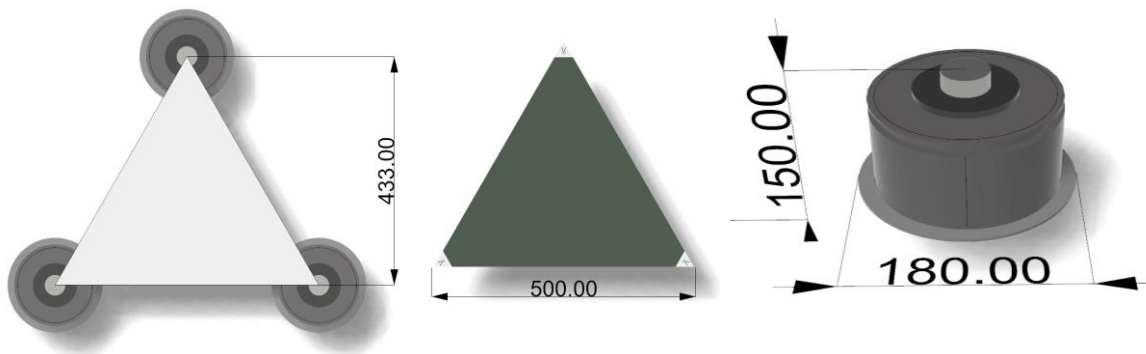
Por lo tanto, la tecnología seleccionada para este diseño es el modelo de baldosa triangular de Pavegen. Esta elección se fundamenta en la accesibilidad a la información técnica sobre los módulos generadores, la disponibilidad del producto para su instalación y la flexibilidad en el diseño constructivo de los módulos, lo cual permitió la creación de distintos escenarios de disposición de baldosas.

3.3.3. Dimensiones de las baldosas y módulos

La empresa Pavegen tiene un diseño triangular de baldosas inteligentes (Anexo E) tal como se observa en la Figura 6 lo que permite un diseño flexible para las configuraciones del tapete recolector.

Figura 6

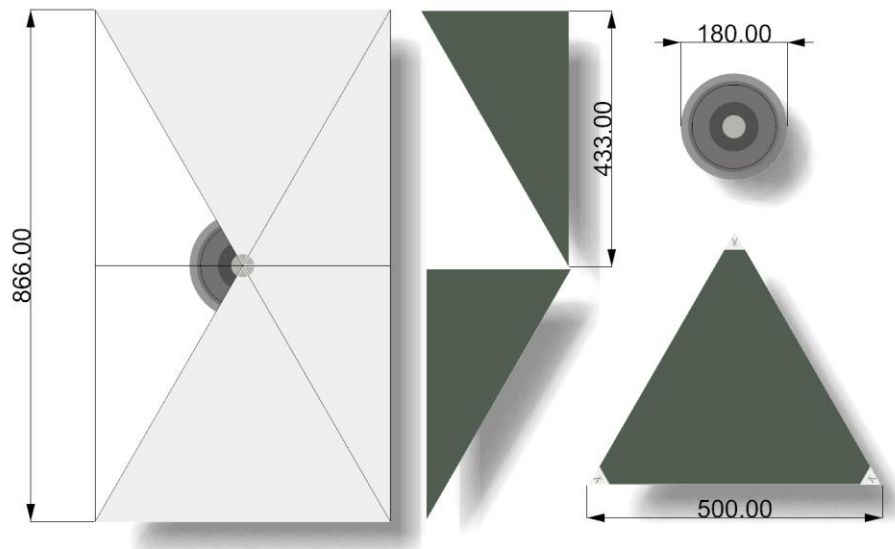
Diseño triangular baldosa Pavegen



De igual manera, tienen una configuración de dos baldosas triangulares conectadas al generador formando un rectángulo que es completado por triángulos más pequeños que permiten darle forma al módulo como se indica en la Figura 7; destinada para escenarios de corredor en donde solo se pueda extender el tapete recolector en una dirección. Estos modelos fueron realizados mediante el software *Rhinoceros 8 en su versión de prueba por 90 días*.

Figura 7

Diseño del módulo en configuración rectangular de la baldosa Pavegen



3.4. Expectativa de la energía a generar

3.4.1 Verificación de la conversión de energía

Para estimar la cantidad de energía que se puede generar mediante la instalación de un arreglo de baldosas Pavegen en la entrada principal de la UIS, es necesario determinar primero la energía potencial producida con cada pisada sobre una baldosa, tal como lo afirma (Agatón Aguirre, 2014).

se calculó la energía generada por cada pisada, mediante la siguiente ecuación:

$$E_p = 1.25 * m * g * h$$

En donde el factor de 1.25 veces es el valor tomado de referencia como la amplitud máxima de la fuerza de reacción vertical que se realiza al caminar. Este factor es seleccionado como el promedio del estudio realizado por la fuerza de reacción del suelo con respecto a la adaptación de velocidad, el modo de progresión y al tipo de pisada donde los valores para

caminar se encuentran de 1 a 1.5 y para correr de 2 a 2.9 según el peso corporal (NILSSON & THORSTENSSON, 1989). El valor de m es el promedio de masa corporal de una persona. Este valor de masa para Latinoamérica es de 67.9 kg (Walpole, et al., 2012) y para efectos de la población colombiana se tomará un promedio de referencia de 70 kg. El valor de g representa la fuerza de gravedad, que equivale en promedio de 9.8 m/s^2 y el valor de h es la altura de desplazamiento de la superficie de la baldosa por cada paso realizado y el cual equivale a 0.005 m (Pavegen, 2023) y E_p es el parámetro que representa la energía potencial por paso realizado. Para efectos de este cálculo, la energía potencial generada es de 4.2875 J.

Una vez obtenida la energía potencial generada por el paso, se procedió a realizar la conversión para determinar la potencia. Para ello, es necesario conocer el tiempo promedio que una persona tarda en completar un paso, este valor de cadencia al caminar para mujeres y hombres se encuentra en el rango de 80 a 150 y 75 a 140 pasos por minuto respectivamente en una caminata normal (Scaglioni Solano & Aragón Vargas, 2001). Para efectos de análisis, y considerando una marcha con un promedio de 60 pasos por minuto, valor que se considera más lento que el promedio de una caminata normal, con un tiempo medio de 1 segundo por paso, se calculó la potencia generada por paso realizado. Utilizando la formula fundamental de la potencia con la conversión de 1 W igual a 1 Joule/s, se determinó que la potencia es de $P = 4.28 \text{ Watts}$ por paso dado. Este valor se acerca al proporcionado por el fabricante de la baldosa, validando una generación de potencia de hasta 5 Watts por paso. (pág. 8)

Para conocer la energía que produce el sistema por baldosa instalada a lo largo de una hora, en la Tabla 7 se calculó la potencia generada con los valores de generación indicados por Pavegen para los dos sentidos de la portería de la Carrera 27 y la media de personas estimada anteriormente donde NP_{I-E} corresponde al número de personas ingresando y egresando, NB es el número de baldosas del sistema a implementar, PF la potencia generada por paso de la baldosa y T_{op} es el tiempo de operación del sistema.

