



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**“SIMULACIÓN DE UN SISTEMA ENERGY HARVESTING
UTILIZANDO MATERIAL PIEZOELÉCTRICO PARA LA
ESTACIÓN NORTE DE LA METROVÍA”**

INFORME DE MATERIA INTEGRADORA

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACIÓN
ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

**HUILCA PARCO IVÁN JESÚS
MAYOR FUENTES NIEL GERONIMO**

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2018

AGRADECIMIENTO

Gracias a mis seres allegados a quienes considero parte de mi familia, su apoyo prácticamente incondicional en todos los aspectos moral, político, económico, social, cognitivo, filosófico y teosófico. Fueron capaces de culminar con la realización de este su trabajo y el mío.

Huilca Parco Iván Jesús.

Gracias a mi familia que ha sido un apoyo incondicional en el transcurso de mi carrera, a mis mentores que me instruyeron con esmero y a todos los compañeros y amigos que me acompañaron en mi formación como ingeniero.

Mayor Fuentes Niel Geronimo.

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a mi familia y educadores de vida por instruirme en todas las áreas necesarias para realizar este proyecto.

Huilca Parco Iván Jesús.

El presente trabajo se lo dedico a mis padres y mentores que dieron su mejor esfuerzo para que yo pueda culminar con mi carrera profesional y de vida.

Mayor Fuentes Niel Geronimo.

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

Ing. Godoy Ortega Janeth C.

PROFESOR DE MATERIA
INTEGRADORA

Ing. Córdova Villagómez Jimmy J.

TUTOR ACADÉMICO

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente; y damos mi nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

.....
Huilca Parco Iván Jesús

.....
Mayor Fuentes Niel Geronimo

RESUMEN

El objetivo principal del presente trabajo es dar una alternativa de adquisición de energía eléctrica que produzca menos contaminantes en comparación con el tipo de energía que suministra actualmente en el Ecuador, aliviando de igual forma la demanda energética presente en la red de distribución de energía eléctrica.

Para cumplir con nuestro objetivo es necesario el uso de módulos que emplean material piezoeléctrico, estos módulos poseen la propiedad de generar energía eléctrica a partir de la energía cinética que emplean las personas al caminar, cada módulo genera una pequeña cantidad de energía, pero al agrupar una gran cantidad de estos obtenemos una cantidad de energía significativa para su posterior uso. Realizando un análisis del comportamiento de este material piezoeléctrico presente en los módulos para obtener respuestas de potencia a partir de las diferentes masas que poseen las personas que transiten por el área donde pueden instalarse estos módulos y por consiguiente deformando el material piezoeléctrico, efectuado el análisis se procede con la respectiva simulación del sistema energy harvesting mediante el software Matlab-Simulink; para la simulación del traslado de las personas por una determinada área por motivos prácticos de análisis se escogió el área circundante a la estación norte de la metrovía Río Daule, se realizó con código escrito en lenguaje de programación Matlab el cual consiste en iteraciones para simular el flujo de personas mediante la metodología FIFO.

El trabajo dio como resultado una energía de 1.1 MWh al año y se evita dispersar en el ambiente 824.6 Kg de CO₂ por año. Sin embargo, se pueden obtener mejores resultados de realizarse la simulación en un terminal de transporte masivo con mayor flujo de personas y con una mayor área, pero debido a la dispersión de datos que se pueden obtener de estos sitios la simulación se torna más compleja.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	ii
DEDICATORIA	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN.....	iv
RESUMEN	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
CAPÍTULO 1	1
1. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo General.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 Justificación	3
1.4 Alcance.....	4
CAPÍTULO 2.....	5
2. ESTADO DEL ARTE.	5
2.1 Antecedentes.....	5
2.2 Marco Teórico.....	5
2.2.1 Recolección y análisis de los datos	6
2.2.2 Modelamiento del material piezoeléctrico.....	7
2.2.3 Simulación del sistema recolector de energía	12
2.2.4 Descripción del sistema y distribución de energía.....	13
2.2.5 Estimación económica.....	13
CAPÍTULO 3.....	14
3. METODOLOGÍA DE TRABAJO.	14
3.1 Análisis de datos recolectados	14
3.2 Modelamiento del módulo recolector de energía.....	17
3.3 Simulación del sistema energy harvesting	20

3.4 Simulación del sistema FIFO del flujo de las personas	21
CAPÍTULO 4.....	23
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	23
4.1 Resultado del sistema que modela el material	23
4.2 Resultados del sistema FIFO	25
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	29
BIBLIOGRAFÍA.....	31
ANEXOS.....	34
A.1 Desarrollo de ecuaciones matriciales	34
A.2 Ecuaciones para el modelamiento del módulo recolector	35

CAPÍTULO 1

1. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.

