
ANÁLISIS DE LA FACTIBILIDAD ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE UTILIZAR BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS EN EL CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA (UMNG)

FREDY JAVIER AGATÓN AGUIRRE*

UMNG

fredyjavier@gmail.com

Abstract

La presente monografía busca generar conocimiento sobre la generación de energía eléctrica a partir del efecto piezoeléctrico analizando desde un punto de vista investigativo los costos de implementar este tipo de tecnologías en la UMNG, su impacto potencial en la generación de energía eléctrica, así como el ahorro monetario que puede generar éste tipo de soluciones en costos por concepto de electricidad y a su vez sus impactos en la mitigación de emisiones de CO₂. Se establece una forma de estimar el flujo de peatones en la entrada principal de la sede calle 100 de la UMNG, así como también se propone implementar un sistema compuesto por 10 baldosas piezoeléctricas en los 5 torniquetes que se encuentran en dicha entrada. A pesar de que los resultados esperados en términos de producción de energía eléctrica generada por el sistema propuesto no són los esperados, la investigación halló un elevado potencial de instalar éste tipo de tecnologías en la universidad en un futuro dado que se espera que ésta tecnología reduzca su precio de forma acelerada, adicionalmente se puede generar conciencia ambiental en un elevado número de personas que conformán la comunidad académica de la UMNG y evidenciar el compromiso que tiene la universidad con el medio ambiente.

Palabras clave: Baldosas Piezoeléctricas, Energías Limpias, Factibilidad Económica y ambiental.

Abstract

This article seeks to generate new possibilities for the production of electricity using the piezoelectric effect. This effect is analyzed from a perspective that takes into account the costs of implementing the technology at the university, its potential to generate electricity, the monetary savings in the electrical bill and the impact on CO₂ emissions reduction. An estimation of the pedestrian flow through the main campus entrance at the university was made, to find the approximate number of steps on 10 piezoelectric tile systems placed in the 5 turnstiles located there. Although the amount of electric energy generated by the tiles due to pedestrians stepping on them is below our initial expectations, the study found a good potential for their installation at the university in the future, considering the expected rapid reduction in price for tile systems. In addition to the possibility of producing electricity, the installation of these systems will generate environmental awareness in the large number of people who make up the academic community at the UMNG, as well as enhance the university commitment towards the environment.

*Ingeniero catastral y geodesta de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

I. INTRODUCCIÓN

A puertas de una crisis civilizatoria la cual se caracteriza por mostrar que aparentemente nuestro modelo de producción y nuestra forma de vida están afectando de manera drástica al medio ambiente, generando cambios en el clima, agotamiento de suelos, contaminación del aire y del agua. Se evidencia entonces que no podemos continuar con este modelo de producción, con esto en mente las personas estamos adquiriendo conciencia sobre la importancia de modificar nuestra forma de vida observando las consecuencias de nuestros actos sobre el medio ambiente, bajo este marco se ha comenzado a investigar sobre el tema de las energías limpias y renovables, una de estas fuentes de energías limpias son las baldosas que utilizan el efecto piezoeléctrico para generar energía eléctrica.

Dentro de estas investigaciones se han generado estudios sobre la posibilidad de instalar estas baldosas en zonas urbanas altamente concurridas, se han realizado pruebas en eventos de alto impacto cultural como maratones, o festivales en las cuales se ha generado conciencia sobre las formas de generar energía limpias, y sobre la necesidad de cuidar y conservar al medio ambiente.

Desde la perspectiva de investigación que se encuentra implícita en la academia, se pretende en esta monografía analizar la factibilidad económica y ambiental de instalar un conjunto de 10 baldosas piezoeléctricas en la sede calle 100 de la UMNG se debe indicar que en esta sede de la universidad tiene a su cargo la parte administrativa de la universidad y en ella se imparten un elevado número de pregrados y posgrados, de acuerdo con [Espinosa, 2010], en esta sede de la universidad en el año 2010 se encontraban 7159 *alumnos matriculados (sin contar con los estudiantes de posgrados)*, y 2028 *personas laboraban en esta sede de la universidad*, conociendo esto se puede deducir que existe un elevado flujo de peatones en la entrada principal de esta sede de la UMNG.

Adicionalmente en [Espinosa, 2010] se indica que en promedio en esta sede de la universi-

dad se consume por mes aproximadamente 116 KWh, lo cual nos permite conocer el alto consumo de energía eléctrica que se produce en esta sede, por esta razón la sede calle 100 de la UMNG puede ser un lugar adecuado para implementar este tipo de soluciones de energías limpias, las cuáles generen impacto en la población estudiantil.

Para valorar la factibilidad económica y ambiental de implementar las baldosas piezoeléctricas en la sede calle 100 de la UMNG, se divide esta monografía en los siguientes capítulos:

- I Introducción
- II Métodos
- III Resultados
- IV Conclusiones

II. MÉTODOS

Para evaluar la factibilidad económica y ambiental de utilizar baldosas piezoeléctricas en el campus calle 100 de la UMNG, se desarrollaron las siguientes actividades:

- Se realizó una revisión bibliográfica sobre estas baldosas y casos de estudio de utilización en otros países.
- Se obtuvo el valor medio de flujo de personas que transitan a través de la entrada principal del campus calle 100 de la universidad por medio de la valoración estadística del flujo de personas que se registraron a través de cada uno de los torniquetes ubicados en la entrada principal del campus en el año 2013. Para realizar esta valoración estadística se debieron realizar las siguientes acciones:

- I Obtener los datos de ingresos y egresos del personal de la universidad, estos se lograron por medio de la colaboración del profesor Jesús Ernesto Villarreal y del departamento de conservación de la UMNG.
- II Los datos obtenidos fueron obtenidos en formato pdf (portable document format), por tal razón hubo

necesidad de convertirlos a excel, esto se realizó por medio del software *PDF to Excel with OCR*.