Tabla 7

Cálculo de la energía generada por una baldosa Pavegen en una hora

	Ingreso	Egreso
Ecuación	$P_I = NP_{I-E} * NB * PF * T_{op}$	$P_E = NP_{I-E} * NB * PF * T_{op}$
Total	1.494 Wh	1.166 Wh

3.4.2 Expectativa de generación

Para dimensionar la cantidad de energía eléctrica que se puede recolectar mediante el sistema en la ubicación seleccionada, se llevó a cabo una estimación con los valores de generación por baldosa en una hora (Anexo F). Los resultados de evaluación se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8

Expectativa de generación para una sola baldosa en el corredor seleccionado

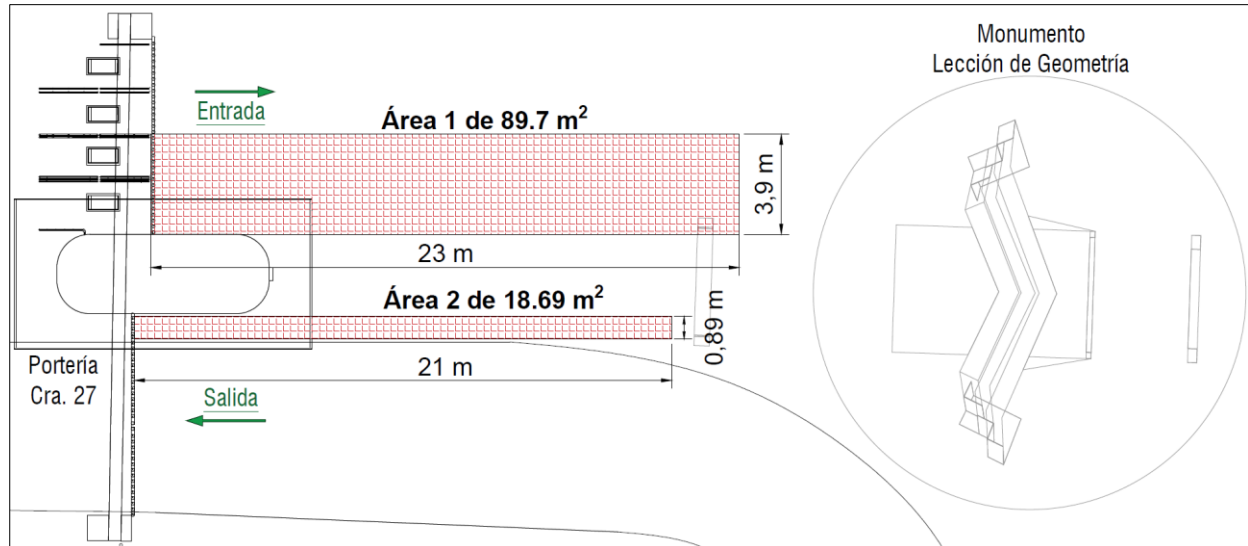
Días	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Entrada [Wh-día]	18.87	23.50	23.50	23.50	18.87	8.09	8.09
Salida [Wh-día]	14.06	17.94	17.94	17.94	14.06	6.41	6.41
Prom. Hora [Wh]	2.53	3.19	3.19	3.19	2.53	1.12	1.12
Total [Wh-día]	32.93	41.43	41.43	41.43	32.93	14.51	14.51

Con base en estos resultados, se determinaron los tipos de carga que el sistema podría soportar y la cantidad de energía que podría ser suministrada de manera constante y confiable.

3.4.3 Área disponible para instalación

Figura 8

Dimensiones de las áreas disponibles en la portería de la Carrera 27



El área correspondiente a la portería de la entrada de la Carrera 27 (Anexo V) presentada en la Figura 8 realizada mediante el software *AutoCAD*, posee 2 áreas bien demarcadas que se pueden describir de la siguiente manera:

Área 1: La bahía de torniquetes tiene un ancho de 7.6 m de los cuales en la apertura de la reja de seguridad solo se habilitan 3.9 m para el ingreso peatonal, dejando 3 carriles disponibles. Se ha determinado extender la instalación cubriendo una distancia de 23 m desde el punto donde finalizan los torniquetes en la parte interior del campus hasta el monumento Lección de geometría, derivando en un área total utilizable de 89.7 m².

Área 2: El carril de salida cuenta con un ancho de 0.89 m habilitados solo para el flujo peatonal. Se ha determinado extender la instalación cubriendo una distancia de 21 m desde la reja de seguridad hasta el inicio del monumento Lección de geometría resultando en un área total de 18.69 m².

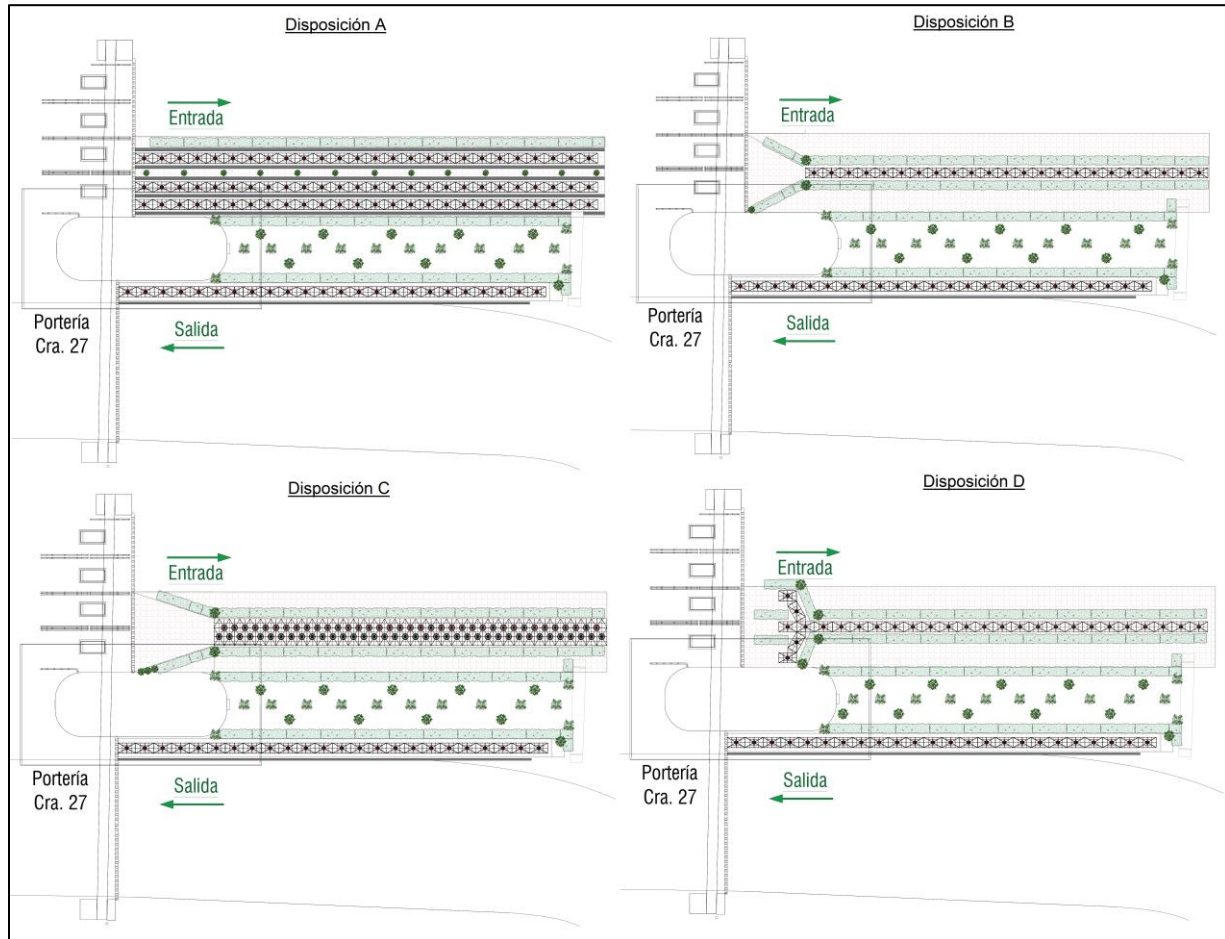
3.4.4 Planteamiento de escenarios de diseño