1.1 Planteamiento del problema.

Actualmente el consumo energético a nivel mundial se incrementa debido al crecimiento de la población, para este incremento en la demanda energética se pronostica un crecimiento del 46 al 58% entre 2004 y 2030 según la IEA [1]. Como ésta demanda de energía aumenta es lógico que la generación de energía también lo haga, dado que es fundamental suministrar a todos los habitantes de energía. Los métodos que proporcionan y proporcionarán de energía provendrán en mayor parte por los derivados del petróleo, carbón y gas natural; el 80% de la energía es abastecida por combustibles fósiles, además el sector industrial representa el mayor consumo de energía utilizando más de la mitad de su totalidad hasta 2040. Los problemas ambientales que causan los desechos provenientes del sector industrial al igual que la generación de energía proveniente de combustibles fósiles, siendo el principal emisor de esta contaminación el dióxido de carbono (CO_2). Estas cantidades de CO_2 son medidas por toneladas métricas y para el 2040 se proyecta que se incrementaran a unos 45 billones de toneladas métricas, esta cantidad representa un crecimiento del 46% de niveles de CO_2 emitidos a la atmosfera comparado con las cifras de 2010 [2].

En el Ecuador la generación de energía eléctrica proviene en mayor parte de las centrales hidroeléctricas [3], donde para disponer de estas centrales se debe disponer de su elemento o materia prima en este caso el caudal de un río. Adicionalmente, estos ríos se encuentran en lugares muy alejados de las grandes metrópolis donde existe la mayor demanda y consumo de energía eléctrica, en consecuencia, es necesario primero construir vías de acceso que permita el transporte de equipos y personal a estas áreas remotas, cuando lo anterior mencionado este efectuado sucesivamente se debe preparar la zona donde se encuentre el cauce del río para construir la central de generación hidroeléctrica.

Finalmente, se instala la red de transporte de esta energía, la cual provee de energía eléctrica a las diferentes ciudades del país.

Pese a que las centrales hidroeléctricas no producen contaminantes, la generación de energía hidroeléctrica afecta el ecosistema circundante distorsionando el flujo de agua que antes existía, en el peor de los casos conlleva a la degradación del material biológico del ecosistema que se proveía de esta agua. El material biológico en descomposición genera metano, este metano se encuentra en menores cantidades en comparación con el CO₂, pero es aproximadamente 20 veces más potente que el CO₂, existen equivalencias de metano por toneladas métricas de CO₂ en el Ecuador [4] y estas cifras muestran un crecimiento en la generación de metano en la atmosfera donde parte de este metano es causado por las centrales hidroeléctricas. Por consiguiente, en el Ecuador existen cálculos para determinar la cantidad de CO₂ que se emite a la atmosfera, debido a la generación de megavatios-hora (MWh) [5] y consideran a las centrales hidroeléctricas dentro de estos cálculos de emisiones de CO₂; por lo tanto, las centrales hidroeléctricas también emiten cantidades de CO₂ por cada MWh que generan.

Es un inconveniente para el medio ambiente y la salud de las personas en general que existan emisiones de CO₂, existen varios métodos alternativos de obtención de energía, pero estas alternativas implican proyectos que requieren grandes inversiones por parte del sector público y privado; muchos de estos proyectos no generan ingresos a los inversionistas por ende el tope de avance que alcanzan estos proyectos son pilotos. La rentabilidad de estos proyectos principalmente se debe a los precios de la energía que rigen a un país, en el caso del Ecuador los bajos costos que tiene la energía eléctrica [6] y el barril del petróleo [7] finaliza en el uso de los recursos o materia prima más accesible en términos monetarios. A causa de todos estos inconvenientes se requiere desarrollar proyectos de investigación que busquen más alternativas ante la problemática previamente expuesta.

1.1 Objetivos.

1.2.1 Objetivo General.

Realizar una simulación que permita determinar la generación de energía eléctrica mediante la pisada de las personas en un lugar concurrido por medio de la deformación de material piezoeléctrico actuando como recolectores de energía.