III A través del procesamiento de datos realizado en Excel se obtuvo el valor del flujo medio esperado de personas que ingresan y egresan de la sede calle 100 de la UMNG por día.

- Se tomó como valor promedio de generación de energía 4.459 Joules obtenido mediante el cálculo de la energía potencial por pisada, a este valor se le castigo en un 5% debido a la luz LED que se enciende cuando la baldosa genera energía. Luego de esto se calculó el valor de energía generada por año por baldosa de acuerdo al flujo medio esperado calculado previamente.
- Se definió el número de baldosas a instalar de acuerdo a los precios del fabricante y se proyectaron los costos de instalación y mantenimiento de las mismas.
- Se procedió a calcular el valor monetario de la energía producida por cada baldosa al año esto con el valor actual de la energía eléctrica para el caso en específico de la universidad y se procedió a proyectar al costo esperado de energía eléctrica por año de vida útil de las baldosas, y con estos valores se realizó una comparación entre el valor monetario a invertir para instalar y mantener las baldosas durante su vida útil y el valor monetario que se ahorraría en energía eléctrica sin la instalación de éstas, con estos valores se evaluó la factibilidad económica del proyecto.
- Se procedió a través de datos nacionales a inferir la cantidad de dióxido de carbono generado por KWh en la producción de energía eléctrica en el país y se comparó con la cantidad de dióxido de carbono generado por KWh de energía obtenida por medio de las baldosas esto con base en bibliografía que trata sobre el tema, con base en estos valores se evidenció la factibilidad ambiental del proyecto.

III. RESULTADOS

I. Marco Teórico

I.1 Fuerza

La fuerza se define como una influencia externa sobre un cuerpo que causa su aceleración respecto a un sistema de referencia inercial, si se supone que no actúan otras fuerzas la dirección de la fuerza coincide con la dirección de la aceleración causada [Tipler and Mosca, 2005], la ecuación general de fuerza se indica en la ecuación (1)

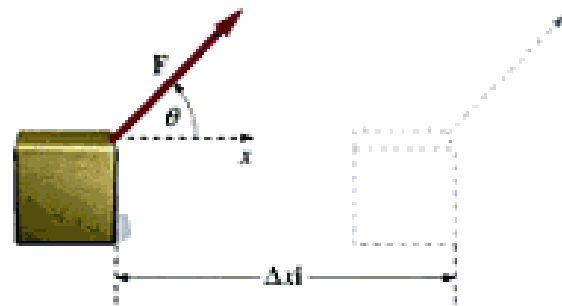
$$\sum F = m \times \vec{a} \quad (1)$$

I.2 Trabajo

El trabajo surge a partir de una *fuerza* que actúa sobre un objeto que se mueve a través de una distancia y existe una componente de la fuerza a lo largo de la línea de movimiento. Si la fuerza es constante, en una sola dimensión el trabajo realizado es igual a la fuerza multiplicada por la distancia. [Tipler and Mosca, 2005] El trabajo W realizado por una fuerza constante \vec{F} cuyo punto de aplicación se traslada una distancia Δx_i se define por medio de la ecuación (2)

$$W = F_x \times \Delta x = F \cos \theta \Delta x \quad (2)$$

En donde θ es el ángulo entre las direcciones de F e i y Δx es el desplazamiento del punto de aplicación de la fuerza, tal como se indica en la siguiente figura:



El trabajo es una magnitud escalar que es positiva si Δx y F , tienen signos iguales y es

negativa si tienen signos opuestos. Las dimensiones del trabajo son las de una fuerza por una distancia, en el caso del *Sistema Internacional* es el Julio(J), que procede de un newton por un metro:

$$1J = 1N \cdot m \quad (3)$$

I.3 Potencia

La *potencia* P suministrada por una fuerza es el trabajo por unidad de tiempo que realiza dicha fuerza. [Tipler and Mosca, 2005].

Considerando una partícula con velocidad instantánea v , en un intervalo corto de tiempo δt , la partícula se desplaza $\delta s = v\delta t$. El trabajo realizado por una fuerza F que actúa sobre la partícula durante este intervalo de tiempo es:

$$dW = F \cdot \delta s = F \cdot v\delta t \quad (4)$$

La potencia suministrada por la partícula se define por medio de la ecuación (5)

$$P = dW/dT = F \cdot v \quad (5)$$

La unidad del *Sistema Internacional* de potencia es el *vatio* (W) que es equivalente a un Julio por segundo

$$1W = 1J/s \quad (6)$$

I.4 Energía

Puede pensarse en la energía como algo *que se puede convertir en trabajo*. Cuando decimos que un objeto tiene energía, estamos diciendo que es capaz de ejercer una fuerza sobre otro objeto para realizar un trabajo sobre él. Por el contrario, si realizamos un trabajo sobre algún objeto, le hemos proporcionado a éste una cantidad de energía igual al trabajo realizado. [Tippens, 2003].