Se proponen cuatro disposiciones para la implementación de las baldosas con el objetivo de aumentar la captación de energía cinética generada por el tránsito peatonal. Para ello, se dispone de los planos de la zona de la portería de la Carrera 27 y de las dimensiones específicas de las baldosas proporcionadas por el fabricante. Además, se considera la posibilidad de modificar el entorno para redirigir y concentrar el flujo de personas, priorizando que las baldosas reciban la mayor cantidad de pasos.

En función de estas condiciones, se han diseñado mediante el software *AutoCAD* y posteriormente evaluado los escenarios mostrados en la Figura 9 de forma representativa, en los cuales se modifica la disposición de las baldosas (Anexo U).

Figura 9

Disposiciones A, B, C y D de configuración de baldosas



Tomando en consideración la Figura 9, se realiza un análisis comparativo de las cuatro distribuciones mencionadas:

- La distribución A está limitada por la longitud que pueden alcanzar los tres carriles dentro del área designada cada uno con un ancho de 0.7 m y separados por medio de barandas de 0.15 m, ya que su ancho se mantiene constante a lo largo de todo el recorrido. Para los cálculos, se seleccionó el módulo con configuración rectangular, con el cual se determinará la cantidad de baldosas que podrán instalarse en dicha área.

- La distribución B presenta dos limitaciones: la primera, que está diseñada para concentrar el flujo de los tres carriles de la distribución anterior en un solo carril; y la segunda, que el número de baldosas que se pueden instalar en este carril depende de la longitud del área designada. Por lo tanto, se ha seleccionado la configuración rectangular del módulo.
- La distribución C está diseñada para concentrar el flujo peatonal de los tres carriles de entrada en un área más amplia, a diferencia de la distribución B, que se limita a un solo carril. Para esta disposición, se utilizó la configuración de las baldosas triangulares, diseñando un tapete que se adapta perfectamente a la geometría correspondiente.
- La distribución D contempla un único carril que cubre toda el área designada. En esta disposición, el tapete de baldosas, compuesto por módulos triangulares, se ha diseñado en una configuración rectangular para ajustarse a dicha geometría.
- Para el carril de salida peatonal, se consideró una única configuración con módulos rectangulares a lo largo del área designada en todas las distribuciones, debido a las limitaciones propias de la ubicación.

Para cada distribución, se realizó el cálculo de la expectativa de generación (Anexo G).

Los resultados podremos observarlos en la Tabla 9.

Tabla 9*Energía generada por área de entrada y salida*

Dist.	Superficie [m ²]		No. de baldosas		Energía generada [Wh]		Energ. Total [Wh]
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	
A	39.84	21.25	156	48	77.71	56	133.71
B	11.54	21.25	46	48	68.74	56	124.74
C	24.7	21.25	225	48	112.08	56	168.08
D	12.12	21.25	56	48	73.72	56	129.72

3.4.5 Selección de la configuración de baldosas**Tabla 10***Descripción de las configuraciones propuestas para el diseño del sistema de generación*

Dist.	Descripción	Eficiencia Energética	Densidad de Energía
A	En esta distribución, aunque se emplea casi la totalidad de la superficie disponible, la densidad de energía es baja debido a la división del flujo peatonal en tres carriles independientes lo que conlleva a una reducida eficiencia energética.	0.66 Wh /baldosa	2.19 Wh / m ²
B	Aunque esta distribución minimiza el espacio en la entrada por la forma del embudo y ofrece una buena densidad de energía, la energía total generada es la más baja a pesar de	1.33 Wh / baldosa	3.80 Wh / m ²

	que la eficiencia por baldosa es la más alta en comparación a las otras configuraciones, lo que puede ser problemático si se necesita más energía.		
C	Esta configuración utiliza una mayor superficie para la instalación del sistema y genera la energía más alta de las cuatro disposiciones. Sin embargo, su densidad de energía es inferior a la de las distribuciones B y D y una eficiencia energética por baldosa menor que la distribución A.	0.62 Wh / baldosa	3.66 Wh / m ²
D	Esta opción es similar a la distribución B solo que aprovecha el espacio del embudo para instalar más baldosas lo que se traduce en una eficiencia energética y densidad de energía mayor.	1.25 Wh/ baldosa	3.89 Wh / m ²

Tal como se describe en la Tabla 10 (Anexo H), las distribuciones A y C presentan un diseño comparable, ya que ambas mantienen la orientación de los carriles y producen cantidades similares de energía por baldosa. No obstante, ambas distribuciones presentan la desventaja de dividir el flujo peatonal en tres carriles. Aunque esta configuración contribuye a una mejora en la dinámica del tránsito peatonal, también incrementa la cantidad de baldosas necesarias para cubrir la superficie destinada a la generación de energía.

La distribución D sigue la misma filosofía que la configuración A al concentrar el flujo peatonal en un único carril, lo que maximiza tanto la cantidad de energía producida por baldosa como la densidad de energía generada por metro cuadrado. La principal diferencia entre ambas es

que la distribución D optimiza el uso del espacio al concentrar el flujo peatonal en carriles equipados con baldosas generadoras, lo que resulta en una mayor producción de energía.

En conclusión, la distribución D ha sido seleccionada para este diseño debido a su relación favorable entre la generación de energía, el número de baldosas instaladas y el espacio ocupado.

3.4.6 Presentación de cargas

Dado que la distribución de energía en corriente continua (DC) está limitada por la distancia para evitar problemas de regulación de tensión y pérdidas de potencia, se ha propuesto una serie de cargas que pueden ser alimentadas de manera eficiente, y cuya cantidad puede variar dependiendo de la distribución seleccionada de baldosas. Estas cargas no solo son adecuadas para el suministro de potencia disponible, sino que también aportan valor a los miembros de la comunidad universitaria, además de promover el uso de alternativas energéticas no convencionales.