1.2.1 Objetivo General.

- Establecer y detallar las partes que compondrán la simulación utilizando el software de Matlab.
- Estudiar y comparar los resultados existentes de material piezoeléctrico que se usa para sistemas energy harvesting de esta manera se obtendrá resultados lo más cercanos a un sistema real.
- Considerar los distintos parámetros y metodologías que intervienen en el desarrollo de la simulación logrando equivalencias en distintas áreas como la cantidad de emisiones de CO₂ ahorradas de estar implementado un sistema recolector de energía de este tipo.

1.2 Justificación.

Los métodos actuales de generación de energía que predominan emanan contaminantes como CO₂ y Ecuador no está absuelto de producir CO₂, por este motivo es necesario varios sistemas que mitiguen todas estas emisiones, empezando con la energía que producimos para el uso de nuestras actividades cotidianas y la fabricación de artículos que satisfacen nuestras necesidades como personas; concluyendo en los desperdicios ocasionados por la generación de energía y desechos de productos que se consideren obsoletos o inservibles. Sin embargo, enfocarse en todos los inconvenientes que producen emisiones de CO₂ puede resultar una tarea colosal, de tal forma que se debe tener un orden a la hora de solucionar estos inconvenientes, iniciando en la generación de energías renovables no convencionales (ERNC) [8]. Las ERNC se diferencian por usar recursos que a escala global no se agota como por ejemplo la energía solar que usa la radiación solar o la energía eólica que utiliza la fuerza del viento; de igual

modo debido a la problemática de la contaminación ambiental científicos realizan de manera constante investigaciones de nuevas formas de obtener energía renovable como es el caso de recolectores de energía utilizando material piezoeléctrico. Siendo su principal fuente de energía la deformación mecánica la cual puede ser provocada por la fuerza del viento o sonido, vehículos o medios de transporte e incluso un flujo de transeúntes en sitios como terminales de transporte masivo.

El Ecuador promueve el uso de nuevas tecnologías que sean responsables con el medio ambiente como es el caso de las cocinas de inducción y vehículos eléctricos [9], los cuales reemplazan el uso de combustibles fósiles por el de energía eléctrica que proviene de centrales hidroeléctricas que cabe destacar que emanan cantidades de CO₂ en menor proporción que usar combustibles fósiles. Sin embargo, el objetivo es lograr reducir de forma constante la contaminación producida por estos métodos de obtención de energía utilizando nuevas alternativas. Se mencionó anteriormente los recolectores de energía utilizando material piezoeléctrico colocados en una terminal de transporte masivo puede aprovechar la energía de la deformación mecánica debido a la pisada de las personas. Además de presentar algunas ventajas como es el de su instalación de forma directa; al encontrarnos en una metrópolis la preparación de la zona para recolectar energía solo necesita ser readecuada y no ser construida desde cero.

1.3 Alcance.

El alcance abarca la recolección de datos necesarios para estimar el flujo de transeúntes que circulan desde el paso peatonal que conecta el terminal terrestre con el terminal río Daule de la metrópolis, se usará la técnica de observación como metodología a seguir, continuando con el análisis del material piezoeléctrico que se emplea en los recolectores de energía, luego se procede con las respectivas simulaciones de los recolectores piezoeléctricos así como del flujo de personas utilizando la metodología First Input First Output (FIFO) en el software Matlab. Finalmente, la descripción del sistema total, energía producida, costos e ingresos básicos que intervienen en este sistema de generación de energía.

CAPÍTULO 2

2. ESTADO DEL ARTE.

2.1 Antecedentes.

Desde el descubrimiento de materiales que poseen características piezoeléctricas realizado por los hermanos Curie en el lapso de 1880, donde se realizaron experimentos acerca de la compresión de minerales compuestos de silicatos; algunos de estos minerales al ser sometidos a una compresión mecánica provocan que su masa adquiera una polarización eléctrica, resultando en una diferencia de potencial en la superficie del material [10]. Actualmente otros países ya emplean recolectores de energía en base del principio de la piezoelectricidad impulsando el uso de nuevas alternativas para las energías renovables; en Westfield Stratford City centro comercial ubicado en Londres existe un sistema que usa la energía cinética proveniente de las pisadas de transeúntes para producir energía eléctrica, en consecuencia, se consigue energía de aproximadamente 40 millones de peatones que circulan por esta área y produciendo energía para encender la mitad de la iluminación del centro comercial. También en Langton Grammar School situado en Londres se implementó un tipo de baldosas que aprovecha el efecto de la piezoelectricidad, además de generar energía resulta que estas baldosas despertaron la curiosidad de los jóvenes que asisten a este centro educativo [11].