Las unidades de energía son las mismas que las unidades del trabajo *Joule* en el *Sistema Internacional* de medidas, la energía por lo general se clasifica en:

1. *energía cinética* E_k : Energía que tiene un cuerpo en virtud de su movimiento.
2. *Energía potencial* E_p : Energía que tiene un sistema en virtud de su posición o condición.

I.5 Energía potencial

La energía que posee el sistema en virtud de sus posiciones o condiciones se llama *energía potencial* [Tippens, 2003]. Para entender mejor este concepto se puede pensar en una grúa la cual es utilizada para levantar un cuerpo cuyo peso es w , hasta una altura h por encima del suelo, en este caso se presenta un sistema de energía potencial gravitacional dado que la Tierra ejerce la fuerza gravitacional sobre todo cuerpo que se encuentre sobre su superficie. La energía potencial gravitacional se puede describir por medio de la ecuación (7)

$$E_p = mgh \quad (7)$$

En donde m es la masa del cuerpo que genera el trabajo, g es la fuerza de gravedad y h es la distancia sobre la cual se realiza el trabajo. En la siguiente imagen se puede observar las Cataratas del Niágara, a través de su energía potencial se produce energía eléctrica, tomada de [Tipler and Mosca, 2005].



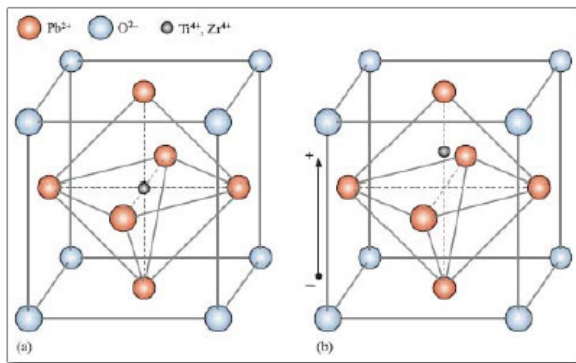
Hay que observar la diferencia entre potencia y trabajo, dos motores que elevan una determinada carga a igual distancia consumen la misma energía, pero el que lo levanta en menos tiempo es más potente. Al pagar la factura de

consumo de electricidad, se paga la energía consumida, no la potencia. Por lo general la factura viene expresada en kilovatios-hora (KW · h). Un kilovatio-hora de energía es equivalente a 3'600,000 J. [Tipler and Mosca, 2005].

$$\begin{aligned}
 1kW \cdot h &= (10^3W)(3600s) \\
 &= 3,6 \times 10^6W \cdot s \quad (8) \\
 &= 3,6MJ
 \end{aligned}$$

I.6 El efecto piezoeléctrico

En ciertos cristales los cuales contienen moléculas polares como el cuarzo, las tensiones mecánicas aplicadas al cristal producen la polarización de las moléculas, este fenómeno es conocido como efecto *piezoeléctrico*. La polarización del cristal cuando se le somete a una tensión causa una diferencia de potencial a través del cristal lo cual puede utilizarse para producir una corriente eléctrica. [Tipler and Mosca, 2005]. La producción de energía a partir de las baldosas piezoeléctricas se permite por las propiedades de la estructura de los cristales, ciertas cerámicas tienen una estructura tetragonal con un átomo en el centro. Cuando el cristal es comprimido el átomo que se encuentra en el centro se desplaza, lo cual genera un potencial eléctrico.



I.7 Baldosas Piezoeléctricas

Cada día aumenta el interés mundial por encontrar energías limpias que sustituyan a la muy contaminante energía fósil. Aunque en Colombia el uso de esta última es muy

reducido, ya que el país depende mayoritariamente de la producida en hidroeléctricas, desarrollar nuevas alternativas redundaría en un *impacto ambiental* y en ahorro económico.[Construdata, 2013] La piezoelectricidad fue observada por primera vez por Pierre y Jacques Curie en 1881, este fenómeno ocurre cuando cristales como el cuarzo o la turmalina, entre otros, son sometidos a la acción mecánica de la compresión, adquieren una polarización eléctrica de su masa, apareciendo una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie, que se manifiesta en chispas. [Construdata, 2013].

Pavegen ubicada en el Reino Unido e Innowattech ubicada en Israel, crearon unas losas las cuales son capaces de transformar la energía producida por la presión que se ejerce sobre ellas al momento de ser comprimidas en electricidad apta para alimentar las redes del alumbrado público y establecimientos. [Construdata, 2013]

Las baldosas fabricadas por Pavegen Systems, una empresa inglesa lanzada en 2009 por Laurence Kemball-Cook, tienen un tamaño de 45 × 60 centímetros, están pensadas para zonas en las que se concentra mucha gente, como estaciones de tren, de metro, de autobús, aeropuertos, colegios y centros comerciales. La energía generada por millones de pisadas puede ser utilizada en múltiples aplicaciones, como iluminación de señales, anuncios digitales o zonas Wi-fi. [Geographic, 2012] En la siguiente imagen se pueden observar las baldosas de Pavegen, tomada de [Pavegen, 2014]



De acuerdo con [Pavegen, 2014] la superficie superior de las baldosas se producen con caucho reciclado y más del 80% de la baldosa se

produce con materiales reciclados, adicionalmente las baldosas pueden reemplazar a los pisos convencionales existentes. Adicionalmente las baldosas Pavegen, tienen una luz LED en el centro de ésta la cual se enciende al ser pisada y consumen solo el 5% de la energía generada por pisada.