Las cargas seleccionadas se listan en la Tabla 11 junto a sus especificaciones técnicas más relevantes en términos de diseño que han sido extraídas de las hojas de datos de cada elemento (Anexo I).

Tabla 11


Tipos de cargas que componen la demanda del sistema

Tipo de Carga	Potencia Entrada [W]	Tensión [V]	Frecuencia [Hz]
Toma corriente USB-A	12	100 – 240 (AC)	50 - 60
Pantalla LCD 32"	48	100 – 240 (AC)	50 - 60
Luminarias LED	10	100 – 240 (AC)	50 - 60

Para determinar la posición final en donde se dispondrán las cargas de la Tabla 11 se realizó una descripción de los lugares ya existentes en la potería de la carrera 27 que tienen sentido y relevancia para este diseño y se listaron en la Tabla 12.

Tabla 12

Descripción de zonas y cargas

Ítem	Descripción	Ubicación
Tomacorriente y Luminarias	La infraestructura de la zona está compuesta por tres casetas que integran un par de bancas cada una. En esta ubicación se ha propuesto instalar dos tomacorrientes por cada banca (cuatro por caseta) y una luminaria por cada caseta.	
Pantalla Publicitaria LCD	En el área que precede a los torniquetes de entrada se planteó la instalación de la pantalla publicitaria con los datos de la energía generada, los pasos recibidos y otros tipos de información ya que son dispositivos que cuentan con sistema operativo y se pueden programar para proyectar información institucional o incluso el clima.	

Una vez seleccionado el tipo y la cantidad de cargas para cada ubicación, se procede a realizar la estimación de la carga basada en las especificaciones técnicas proporcionadas por cada fabricante. De esta manera, se determina el valor de la potencia que el sistema consume cada hora durante las 13 horas del día según el diagrama de estimación de cargas (Anexo J), y con este valor se calculó el número de baldosas necesarias para suplir esta demanda considerando un consumo de potencia máxima durante este tiempo.

3.4.7 *Calculo de la demanda para cada escenario de carga*

A través del análisis y proyecciones de consumo, se busca determinar el perfil de demanda, identificando escenarios considerados como el valor máximo y mínimo de consumo, para así dimensionar un sistema de generación que pueda responder de forma eficiente y confiable a las variaciones en la demanda eléctrica.

Se plantearon los tres escenarios de las Tablas 13, 14 y 15, cada uno con una cantidad diferente de cargas y, por lo tanto, de demanda de potencia para evaluar la viabilidad de la instalación de las baldosas según el área disponible y la disposición seleccionada previamente.

Tabla 13

Estimación de potencia máxima para el escenario de cargas A

Dispositivo	Cantidad	Potencia Total [W]	Tiempo [h]	Consumo de Energía [kWh]
Tomacorriente USB	12	144	13	1,872
Luminaria LED	3	30	1	0.03
Pantalla LCD	1	48	13	0.624
Total	16	222	27	2,526

Tabla 14*Estimación de potencia máxima para el escenario de cargas B*

Dispositivo	Cantidad	Potencia Total [W]	Tiempo [h]	Consumo de Energía [kWh]
Tomacorriente USB	8	96	13	1,248
Luminaria LED	2	20	1	0.02
Pantalla LCD	1	48	13	0.624
Total	11	164	27	1,892

Tabla 15*Estimación de potencia máxima para el escenario de cargas C*

Dispositivo	Cantidad	Potencia Total [W]	Tiempo [h]	Consumo de Energía [kWh]
Tomacorriente USB	4	48	13	0.624
Luminaria LED	1	10	1	0.01
Pantalla LCD	1	48	13	0.624
Total	6	106	27	1,258

3.4.8 Selección del escenario de carga

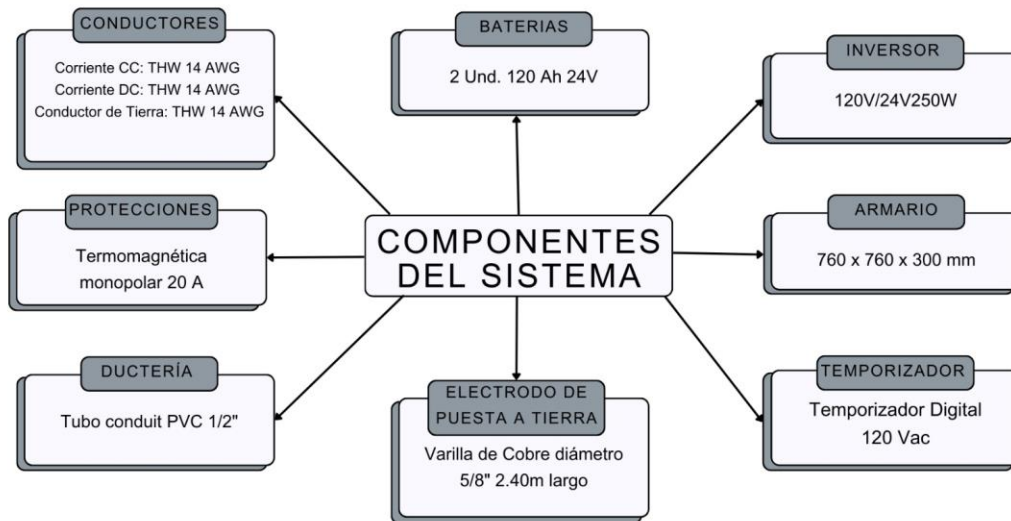
Considerando la potencia generada por la distribución seleccionada en este diseño, se descartan las configuraciones de carga indicadas en las Tablas 13 y 14 debido a la capacidad insuficiente para alimentar los dispositivos. La configuración de la Tabla 15 se ha elegido como el perfil de demanda del sistema, ya que las características de potencia demandada de esta configuración son compatibles con la generación de energía proporcionada por la distribución D.

3.5. Dimensionamiento de los componentes del sistema

Los componentes que conforman el sistema de generación se presentan en la Figura 10.

Figura 10

Componentes del sistema de generación



3.5.1 Baterías

La energía generada será almacenada en un conjunto de baterías para su uso durante los periodos de baja afluencia peatonal. Este almacenamiento permitirá que el exceso de energía proporcione autonomía en períodos en los que la potencia generada sea insuficiente para satisfacer la demanda. Estos cálculos están fundamentados en el Artículo 3.17.3 del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE, 2024).

Para dimensionar la batería (Anexo K) se calculó la corriente que consume la carga instalada de la Tabla 15 por hora, resultando en una corriente de 52.42 Ah para la carga instalada de 1,258 Wh y una tensión de 24 V.

En el mercado de baterías, las de litio son las más recomendadas por su superior durabilidad y eficiencia. Gracias a su mayor vida útil y su baja tasa de autodescarga, ofrecen un rendimiento

más prolongado y constante. Además, para prolongar la vida útil de la batería, se proyecta una profundidad de descarga (DoD) del 50%. La batería también deberá proporcionar una autonomía de al menos 2 días de uso y, dado que las baterías de litio tienen una eficiencia del 95%, por lo tanto, se calcularon los Ah con los que la batería debe contar para cumplir estas consideraciones resultando en un valor de 220.70 Ah.