En la región de habla hispana en la ciudad de Río de Janeiro una compañía británica construyó una cancha de fútbol para transformar la energía cinética de los jugadores en energía eléctrica, mediante unos módulos tipo baldosa que luego son recubiertos con césped sintético. Adicionalmente se cuenta con un sistema de almacenamiento de esta energía mediante bancos de baterías para alimentar a seis luces led, los cuales iluminan la cancha durante las noches [12].

2.2 Marco Teórico.

Llegados a esta sección se procederá a describir la planificación de este proyecto, cabe indicar que al ser un trabajo investigativo el cual abarca muchas temáticas se debe dividir en secciones a este gran sistema es decir sistemas más pequeños

para facilidad de análisis. A continuación, se muestra el diagrama de flujo del proyecto de manera resumida, adicionalmente serán los pasos a seguir en la elaboración de la simulación de un sistema energy harvesting utilizando material piezoeléctrico para la estación norte de la metrovía.

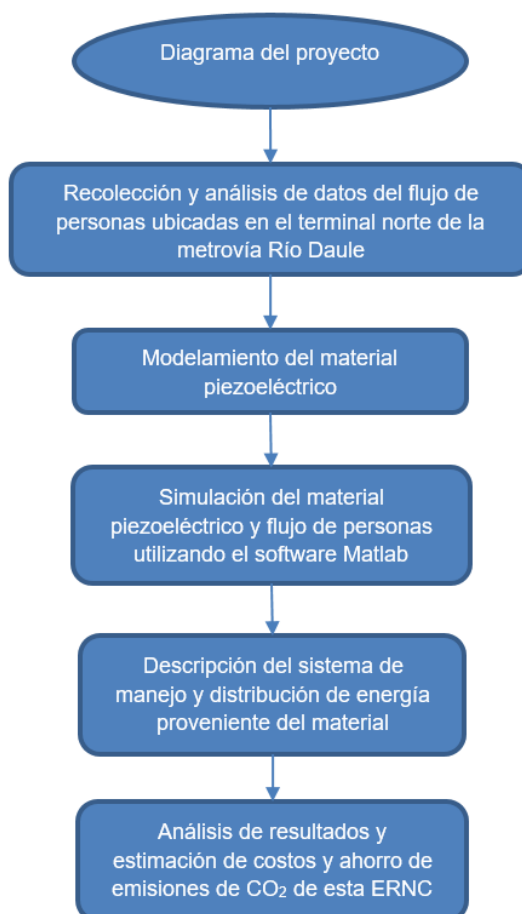


Figura 2.1: Diagrama de flujo del proyecto.

Como se puede apreciar en la figura 2.1 básicamente se segmentó el proyecto en 5 etapas, las cuales conforman recolección de datos, modelamiento del sistema recolector de energía, simulación, descripción y análisis de resultados al igual que unas estimaciones económicas básicas.

2.2.1 Recolección y análisis de los datos.

Para recolectar los datos es indispensable optar por una técnica o metodología a seguir, acompañado del respectivo tratamiento de los

mismos para tener una estimación correcta del flujo de personas que circula por un área determinada en el terminal de la metrovía.

Se conoce como observación a la técnica de recolección de datos que consiste en registrar las características de un grupo de elementos y dependiendo de la forma de la muestra es posible hacer o no contacto con el grupo observado, en este caso se emplea la metodología de observación no participativa en el cual el observador permanece alejado de la situación la cual está observándose, teniendo como fin medir de forma probabilística el flujo de personas [13].

Para el análisis de los datos recolectados se aproximará los datos del flujo de personas con la metodología FIFO, también conocido como Primeras en Entrar Primeras en Salir (PEPS) por su traducción al castellano; entonces, el método FIFO es un método probabilístico en el cual determinara que persona ingresara o no al sistema en un determinado tiempo [14]. También debemos especificar el peso de la persona y para esto se usarán tablas donde establecen el peso promedio de las personas en el Ecuador de acuerdo a la edad. Finalmente, los parámetros y condiciones que regirán la simulación serán detallados en el capítulo 3.

2.2.2 Modelamiento del material piezoeléctrico.

Las ecuaciones que describen el comportamiento del material piezoeléctrico son tratados en esta sección.

$$\begin{cases} S_i = s_{ij}^E T_j + d_{mi}^t E_m \\ D_m = d_{mi} T_i + \varepsilon_{ik}^T E_k \end{cases} \quad (2.1)$$

S_i : Vector de esfuerzos.