Por otro lado la empresa ubicada en Raana, Israel, denominada Innowattech, se enfoca a generar electricidad por medio del movimiento de los coches, de acuerdo con [Israel, 2012], el producto desarrollado se basa en la instalación debajo del asfalto a unos 5 centímetros de la capa superior de unos generadores, de tal forma que cuando pasan los vehículos por estas carreteras, convierten la presión ejercida sobre ellos en electricidad.

También se indica que para la generación eléctrica por medio de el producto de Innowattech se emplean discos piezoeléctricos, que son capaces de transformar las tensiones mecánicas en voltaje eléctrico.

De acuerdo con [Israel, 2012], los primeros resultados de la prueba desarrollada en Israel indican que los sectores de vías por los cuales circulan entre 10 y 20 trenes de 10 vagones por hora pueden generar 120 kilovatios de energía renovable por hora.

II. Solución propuesta

Se propone en este análisis la utilización de las baldosas piezoeléctricas Pavegen dentro del campus de la UMNG calle 100, esto con el fin de utilizar el flujo de peatones en la zona de ingreso en específico en donde se encuentran los torniquetes de entrada y salida del campus para iluminar esta zona por medio de la luz LED que poseen las baldosas y para almacenar y utilizar la energía producida por las pisadas sobre las baldosas en actividades relacionadas con aplicaciones que generen conciencia sobre la importancia de cuidar al planeta, el compromiso ambiental de la UMNG, la necesidad de conocer sobre fuentes limpias de energía y publicidad mediante el uso de monitores alimentados por la energía

producida por las baldosas, y la ubicación de una zona de carga de dispositivos móviles, también alimentada por la energía producida por las baldosas, en la siguiente imagen se observa el campus de la sede calle 100 de la UMNG, y la ubicación de la entrada principal, en la cual se propone ubicar las baldosas piezoeléctricas, tomado de [UMNG, 2014]



Se propone instalar dos baldosas Pavegen por torniquete de forma que exista una baldosa previa al torniquete de acceso y una baldosa posterior al torniquete, con el fin de que seá pisada en dos ocasiones por cada persona que ingrese o egrese del campus calle 100 de la UMNG, por los torniquetes de la entrada principal.

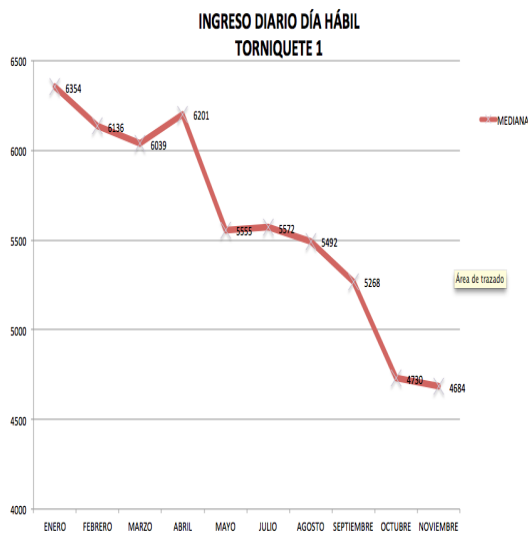
II.1 Análisis estadístico del flujo peatonal

Por medio de la información correspondiente al flujo de ingreso a través del torniquete 1 ubicado en la entrada principal a la sede calle 100 de la UMNG, se realizó un análisis estadístico de dichos datos para obtener un valor estimado del flujo de personas por día hábil que circula a través de cada uno de los torniquetes que permiten la entrada y salida de personal perteneciente a la UMNG.

Los datos procesados se obtuvieron por medio del departamento de conservación de la UMNG, y los resultados estadísticos obtenidos separados por mes se muestran a continuación.

| CUADRO CONSOLIDADO DE ESTADÍSTICAS DE INGRESO PEATONAL POR TORNIQUETE 1 POR MES | | | | | | | | | | | |
|---|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|------------|---------|-----------|------------------|
| MEDIDA/MES | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO | JULIO | AGOSTO | SEPTIEMBRE | OCTUBRE | NOVIEMBRE | PROMEDIO POR MES |
| MINIMO | 4667,00 | 2365,00 | 5336,00 | 4973,00 | 3982,00 | 5345,00 | 1107,00 | 4541,00 | 5203,00 | 4345,00 | 4186,40 |
| MAXIMO | 6757,00 | 6857,00 | 6880,00 | 7734,00 | 10994,00 | 5879,00 | 6077,00 | 5609,00 | 4122,00 | 4880,00 | 6578,90 |
| PROMEDIO | 5989,86 | 5908,65 | 6037,63 | 6274,41 | 5637,81 | 5396,58 | 4999,85 | 5203,90 | 4708,63 | 4648,00 | 5500,53 |
| MEDIANA | 6354,00 | 6135,50 | 6038,50 | 6200,50 | 5555,00 | 5571,50 | 5492,00 | 5268,00 | 4729,50 | 4683,50 | 5602,80 |
| DESVIACION ESTANDAR | 731,59 | 1011,50 | 346,97 | 757,61 | 1557,57 | 133,83 | 1298,09 | 238,94 | 277,88 | 267,11 | 662,11 |