Dado que este no es un valor comercial, se seleccionaron dos baterías de 120 Ah a 24 V (Anexo L) en paralelo para obtener una capacidad de 240 Ah lo que garantiza la autonomía del sistema por más de 2 días.

3.5.2 Inversor

El dimensionamiento adecuado del inversor (Anexo M) es fundamental para asegurar la eficiencia y correcto funcionamiento del sistema de energía basado en las baldosas inteligentes. Para este análisis, se cuenta con una capacidad de energía del sistema de 106 W, ajustada a un factor de potencia de 0.8. A continuación, se detallan los parámetros del inversor calculado:

- **Factor de sobrecarga:** Para garantizar que el inversor no opere al límite de su capacidad, se aplica un margen adicional del 25%, dentro del rango recomendado de 20-30%. Esto resulta en una potencia de 132.5 W, lo que permite al sistema funcionar de manera segura bajo diferentes condiciones.
- **Factor de simultaneidad:** Este factor, que indica la fracción de la potencia total que se espera que funcione simultáneamente, varía entre 0.3 y 0.9. Basado en el análisis de operación, se ha determinado un factor de 0.9, dado que no todos los equipos funcionarán al mismo tiempo, lo que ajusta la potencia a 119.25 W.

- **Tipo de onda:** Se selecciona un inversor de onda sinusoidal modificada, adecuado para equipos que no son extremadamente sensibles, garantizando compatibilidad con los dispositivos conectados.
- **Tensión del inversor:** La entrada de corriente continua (DC) para el inversor será de 24 V, proveniente de las baterías. La salida en corriente alterna (AC) será de 120 V, adecuada para la carga del sistema.
- **Eficiencia del inversor:** Para maximizar el aprovechamiento de la energía generada y almacenada, se considera una eficiencia del 92%, dentro del rango habitual de 85-95% que los fabricantes aseguran. La energía entregada por el inversor 129.62 W.
- **Potencia de salida del inversor:** Considerando los factores de sobrecarga y simultaneidad, la potencia nominal mínima requerida para el inversor es de 149.06 VA, con un corriente pico de 0.883 A hacia la carga.

El inversor que cumple con estos requisitos es el modelo Phoenix de la marca Victron Energy (Anexo N), con una tensión de entrada de 24 V en corriente continua (DC), una salida de 120 V en corriente alterna (AC) y potencia nominal de 200 W. En caso de requerir una futura ampliación, la misma marca ofrece inversores con mayores capacidades de potencia, las cuales pueden ser consideradas en base a necesidades de expansión.

3.5.3 Armario eléctrico

Para el montaje de los equipos del sistema, se ha previsto la instalación de un armario (Anexo Ñ) en la caseta de vigilancia ubicada en la entrada de la portería de la Carrera 27. Este armario deberá albergar el inversor, las baterías y temporizador programable, además de incluir riel omega para la incorporación de los dispositivos de protección. El armario debe cumplir con la normativa eléctrica vigente (RETIE, Norma Técnica Colombiana (NTC) 2050), y debe tener una

clasificación de protección mínima IP54, asegurando resistencia frente al polvo y salpicaduras. Adicionalmente, se recomienda que el armario sea fabricado con acero galvanizado o material equivalente, con recubrimiento anticorrosivo, y posea un sistema de ventilación natural o forzada para disipar el calor generado por los equipos. Asimismo, debe contar con señalización adecuada de cada circuito y disponer de protecciones contra sobretensión garantizando la seguridad y confiabilidad del sistema según las recomendaciones de la International Electrotechnical Commission 61643-11 (IEC, 2011).

3.5.4 Conductores

Tomando en consideración la norma NTC 2050 se seleccionó el calibre de los conductores en base a los siguientes tramos. Para el tramo baterías – inversor que transporta corriente continua se usó un conductor de tipo THW de calibre 14 AWG y para los tramos aguas abajo del inversor que transporta en corriente alterna se usó un conductor tipo THW de calibre 14 AWG (Anexo O).

El conductor de tierra para las cargas se seleccionó de acuerdo con la tabla 250.66 de la sección 250 de la norma NTC 2050.

3.5.5 Protecciones

Para la inclusión de las cargas, que son de baja potencia, se decidió agruparlas en un único circuito ramal, al cual se le asignó una protección de tipo termomagnética monopolar con una corriente nominal de 20 A (Anexo P). El dimensionamiento de esta protección se realizó calculando la corriente requerida, aplicando un factor de seguridad del 125% sobre la corriente nominal consumida por los equipos conectados al circuito (Anexo Q). Además, se verificó que la corriente que soporta la protección fuera mayor o igual a la corriente calculada del circuito y que la capacidad de corriente del conductor seleccionado fuera mayor o igual a la corriente nominal del interruptor automático.

3.5.6 Temporizador digital

El temporizador seleccionado para programar el ciclo de trabajo durante los días lunes a sábado entre las 6 p.m. hasta las 7 p.m. de la luminaria LED es el modelo DIN100B de la empresa TORK (Anexo R), que opera con una tensión de 120 Vac a 60 Hz. Este dispositivo tiene una capacidad de carga máxima de 16 A para diferentes tipos de cargas y un consumo de 4 VA.

3.5.7 Ductería

El sistema de ductos tiene dos tramos, el primero es de corriente continua que parte desde los dos dispositivos Power Managment System (Uno para el esquema de la entrada y otro para la salida) de Pavegen hasta el armario de distribución en la caseta de portería y el segundo de corriente alterna que inicia desde el tablero de distribución hasta la zona donde se encuentra cada una de las cargas. Todas las canalizaciones subterráneas conforme a la norma NTC 2050, sección 343, deben ser de tubería tipo Conduit subterránea no metálica. De acuerdo con el artículo 3.20.6.3 del RETIE, todos los conductores del circuito de línea, ya sea monofásico o polifásico, junto con su neutro y puesta a tierra, deben ser instalados en el mismo ducto. Por lo tanto, en AC cada canalización contendrá, como mínimo, tres conductores, dependiendo del tramo correspondiente (RETIE, 2024). Para efectos de revisión y mantenimiento, las cajas de inspección para redes de baja tensión estarán distribuidas en tramos rectos a distancias no mayores a 40 m donde sus dimensiones para red de distribución eléctrica son de 516x516x750 mm que corresponden al largo, ancho y profundo (Electrificadora de Santander S.A., 2024) de este componente que a su vez están formadas en su totalidad por un lecho filtrante de gravilla con un espesor de 5 cm.

En el tramo de corriente alterna se instalaron siete tubos conduit pvc de ½ pulgada con sus respectivas curvas de ½ pulgada, cada uno conteniendo tres conductores que parten desde el área

de la portería hasta la infraestructura de las casetas. Para el tramo de corriente continua, que se divide en entrada y salida, se utilizaron doce tubos de ½ pulgada y sus correspondientes curvas de ½ pulgada, cada uno albergando tres conductores por sección, los cuales culminan en el armario ubicado en la caseta de la portería (Anexo S). De acuerdo con la normativa vigente, se cumple con el factor de llenado máximo permitido del 40%, lo que garantiza la seguridad, eficiencia y facilita el mantenimiento de la instalación (Anexo T).