T_j : Vector de deformación.

E_m : Vector de campo eléctrico.

D_m : Vector de desplazamiento eléctrico.

s_{ij}^E : Matriz de elasticidad (Componentes evaluadas con campo eléctrico constante E).

d_{mi} : Matriz de coeficientes piezoeléctricos.

d_{mi}^t : Matriz de coeficientes piezoeléctricos transpuesta.

ε_{ik}^T : Matriz de constantes dieléctricas (Componentes evaluadas con deformaciones constantes T).

Las ecuaciones 2.1 que describen el comportamiento de un material piezoeléctrico son esencialmente dos, la primera describe el comportamiento de la deformación del material en función de la tensión mecánica y el campo eléctrico existente, la segunda expone la cantidad de flujo eléctrico existente en el área transversal del material que depende de la tensión mecánica ejercida sobre el material y el campo eléctrico [15].

Observando un material el cual posee características piezoeléctricas el cual se representa en la figura 2.2, además de tener sus ejes de referencias establecidos se puede obtener expresiones que describen este comportamiento en función de todos sus ejes como se muestra en la ecuación 2.2 de forma matricial.

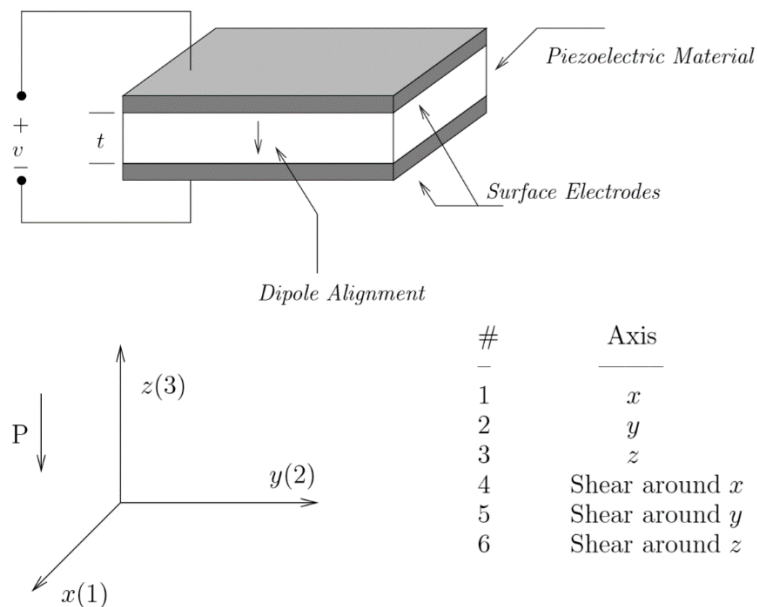


Figura 2.2: Material que posee características piezoeléctricas.

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ d_{16} & d_{26} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{11}^\sigma & e_{12}^\sigma & e_{13}^\sigma \\ e_{21}^\sigma & e_{22}^\sigma & e_{23}^\sigma \\ e_{31}^\sigma & e_{32}^\sigma & e_{33}^\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Asumiendo que el dispositivo es polarizado a lo largo del eje 3, además de conocer que el material piezoeléctrico posee también características isotrópicas muchos de los parámetros son cero o pueden ser expresados en función a otros parámetros desarrollados en la parte de anexos en A.1. Dando como resultado las ecuaciones descritas en 2.3 [16].

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(s_{11} - s_{12}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{11}^\sigma & 0 & 0 \\ 0 & e_{11}^\sigma & 0 \\ 0 & 0 & e_{33}^\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Es necesario conocer estas ecuaciones fundamentales para el desarrollo del modelo que será propuesto, también cabe destacar que se usarán circuitos equivalentes que representen las variables como un circuito eléctrico, adicionalmente analizar desde el dominio del tiempo y de la frecuencia distintos aspectos de este material. En la figura 2.3 se puede apreciar el circuito equivalente de un material piezoeléctrico que según la figura 2.4 está trabajando en la zona donde la relación V_0/F Vs f es constante y esto se debe a que básicamente existe una relación casi directa entre la relación de voltaje que se genera por la fuerza aplicada al material, esta zona es apta para sensores de tipo piezoeléctrico. Sin embargo en la figura 2.4 se observa también una zona que para ciertos valores de frecuencia f_0 se tendrá una mayor cantidad de voltaje para la fuerza

aplicada en este material, esta zona se denomina como resonante y es la más idónea para que el material piezoeléctrico opere como un recolector de energía; la razón es elemental ya que el factor de calidad que es la relación entre la energía reactiva que se almacena y la energía que se disipa durante un periodo de una señal es elevada, que se traduce en pérdidas bajas en relación a la energía que es almacenada [17]; cabe destacar que no se usará el circuito equivalente de un sensor piezoeléctrico, sin embargo fue de ayuda para comprender cuales deben de ser los modos de trabajo de un material piezoeléctrico para que pueda operar como un recolector de energía.