En la imagen anterior se puede observar la elevada variación existente en las desviaciones estándar de los datos, por tal razón se decidió tomar la *mediana* como el mejor estimador de medida central, cabe resaltar que para obtener estas estadísticas se utilizaron más de 1'000,000 de datos de ingreso de personas autenticadas a la sede de la calle 100 de la UMNG, durante el periodo comprendido entre el 1 de enero del 2013 y el 7 de noviembre de 2013, luego de recopilar esta información se filtro de acuerdo a los días hábiles que se encuentran dentro del calendario académico de la UMNG para el año 2013 (tomado de [UMNG, 2014], retirando los correspondientes días festivos, para no generar sesgo sobre los resultados obtenidos, en la imagen siguiente se puede observar la variación mensual de la mediana del ingreso de personas por el torniquete 1, de acuerdo a los días hábiles dentro de los periodos académicos de la UMNG en el año 2013.



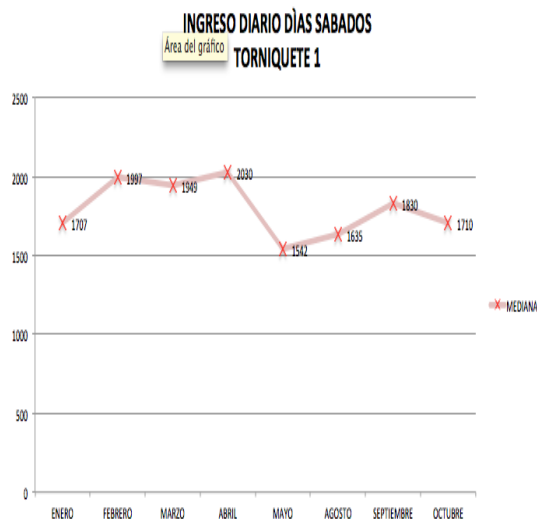
De acuerdo al valor de mediana obtenida para la muestra de información analizada, podemos inferir que el valor de personas que ingresan por torniquete a la UMNG es de 5603 personas, si lo multiplicamos por 5 torniquetes existentes en la entrada nos produce un valor de 28015 personas ingresando diariamente en

un día hábil académico, y si lo multiplicamos por 2, las personas que ingresan luego egresan obtenemos un flujo total neto de 56030 personas que transitan por la entrada principal de la UMNG en la sede de la calle 100, por cada día hábil dentro de los días que conforman los semestres académicos en la universidad.

De la misma manera, se realizó el análisis de ingresos de personas pertenecientes a la UMNG a través del torniquete 1 los días sábados, las estadísticas obtenidas por este análisis se resumen en el siguiente cuadro:

| ESTADÍSTICA/ | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO | AGOSTO | SEPTIEMBRE | OCTUBRE | PROMEDIO POR MES |
|---------------------|-------|---------|-------|-------|------|--------|------------|---------|------------------|
| MINIMO | 1127 | 1805 | 1710 | 1732 | 1512 | 1502 | 1607 | 1425 | 1553 |
| MAXIMO | 2287 | 2080 | 2023 | 2246 | 1788 | 1936 | 2136 | 2063 | 2070 |
| PROMEDIO | 1707 | 1961 | 1908 | 2030 | 1596 | 1658 | 1851 | 1733 | 1803 |
| MEDIANA | 1707 | 1997 | 1949 | 2030 | 1542 | 1635 | 1830 | 1710 | 1800 |
| DESVIACION ESTANDAR | 820 | 141 | 136 | 248 | 131 | 167 | 219 | 320 | 273 |

Debido a la elevada variación existente en las desviaciones estándar de los datos por mes se selecciono la mediana como el mejor estimador para indicar el valor probable de ingreso por cada torniquete en los días sábados que se encuentran dentro de los semestres académicos de la UMNG, en la siguiente imagen se puede observar la variación mensual del flujo de personas que ingresan en promedio por cada sábado en el mes por el torniquete 1 de la entrada principal de la sede de la calle 100 de la UMNG.

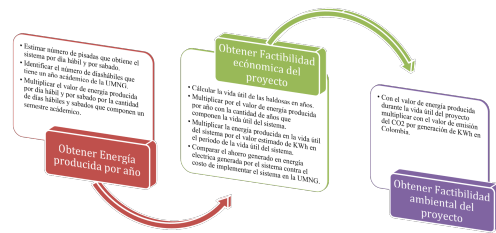


De acuerdo al valor de mediana obtenida para la muestra de la información analizada, se puede inferir que el valor de personas que ingresan en promedio por torniquete los días

sabados a la sede de la calle 100 de la UMNG es de *1800 personas*, si lo multiplicamos por 5 torniquetes existentes que se encuentran en la entrada principal, se obtiene un valor de *9000 personas*, de igual forma lo multiplicamos por dos, para simular el ingreso y egreso por día, realizando éste cálculo obtenemos un valor promedio de *18000 personas*, como valor de flujo peatonal en la entrada peatonal de la sede calle 100 de la UMNG los días sábado dentro de los semestres académicos.