3.5.8 Electrodo de puesta a tierra

Según la sección 250 de la NTC 2050 (Norma Técnica Colombiana [NTC], 2020) Los conductores en instalaciones y circuitos se ponen a tierra para limitar tensiones causadas por rayos, sobrecargas o contactos accidentales con líneas de alta tensión, estabilizando la tensión a tierra durante el funcionamiento normal. Los conductores de puesta a tierra de los equipos están conectados al sistema de tierra para proporcionar un camino de baja impedancia que facilite la activación de los dispositivos de protección ante fallas a tierra. Además, los materiales conductores alrededor de los equipos eléctricos también se conectan a tierra para limitar su tensión y garantizar el correcto funcionamiento de los dispositivos de protección en caso de fallas(pp.100). Por lo tanto, todas las estructuras metálicas utilizadas serán conectadas a tierra física mediante varilla de puesta a tierra de cobre con una dureza 80 HRf, temple ¾ duro, una longitud de 2,4 m con el 97.4% de conductividad IACS. Además, todos los tableros y partes metálicas expuestas deberán estar unidas a tierra a través de puentes o conexiones equipotenciales, los cuales posteriormente se conectarán al barraje de puesta a tierra dispuesto en el armario.

Para la selección del conductor de puesta a tierra, se sigue lo estipulado en la sección 250 de la norma NTC 2050. En particular, la tabla 250.66 recomienda el uso de un conductor de calibre

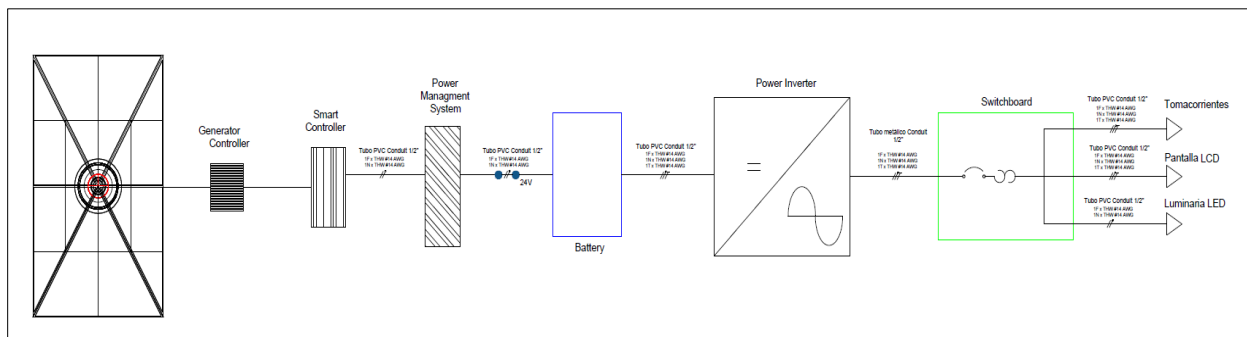
8 AWG para la conexión con el electrodo de puesta a tierra. Esta elección se justifica porque el conductor de mayor tamaño en la acometida tiene un calibre inferior a 2 AWG.

3.6. Diagrama Unifilar del Sistema de Generación

En la Figura 11 se presenta el diagrama unifilar (Anexo Z) para el sistema diseñado con baldosas marca Pavegen.

Figura 11

Diagrama unifilar del sistema de generación



3.7. Plano Eléctrico y Modelado 3D del Sistema

En Anexo W y Anexo X se incluyen los planos eléctricos detallados del sistema de generación de energía mediante baldosas, donde se representan las conexiones eléctricas, los componentes y la disposición del sistema en el área seleccionada. Además, se presenta un modelado 3D utilizando la herramienta de software de diseño Rhinoceros 3D que cuenta con una licencia temporal gratuita que está disponible para estudiantes, de esta forma se ilustra la disposición física de las baldosas y su integración con la infraestructura existente. Estos anexos proporcionan una visión técnica completa del diseño, facilitando la comprensión del sistema y sirviendo como guía para su implementación y evaluación futura.

3.8. Análisis Económico del Sistema

3.8.1. Factibilidad Económica

La factibilidad económica de un proyecto de energía sostenible depende de la evaluación de los costos involucrados y su justificación frente a los beneficios esperados. En el caso de este proyecto de implementación de baldosas Pavegen, es fundamental considerar tanto el costo de los componentes principales como los materiales complementarios que permiten su instalación y operación eficiente como se observa en la Tabla 16.

Tabla 16

Relación de costos del proyecto

Ítem	Artículo	Unid.	Cant.	V. Unitario	Valor Total
1	Baldosa Pavegen (Power Management System, Generator y Smart controller)	Un	104	\$686,720	\$ 71,418,880.00
2	Inversor CC/CA	Un	1	\$418,200	\$ 418,200.00
3	Baterías	Un	2	\$3,049,000	\$ 6,098,000.00
4	Iluminación LED	Un	1	\$14,750	\$ 14,750.00
5	Pantalla LCD	Un	1	\$4,635,360	\$ 4,635,360.00
6	Tomacorriente USB	Un	4	\$107,000	\$ 428,000.00
7	Armario	Un	1	\$687,500	\$ 687,500.00
8	Temporizador Digital	Un	1	\$297,000	\$ 297,000.00

9	Protección termomagnética monopolar 20 A	Un	1	\$467,977	\$ 467,977.00
10	Conductores 14 AWG	M	151	\$1,650	\$ 249,150.00
11	Tubo Conduit PVC x 3 metros	Un	19	\$8,390	\$ 159,410.00
12	Curvas Conduit PVC	Un	10	\$1,690	\$ 16,900.00
13	Varilla de Cobre 2.4 metros	Un	1	\$296,100	\$ 296,100.00
14	Otros Materiales	Un	1	\$1,062,189	\$1,062,189
				Total	\$86,249,416

El costo de las baldosas Pavegen constituye el 86% del presupuesto total, representando el principal gasto del proyecto. Cada baldosa tiene un costo de \$ 686,720 COP según la revista Forbes que sugiere precios por baldosa que pueden variar entre 75 y 160 dólares (Brueck, 2016), lo que eleva el costo total a \$71,418,880 COP para las 104 unidades requeridas. Este componente es fundamental, ya que las baldosas son el generador primario de energía a través de tecnología electromagnética, lo que justifica la alta proporción del presupuesto destinada a su adquisición. Además, debido a que las baldosas Pavegen son una tecnología de vanguardia y manufacturadas en el extranjero (Reino Unido), los productos de alta tecnología se aplican costos de aranceles aduaneros y también valores debido a factores como costos de importación y otros gastos locales que inflan el precio final en Colombia. Por lo tanto, el valor asociado con transporte e importación se observa en la Tabla 17.