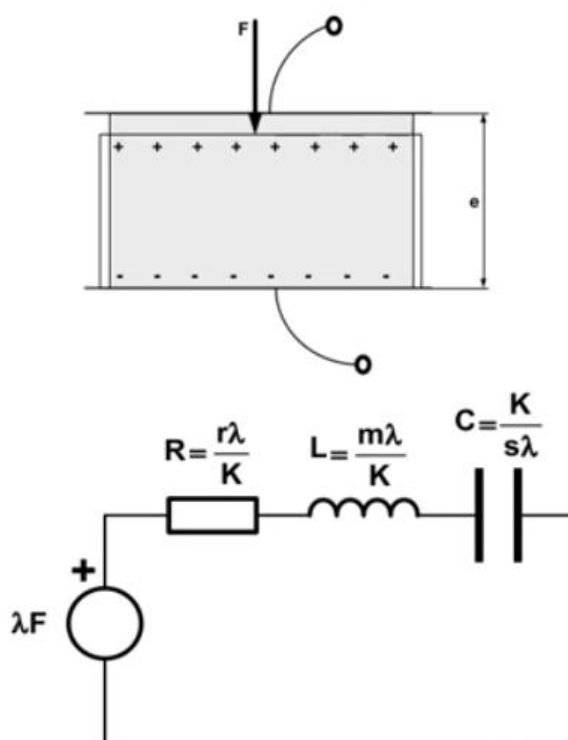


Figura 2.3: Circuito equivalente de un sensor piezoeléctrico.



Figura 2.4: Diagrama de Bode perteneciente a la figura 2.1.

Por último, cabe destacar el comportamiento mecánico que poseen los módulos recolectores de energía, en el sistema mecánico intervienen la masa responsable de la deformación, una viga en voladizo y el material piezoeléctrico el cual será sometido a deformación. Además, por lo observado en la figura 2.5 se puede modelar este comportamiento mecánico como un oscilador armónico figura 2.6 y esto se debe a que el material piezoeléctrico para recolectores de energía opera en la zona de resonancia como se mencionó previamente. El modelo mecánico del módulo recolector representado en la figura 2.6 dispone de una masa, un resorte, un amortiguador y un transductor siendo este último el material piezoeléctrico. Se establece un sumatorio total de las fuerzas que intervienen en este sistema como se muestra en la ecuación 2.4.

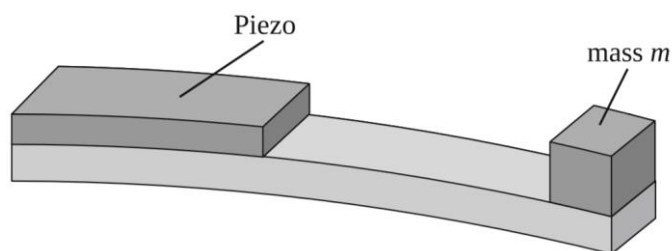


Figura 2.5: Comportamiento mecánico del módulo recolector.

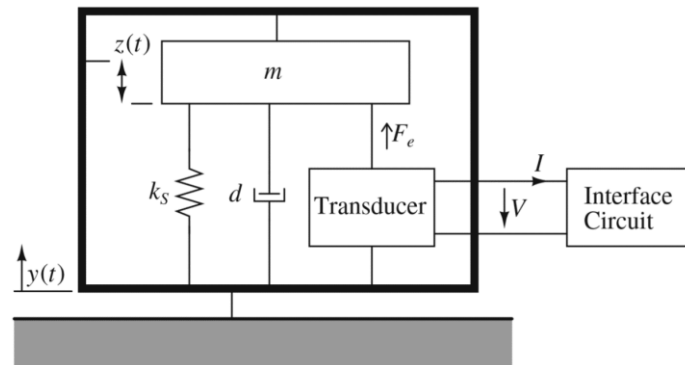


Figura 2.6: Modelo mecánico del módulo recolector.

$$ma = m\ddot{z} + d\dot{z} + k_s z + F_e \quad (2.4)$$

Donde la masa m que provoca la deformación se asume que no se ve afectada por el amortiguador, por ende, puede proporcionar teóricamente potencia de manera continua infinita; la constante d representa el amortiguador del sistema y también considera la fricción, resistencia del aire y otras pérdidas de energía. La rigidez del sistema denotado por k_s y la fuerza restauradora F_e que debido a estar en contra a la fuerza ejercida por la masa puede ser considerada como una fuente de amortiguación [18].