II.2 Cálculos

Para obtener la factibilidad económica y ambiental del proyecto es necesario seguir por un flujo de cálculos a través de los cuales se puede determinar la energía en KWh producidas por el sistema propuesto en total durante su vida útil, el flujo de cálculos se puede observar en la siguiente imagen:



Con el análisis estadístico realizado en la anterior sección, se ha obtenido el valor estimado de flujo de peatones por la entrada principal de la sede calle 100 de la UMNG, ahora podemos obtener por medio de unos cálculos el valor de energía que se puede producir a través de la instalación de diez baldosas Pavegen, dos por cada torniquete que se encuentran en la entrada principal para así obtener dos pisadas por cada persona que ingresa o egresa del campus universitario. Inicialmente debemos calcular el valor de energía potencial que se produce en cada pisada de una baldosa, para ello lo primero que se debe realizar es encontrar el valor de energía que se produce por cada pisada, para esto, se realiza, lo siguiente:

$$E_p = 1,3 \times \tilde{P} * g * h \quad (9)$$

En donde 1,3 veces nuestro peso se toma como valor de referencia de la fuerza que

ejercemos al dar un paso de acuerdo a [NILSSON and THORSTENSSON, 1989], este valor es de 1 a 1.5 cuando se camina y de 2 a 2.9 cuando se corre, por tal razón se toma en valor promedio 1.3, \tilde{P} es el peso promedio de una persona en Colombia se toma un valor de 70kg, para realizar los cálculos, g representa la fuerza de gravedad, que equivale en promedio a $9,8 \frac{m}{s^2}$, y h es la altura que se desplaza la superficie de la baldosa por cada paso, de acuerdo a [Pavegen, 2014] equivale a 0.0005 metros y E_p representa la energía potencial por paso dado, realizando el cálculo, se encuentra como valor lo siguiente:

$$E_p = 4,459 \text{ J} \quad (10)$$

Ahora para convertir éste valor de energía encontrado en un valor de potencia debemos conocer el tiempo promedio que tarda una persona en dar un paso, de acuerdo a [Whittle, 2007], el valor de cadencia al caminar de una persona (número de pasos que da en una unidad de tiempo) se encuentra entre 90 a 140 pasos por minuto, lo cual tomando como referencia 115 pasos por minuto, genera un promedio de tiempo de 0.52 s por paso, ahora tomando este valor de referencia podemos decir, que la ecuación (5)

$$P = \frac{5,145 \text{ J}}{0,52 \text{ s}} = 8,5 \text{ Watts por paso dado} \quad (11)$$

De acuerdo con [Pavegen, 2014], cada paso produce en promedio 8 watts, de forma que el valor aquí hallado no se distancia mucho del valor de referencia dado por el fabricante. Luego de hallar el valor de referencia de pisadas por día hábil y por sábado, ahora para encontrar un valor de pisadas total por todos los torniquetes de acuerdo con la solución propuesta en un año académico, se puede plantear la siguiente ecuación:

$$N_{ptdha} = (N_{pdht} \times N_{dhpa} + N_{pst} \times N_{dspsa}) \times N_t \times 2 \times 2 \quad (12)$$

En donde: N_{ptdha} es la cantidad total de pisadas obtenidas sobre todas las baldosas Pavegen instaladas de acuerdo a la solución propuesta

en un año, N_{pdht} es el valor promedio de ingreso por torniquete a la UMNG en un día hábil, de acuerdo con nuestro análisis estadístico es de 5603, N_{pst} es la cantidad de personas que ingresan por torniquete en un día sábado el cual de acuerdo al análisis estadístico es de 1800 personas, N_{dhp} representa el número de días hábiles por año académico, que de acuerdo al calendario académico de la UMNG del año 2014 es de 187 días, N_{dspa} es la cantidad de sábados que existen dentro del año académico de la UMNG de acuerdo al calendario académico reglamentario del año 2014 es de 37, N_t es el número de torniquetes ubicados en la entrada principal de la UMNG que es igual a 5 y se multiplica por el valor de baldosas puestas por cada torniquete 2 de acuerdo a la solución propuesta y se indica que por cada torniquete egresa la misma cantidad de personas que ingresan por esta razón se multiplica también por 2 y la anterior ecuación genera un resultado de 2'206,310 pasos por baldosa al año.

Luego de encontrar la cantidad de pisadas que recibe cada baldosa por año, se debe calcular el periodo de vida útil en años de cada baldosa, de acuerdo a [Pavegen, 2014], las baldosas tienen una vida útil de 20'000,000 de pisadas, para obtener el periodo de vida útil de cada baldosa de acuerdo al flujo de ingreso y egreso existente en cada torniquete que componen la entrada principal a la sede calle 100 de la UMNG, se debe calcular:

$$P_{vua} = \frac{N_{pvu}}{N_{pa}} \quad (13)$$

En donde P_{vua} es el periodo de vida útil de cada baldosa en años, N_{pvu} es la vida útil de una baldosa en pasos y N_{pa} , es la cantidad de pasos que recibe cada baldosa por año de acuerdo a la solución propuesta, al realizar el cálculo obtenemos que el valor de vida útil de cada baldosa es de aproximadamente 9 años.