Tabla 17*Costos asociados a la importación y transporte de las baldosas Pavegen*

Item	Concepto	Costo
1	Transporte Reino Unido - Bucaramanga	\$10,787,770
2	Aranceles (15%)	\$1,618,165
3	Iva (19%)	\$2,049,676
4	Costos de aduanas (10%)	\$1,078,777
Total		\$15,534,388

Para la instalación del sistema, se suman gastos asociados al alquiler de maquinaria y mano de obra tal como se observa en la Tabla 18.

Tabla 18*Costos asociados a la construcción del sistema recolector de energía*

Item	Concepto	Unid.	Cant.	V. Unitario	V. Total
1	Mano de obra	Dia	7	\$921,916	\$6,453,417
2	Equipos de construcción	Dia	6	\$444,073	\$2,664,439
Total					\$9,117,856

Finalmente, sumando todos los costos asociados al proyecto, el valor total es de \$111,001,661 (Anexo Y).

3.8.2. Viabilidad Económica

La viabilidad económica del proyecto se evaluó en función de los costos estimados y los ahorros energéticos proyectados. El sistema generará un total de 129.72 Wh por hora, lo que equivale a 1.68636 kWh por día. En un año, la energía total generada será de aproximadamente

615.52 kWh. Considerando un costo promedio de \$775.53 COP por kWh (Electrificadora de Santander S.A., 2024), el ahorro anual estimado en términos de consumo energético será de \$477,355 COP por año.

El costo total del proyecto asciende a \$111,001,661 COP, lo que lleva a un tiempo de recuperación de la inversión de más de 224 años, una cifra extremadamente alta desde el punto de vista económico, lo que hace que el proyecto no sea viable. Además, no se tuvo en cuenta costos asociados al mantenimiento del sistema y vida útil de las baldosas.

Sin embargo, el proyecto podría tener justificación adicional en términos de sostenibilidad ambiental, innovación tecnológica, y el posicionamiento de la universidad en investigación de energías alternativas. Además, la obtención de fondos externos o subvenciones podría mejorar la viabilidad financiera del proyecto y reducir el tiempo de recuperación de la inversión.

4. Conclusiones

1. Después de realizar un análisis de campo de los corredores peatonales de la sede principal de la UIS, se identificaron tres áreas tentativas con alta circulación: la entrada al edificio de la biblioteca, la entrada a comedores estudiantiles y la portería de la carrera 27. Tras un estudio de movilidad realizado mediante un conteo discreto, se determinó que el corredor con mayor flujo de transeúntes es la portería de la carrera 27, confirmando su relevancia como el principal canal de tránsito en la universidad. Además, se evidenció que este flujo sigue un patrón de ingreso y salida, donde las personas se desplazan desde la portería hacia el interior del campus a través de un corredor lineal restringido por torniquetes para luego dispersarse en varias direcciones, y toman un camino directo hacia la salida al egresar, sugiriendo que el diseño y planificación de este espacio puede optimizarse para concentrar y dirigir el flujo de personas por senderos delimitados sin afectar en gran medida la dinámica del desplazamiento normal de las personas y asegurando la completa activación de las baldosas instaladas.

2. En particular, el estudio detallado de la portería de la Carrera 27, que cuenta con flujos diferenciados tanto de ingreso como de egreso, destacó la importancia de analizar los movimientos de forma independiente para obtener datos más exactos. Utilizando métodos estadísticos como la media aritmética, la mediana y la desviación estándar, se pudo evaluar la variabilidad del flujo peatonal en ambos sentidos permitiendo seleccionar una muestra conservadora que represente el comportamiento peatonal, asegurando que el sistema esté correctamente dimensionado, evitando tanto la sobreestimación de la carga que puede suministrar como la sobreproducción de energía. Este enfoque estadístico no solo asegura una mejor comprensión del comportamiento peatonal,

sino que también optimiza el rendimiento del sistema, asegurando una generación energética constante y ajustada a los diferentes patrones de uso de los cuales se les puede incorporar.

3. La investigación realizada para determinar el estado del arte de las baldosas con capacidad de generación de energía eléctrica revela una brecha significativa entre el potencial de los dispositivos transductores y la inversión actual. Si bien existen diversos prototipos y proyectos de investigación, la mayoría se encuentran en etapas iniciales o son desarrollados por startups universitarias con prototipos que no se logran posicionar y deben abandonar el mercado. Los proyectos desarrollados hasta la fecha suelen ser de gran escala, financiados por grandes empresas o gobiernos, y enfocados en aplicaciones específicas. Esta realidad se debe, en gran medida, a las elevadas inversiones iniciales requeridas para la adquisición e instalación de este sistema, así como a la necesidad de desarrollar infraestructuras de almacenamiento y distribución de energía, arrojando como consecuencia que la adopción de esta tecnología por parte de usuarios individuales o pequeñas empresas resulta económicamente inviable en la actualidad.

4. Los sistemas de generación de energía basados en la captación de energía cinética, como los que utilizan transductores piezoeléctricos, electromagnéticos o tecnologías similares, ofrecen una alternativa innovadora para entornos urbanos de alto flujo peatonal. Aunque su capacidad de generación es limitada en comparación con fuentes tradicionales o renovables, estos sistemas presentan varias ventajas. Son escalables, de fácil implementación, y no requieren grandes infraestructuras, lo que los hace adecuados para aplicaciones localizadas, como la alimentación de pequeñas cargas eléctricas en áreas urbanas. Además, su contribución a la sostenibilidad es significativa, ya que aprovechan una fuente de energía amplia y limpia: el movimiento humano. Sin embargo, su eficiencia depende del tránsito constante de personas, lo que implica que su

viabilidad puede estar condicionada a la optimización del entorno obligando a realizar modificaciones para concentrar el tráfico con el objetivo de capturar la mayor cantidad de pasos.

5. El análisis económico realizado indica que la inversión inicial requerida para la instalación de las baldosas es excesivamente alta en comparación con los beneficios energéticos que se podrían obtener del sistema. Actualmente, debido al estado incipiente de la tecnología, los ahorros proyectados no son suficientes para compensar el costo elevado de implementación, lo que hace que el retorno de inversión sea incierto y, en el mejor de los casos, se extendería mucho más allá de lo esperado. Esto, sumado a la limitada capacidad de generación de las baldosas, hace que el proyecto no sea viable económicamente. En general, tanto la factibilidad económica como la recuperación de la inversión no resultan favorables, lo que compromete significativamente la justificación financiera del proyecto. Sin embargo, con la mejora tecnológica de los prototipos de transducción a futuro se podría obtener mayor potencial del proyecto y así enfrentar menores desafíos tanto de generación como financieros.

6. Estos sistemas de generación de energía representan un avance hacia un futuro más sostenible, alineando a la Universidad Industrial de Santander con las tecnologías renovables. Este proyecto no solo apoya la sostenibilidad de la universidad, sino que también abre las puertas a las nuevas generaciones de estudiantes e investigadores, brindándoles la oportunidad de participar activamente en el desarrollo y seguimiento de soluciones innovadoras. Al involucrarse en este proceso, los estudiantes no solo adquieren conocimientos técnicos en ingeniería eléctrica y energías alternativas, sino que también se preparan para asumir los desafíos energéticos del mañana, contribuyendo así a un futuro más consciente y responsable con el entorno que todos compartimos.