2.2.3 Simulación del sistema recolector de energía.

El módulo recolector de energía que utiliza material piezoeléctrico será simulado mediante la herramienta de Matlab-Simulink, durante las simulaciones será necesario tener valores concretos de parámetros pertenecientes a los módulos recolectores. Para la primera parte de la simulación se utilizará parámetros que se obtuvieron en laboratorio, estos pertenecen a módulos recolectores reales de sistemas energy harvesting que usan material piezoeléctrico [19]. También, debemos establecer el peso que poseen las personas las cuales se encargaran de pisar los módulos recolectores de energía, para esto usaremos las estadísticas del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) [20], pero estas estadísticas datan del año 2007 por ende se usará un porcentaje que usa la Organización Mundial de la salud acerca del sobrepeso en la población [21].

2.2.4 Descripción del sistema de manejo y distribución de energía.

La energía que entregan los recolectores tiene una naturaleza de tipo alterna, estas señales procederán a ser rectificadas, luego pasaran a un filtro LC que son básicamente una bobina y un condensador cuya función es filtrar la alta frecuencia de la tensión por encima de la frecuencia de resonancia y entrega a su salida una señal de voltaje con una pequeña distorsión armónica con un rizado de tensión entre 5 y 10%, seguido de un convertidor tipo boost el cual se encarga de elevar el voltaje a niveles estándares que utilizan los inversores, los cuales transforman esta corriente continua a corriente alterna, con esto a la salida ira conectado directamente a la red para su posterior uso [22].

2.2.5 Estimación económica.

La energía que produciría este sistema debe ser cuantificada para que se determine de manera monetaria cuanto puede llegar a costar, adicionalmente al tratarse de una ERNC es de esperarse que cantidades de CO₂ no sean emitidas a la atmosfera, este ahorro en las emisiones de CO₂ posee una remuneración económica, dicha remuneración es cambiante y depende del mercado quien es el encargado de estipular estos precios [23]. La producción anual de la energía determinará la remuneración anual a presentarse y el precio será establecido por el pliego tarifario [6], de igual forma solo se estipulará en la inversión inicial el costo de los equipos, determinando la cantidad de años que se podrá recuperar la inversión inicial. Cabe destacar que el proyecto posee una magnitud considerable y es circundante a la zona del terminal de la metrovía por ende se considerará que la fundación metrovía será la encargada de adquirir los equipos para su posterior instalación, adicionalmente se analizará su factibilidad para el uso de las instalaciones de la metrovía.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA DE TRABAJO.

Para esta sección se analizarán los datos recolectados en el área especificada en la sección 3.1 que es próxima a la terminal norte de la metrovía, el modelo que representa a los módulos recolectores de energía y el flujo de personas con las debidas estimaciones, parámetros y la simulación de los sistemas previamente mencionados.

3.1 Análisis de datos recolectados.

Debido a que los datos del flujo de peatones siguen un patrón discreto se procederá a tomar ciertos criterios que serán utilizados para la simulación del sistema energy harvesting utilizando material piezoeléctrico. Los cuáles serán la cantidad de personas, el área donde circulan y ciertos factores o condiciones que intervienen en la simulación de este sistema. Uno de estos factores representa el área efectiva donde los peatones coinciden sus pisadas con los módulos de recolección que utiliza el material piezoeléctrico, este factor representa también la cantidad de módulos que pueden ser deformados por un peatón alrededor del área donde se encuentren presente los módulos recolectores. Otro de los factores a considerar es la cantidad porcentual de personas que ingresan o salen del terminal norte de la metrovía, debido a que el número de personas que ingresan al establecimiento de la metrovía no es el mismo número con el cual salen las personas de dicho establecimiento.

Con la finalidad de estimar el tiempo en el que una persona se demora en dar una pisada se considera la velocidad promedio con la cual camina una persona, que es de aproximadamente 120 pasos por minuto cuya distancia entre paso y paso es de 33 cm [24]. Por ende, una persona en promedio se demora 0.5 segundos en cada pisada y será el tiempo al cual el material piezoeléctrico estará sometido a una deformación mecánica.