Se hace necesario encontrar la cantidad de pisadas que recibe el sistema de 10 baldosas que componen la solución propuesta, para esto multiplicamos el valor de pisadas que recibe cada baldosa en un año por 10 baldosas que

componen el sistema, realizando esta multiplicación encontramos como valor de pisadas totales por año académico 22'063,100. Ahora para obtener la cantidad de energía que produce cada baldosa durante su vida útil, se puede describir que la energía generada por cada pisada como lo vimos anteriormente es de 4,459 J, ahora para obtener la cantidad de energía generada por cada baldosa durante su vida útil debemos calcular:

$$E_{pvub} = 4,459 \times 22'063,100 \quad (14)$$

En donde E_{pvub} es la cantidad de energía producida por baldosa durante la vida útil de cada baldosa, el valor que se obtiene de realizar el anterior cálculo es de 9'837,936 Joules, ahora para conocer el valor de energía que produce el sistema durante el periodo de vida útil, se debe realizar:

$$E_{pvus} = 98'379,363 \times 10 \times 9 \quad (15)$$

En donde E_{pvus} , al realizar el anterior cálculo se obtiene que la energía que produce el sistema durante la vida útil del mismo la cual es de 9 años, es de 885,414,266 joules por todo el sistema durante el periodo de vida útil del mismo. Como se puede observar en la ecuación (8), para obtener la cantidad de energía que produce el sistema en KWh, la cual es la unidad en la que generalmente se mide el consumo de energía eléctrica debemos, resolver:

$$E_{kwh} = \frac{885,414,266 \text{ J}}{3'600,000} \quad (16)$$

En donde E_{kwh} es la cantidad total de energía eléctrica que produce el sistema durante su periodo de vida útil, realizando el anterior cálculo se obtiene que la energía eléctrica que produce el sistema en su periodo de vida útil es de aproximadamente 246 KWh.

III. Factibilidad Económica

Por medio de los resultados obtenidos en la sección anterior se encontró la cantidad de energía en total que produce el sistema, para hallar la factibilidad económica del sistema se debe relacionar el precio de implementar la solución

propuesta con respecto al ahorro económico obtenido en el consumo de energía eléctrica debida a la implementación de la solución propuesta.

Antes de iniciar, cabe indicar que de acuerdo a [urban times, 2012], el valor de cada baldosa pavegen es de 3850 dólares, sin contar con gastos de instalación ni impuestos, ahora al ser un proyecto de energías alternativas se pueden omitir los impuestos, y suponiendo un valor de instalación y mantenimiento para las diez baldosas de 10000 dólares, se tiene en total que el dinero necesario para implementar el proyecto es de $3850 \times 10 + 10000$, lo que genera un resultado de 38500 dólares, al multiplicarlo por la tasa representativa del dólar el día 19 de mayo de 2014 (\$1925), se encuentra que el valor de implementar la solución propuesta es de $38500 \times \$1925$, lo cual es equivalente a \$74'112,500. Ahora para calcular la factibilidad económica de la solución es necesario calcular la siguiente relación:

$$FE_{sp} = \frac{VA_{sp}}{VI_{sp}} \quad (17)$$

En donde FE_{sp} es la factibilidad económica de la solución propuesta, VA_{sp} representa el ahorro en el consumo eléctrico de la solución propuesta y VI_{sp} es el valor de implementar la solución propuesta, que como vimos en la anterior sección corresponde a \$74'112,500.

Ahora de acuerdo con [Espinosa, 2010], el valor promedio por KWh que pago la UMNG, fue de aproximadamente \$345 esto en el año 2009, al pasar este valor a valor presente mediante el IPC, obtenemos un valor actual de \$381, si mantenemos la tendencia del IPC del 2013 que se ubico en 1,94% obtenemos un valor promedio de \$420 por cada KWh de electricidad que consume la UMNG, durante el periodo de vida útil del proyecto, con este valor en cuenta podemos calcular VA_{sp} , por medio de:

$$VA_{sp} = E_{kwh} \times 420 \quad (18)$$

Como se obtuvo en la sección anterior la cantidad de energía que se obtiene durante el período de vida útil del proyecto es de 246 KWh,

ahora realizando el cálculo correspondiente obtenemos que $VA_{sp} = \$103,320$, ahora resolviendo la ecuación (17), se obtiene que la relación entre la inversión de implementar el proyecto con respecto a los ahorros producidos es de:

$$FE_{sp} = 0,0013 \quad (19)$$

El valor de FE_{sp} es muy cercano a 0, lo cual indica la *poca factibilidad económica de implementar este proyecto*.

IV. Factibilidad ambiental

Para obtener la factibilidad ambiental cabe mencionar que cerca del 80% de los materiales que componen las baldosas Pavegen, son reciclables [Pavegen, 2014] es decir que es un producto amigable con el medio ambiente.