5. Recomendaciones

1. Con base a la investigación realizada, se sugiere revisar la viabilidad de proyectos afines con la tecnología en años posteriores, debido a que en el momento no ha sido ampliamente adoptada ni estudiada, derivando en elevados costos de desarrollo y adquisición en comparación a la generación esperada por un dispositivo de esta categoría de precios.

2. Se sugiere realizar pruebas y estudios para determinar el rendimiento real de las baldosas en condiciones locales, considerando variables como el flujo peatonal, el peso aplicado, y las condiciones climáticas. Esto permitirá ajustar expectativas y evitar sobreestimaciones de la capacidad de generación.

3. Se sugiere limitar inicialmente la aplicación de la energía generada a cargas de bajo consumo, como la iluminación de áreas comunes, señalización, u otros sistemas pequeños, donde el impacto será significativo sin requerir grandes cantidades de energía.

4. Se sugiere realizar un seguimiento continuo del rendimiento del sistema, así como también de explorar otras áreas del campus universitario o lugares adyacentes al mismo donde esta tecnología podría implementarse para maximizar su impacto. Además, Es recomendable mantener la flexibilidad en el diseño del proyecto para incorporar mejoras tecnológicas a medida que la investigación avance.

5. Debido a que la tecnología basada en la generación de energía mediante baldosas aún está en desarrollo y no ha alcanzado una madurez plena, se recomienda la creación de grupos de estudio enfocados en investigar y desarrollar mejoras tecnológicas. Estos grupos podrían explorar la incorporación de diferentes tipos de transductores, con el fin de optimizar la eficiencia y el rendimiento del sistema. Este esfuerzo no solo contribuirá al avance del proyecto, sino que también

ofrecerá a la comunidad estudiantil la oportunidad de involucrarse activamente en la innovación tecnológica, fortaleciendo sus habilidades en el campo de la ingeniería energética.

Referencias Bibliográficas

- Agatón Aguirre, F. J. (2014). Aguirre, A., & Javier, F. (2014). Análisis de la factibilidad económica y ambiental de utilizar baldosas piezoeléctricas en el campus de la Universidad Militar Nueva Granada (UMNG). (*Monografía de investigación*). Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá.
- Brueck, H. (18 de Noviembre de 2016). *FORBES*. Obtenido de In Washington, DC, People Are Using Their Feet To Turn On The Lights: <https://www.forbes.com/sites/hilarybrueck/2016/11/18/pavegen-energy-generating-sidewalk/>
- Duarte, F., Casimiro, F., Correia, D., Mendes, R., & Ferreira, A. (2013). Waynergy people: a new pavement. *ICE Proceedings Municipal Engineer*, 3. doi:166. 10.1680/muen.12.00049.
- Electrificadora de Santander S.A. (22 de septiembre de 2024). *ESSA siempre adelante - Grupo epm*. Obtenido de Clientes: Consultar tarifas: <https://www.essa.com.co/site/mi-factura/formula-tarifaria-y-tarifas/consultar-tarifas>
- Electrificadora de Santander S.A. (22 de septiembre de 2024). *ESSA siempre adelante - Grupo epm*. (Información corporativa) Obtenido de Redes de Distribución Urbana - Redes Subterráneas de Media y Baja Tensión - Aspectos Civiles: <https://www.essa.com.co/site/Portals/proveedores/normas-tecnicas-transicion/ntr-05-redes-subterraneeas-de-media-y-baja-tension-aspectos-civiles.pdf?ver=2021-10-19-162946-137>
- Energy Floors. (22 de Septiembre de 2024). *ENERGY FLOORS*. Obtenido de ENERGY FLOORS: <https://energy-floors.com/introducing-kinetic-energyfloors/>
- Global Energy Harvest Co., Ltd. (22 de Septiembre de 2024). *Sound Power*. Obtenido de Global Energy Harvest: <https://globalenergyharvest.co.jp/>
- International Electrotechnical Commission [IEC]. (2011). *IEC 61643-11* . International Electrotechnical Commission.
- NILSSON, J., & THORSTENSSON, A. (1989). Ground reaction forces at different speeds of human walking and running. *Acta Physiol Scand*, 217-227. doi:10.1111/j.1748-1716.1989.tb08655.x
- Norma Técnica Colombiana [NTC]. (2020). *Sección 250 de la NTC 250*.
- Pavegen. (22 de Septiembre de 2024). *PAVEGEN*. Obtenido de PAVEGEN: <https://www.pavegen.com/>

- Power Leap. (22 de Septiembre de 2024). *SmartFloor*. Obtenido de Power Leap: https://www.powerleap.net/page_id_27/
- R. Sarker, M., Julai, S., Mohd Sabri, M. F., Mohd Said, S., Islam, M., & Tahir, M. (2019). Review of piezoelectric energy harvesting system and application of optimization techniques to enhance the performance of the harvesting system. *Sensors and Actuators. A. Physical*, 300, 111634-, 1-14.
- Reglamento Técnico de Instalaciones Electricas [RETIIE]. (2024). Ministerio de Minas y Energía.
- Scaglioni Solano, P., & Aragón Vargas, L. F. (2001). Comparación del esfuerzo cardiovascular en la utilización de la máquina Health Walker y el ejercicio de caminar en adultos sanos. *Fundación Dialnet - Revista de Ciencias del Ejercicio y la Salud*, 12.
- Sharma, S., Kiran, E., Azad , P., & Vaish, R. (2022). A review of piezoelectric energy harvesting tiles: Available designs and future perspective. *Energy Conversion and Management*, 254, 115272-, 11. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115272>
- Starner, T. (1996). Human-powered wearable computing. *IBM Systems Journal*, 35(3,4), 618–629, 618-629. doi: <https://doi.org/10.1147/sj.353.0618>
- Unidad de Planeación Minero-Energética [UPME]. (2024). *Resolución No. 000705*. Sistema de Información Ambiental Minero-Energético [SIAME]. Obtenido de <https://www1.upme.gov.co/siame/Paginas/calculo-factor-de-emision-de-Co2-del-SIN.aspx>
- Walpole, S. C., Prieto Merino, D., Cleland, J., Gretchen , S., Ian, R., & Phil , E. (2012). The weight of nations: an estimation of adult human biomass. *BMC Public Health*, 5. doi:<https://doi.org/10.1186/1471-2458-12-439>
- XM S.A. E.S.P. (22 de Septiembre de 2024). *PARATEC*. Obtenido de Capacidad efectiva por tipo de generación: <https://paratec.xm.com.co/paratec/SitePages/generacion.aspx?q=capacidad>
- Zhao, B., Qian, F., Hatfield, A., Zuo, L., & Xu, T.-B. (2023). A Review of Piezoelectric Footwear Energy Harvesters: Principles, Methods, and Applications. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 1-2. doi:<https://doi.org/10.3390/s23135841>