Ahora para determinar el valor de CO_2 que se puede evitar emitir generando electricidad por medio de las baldosas Pavegen en la sede de la calle 100 de la UMNG, de acuerdo a la solución propuesta, debemos primero conocer la cantidad de CO_2 que se emite con los métodos tradicionales de generación de electricidad en el país, de acuerdo con [UPME, 2009], el factor de emisión de CO_2 por KWh que se genera en el sistema eléctrico interconectado colombiano es de 0.2849 kg de CO_2 por KWh producido. Para calcular el ahorro en emisiones de CO_2 que se obtendrían al implementar el proyecto, debemos calcular:

$$A_{E_{CO_2}} = E_{kwh} \times 0,2849 \text{ kg } CO_2 \quad (20)$$

En donde $A_{E_{CO_2}}$ representa el ahorro en emisiones de CO_2 generado por la implementación del proyecto y como se obtuvo previamente E_{kwh} es igual a 246 KWh, al realizar el cálculo correspondiente se obtiene que el ahorro en emisiones de CO_2 obtenido al implementa el proyecto es de:

$$A_{E_{CO_2}} \approx 70 \text{ kg } CO_2 \quad (21)$$

Con el ahorro en emisiones de CO_2 que se produce en el proyecto se puede decir que *el proyecto es factible desde el punto de vista ambiental, pero el alto costo de inversión requerida no se ve reflejado en una elevada factibilidad ambiental*.

IV. CONCLUSIONES

De la presente monografía de investigación se puede concluir lo siguiente:

1. Por medio de la investigación realizada se pudo evidenciar a través de un análisis estadístico que el flujo de personas que ingresan y egresan de la sede calle 100 de la UMNG es bastante elevado durante el año académico, lo cual es un determinante para poner en marcha éste tipo de proyectos.
2. Se demostró de igual forma que a pesar del elevado flujo peatonal existente en la entrada principal de la sede calle 100 de la UMNG, el proyecto de instalar baldosas Pavegen en éste lugar *no es factible, debido a la elevada inversión que se debe realizar para comprar las baldosas y la poca energía que éstas producen durante su vida útil.*
3. Se encontró que estas baldosas en efecto debido a sus materiales de elaboración y a ser una fuente limpia de generación de electricidad son factibles ambientalmente, aunque para ser un elemento influenciado en la mitigación de emisiones de CO₂, es necesario utilizar cantidades masivas de éstas baldosas en amplios corredores muy concurridos.
4. Se puede indicar que aunque en éste momento la implementación de éste tipo de proyectos no es factible, se debe estar abierto a éstas tecnologías, las cuales de acuerdo a [Bloomberg, 2013] se espera reduzcan sus precios de forma rápida, generando así un mayor poder de adquisición de cantidades altas de éstas baldosas, generando de ésta manera un mayor impacto en la mitigación de CO₂ en la generación de electricidad.

REFERENCIAS

- [Bloomberg, 2013] Bloomberg (2013). Paris marathon to harvest runners' energy with pavegen tiles. <http://www.bloomberg.com/news/2013-04-04/paris-marathon-to-harvest-runners-energy-with-pavegen-tiles.html>. Revisada en Mayo 14, 2014.
- [Construdata, 2013] Construdata (2013). Piezoelectricidad alternativa verde para alumbrado público. http://www.construdata.com/Bc/Construccion/Noticias/piezoelectricidad_alternativa_verde_para_alumbrado_publico.asp. Revisada en Mayo 14, 2014.
- [Espinosa, 2010] Espinosa, P. A. Q. (2010). Presupuesto financiero de las actividades de las fichas de manejo ambiental de los programas de recurso hídrico, energético y gestión integral de residuos sólidos para la implementación del plan institucional de gestión ambiental (piga) de la universidad militar nueva granada sede calle 100.
- [Geographic, 2012] Geographic, N. (2012). Unas baldosas generan energía con nuestras pisadas. <http://www.nationalgeographic.es/noticias/medio-ambiente/energia/baldosas-energia-pisadas>. Revisada en Mayo 14, 2014.
- [Israel, 2012] Israel, L. (2012). <http://latamisrael.com/empresa-israeli-que-genera-electricidad-de-la-nada/> Revisada en Mayo 14, 2014.
- [NILSSON and THORSTENSSON, 1989] NILSSON, J. and THORSTENSSON, A. (1989). Ground reaction forces at different speeds of human walking and running. *Acta Physiologica Scandinavica*, 136(2):217–227.
- [Pavegen, 2014] Pavegen (2014). <http://www.pavegen.com>. Revisada en Mayo 14, 2014.

[Tipler and Mosca, 2005] Tipler, P. and Mosca, G. (2005). *Física para la ciencia y la tecnología: Electricidad y magnetismo. Vol. 2A*. Física para la ciencia y la tecnología. Electricidad y magnetismo. 2A. Reverté.

[Tippens, 2003] Tippens, P. T. (2003). *Física conceptos y aplicaciones*. MC Braw Hill, 6 edition.

[UMNG, 2014] UMNG (2014). <http://www.umng.edu.co>. Revisada en Mayo 14, 2014.

[UPME, 2009] UPME (2009). Cálculo del factor de emisión de co2 del sistema eléctrico interconectado colombiano. Technical report, UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA.

[urban times, 2012] urban times (2012). <http://urbantimes.co/2012/10/footsteps-power-city-sustainably-pavegen-paving-tiles-smart/>. Revisada en Mayo 14, 2014.

[Whittle, 2007] Whittle, M. (2007). *Gait analysis: an introduction*. Butterworth Heinemann. Butterworth-Heinemann.