Es de conocimiento público el horario hábil, en el cual la metrovía brinda atención a sus usuarios, el cual va desde las 05:00 am hasta las 23:00 pm de lunes a sábado y de 06:00 am a 22:00 pm domingos y feriados [25]; conociendo esta

información se puede afirmar que existen un total de 18 horas hábiles de lunes a sábado y de 16 horas hábiles para domingos y feriados. Dentro de estos días lunes a sábado se lo clasifico como “día laboral”, además domingos y feriados pertenece a la clasificación de “fin de semana o feriado”; correspondientes a esta clasificación de días se escogieron tres horarios que fueron la mañana, el mediodía y el anochecer. Todas estas particiones de tiempo se deben a que el flujo de personas de manera cualitativa se puede clasificar en dos tipos un flujo aprovechable y un flujo regular, donde el flujo aprovechable provee una cantidad de energía mayor que un flujo regular.



Figura 3.1: Zona donde se realizó la toma de datos.

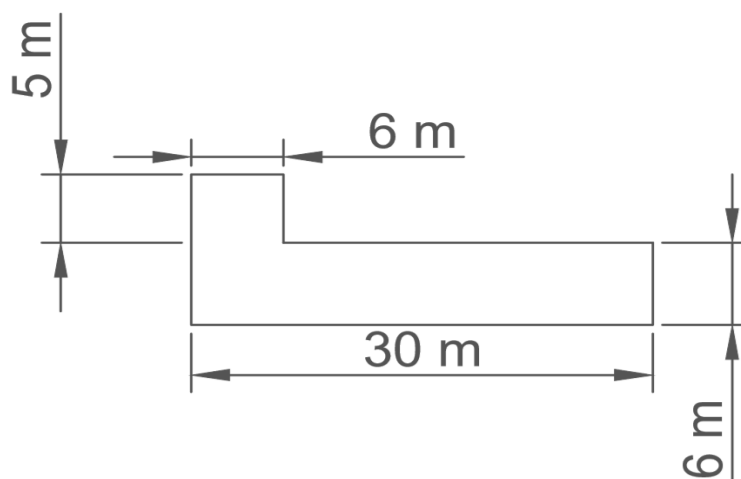


Figura 3.2: Área que va desde el paso desnivel hasta la entrada de la metrovía.

Se observa en la figura 3.1 el área donde se realizó la adquisición de los datos de las personas mediante el método de observación no participativo, la zona por donde existe un flujo de personas se puede establecer en un tramo cuyas dimensiones son de 35 metros de largo por 6 metros de ancho que abarca el área desde la salida del paso desnivel hasta la entrada del establecimiento según la figura 3.2, la toma de datos en esta zona resulta más accesible para realizar las mediciones debido al traslado que presentan los peatones, además ellos solo poseen dos opciones o entrar al establecimiento de la metrovía o salir del establecimiento.

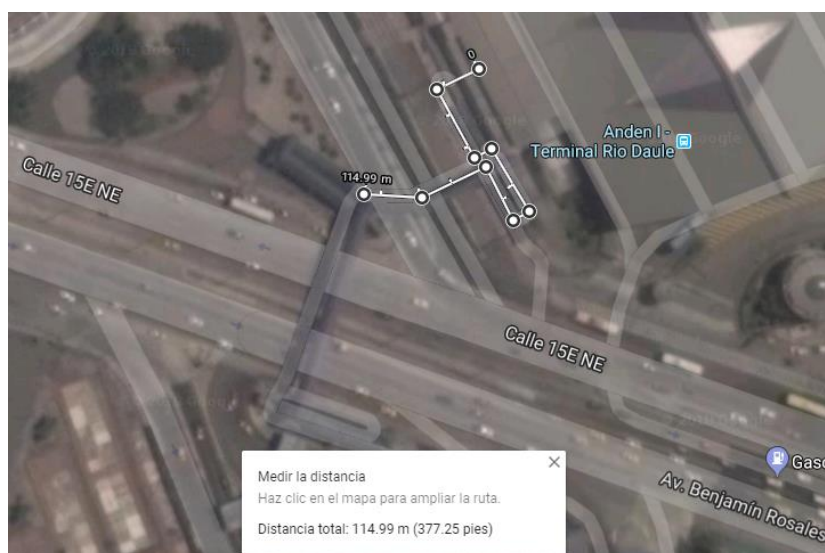


Figura 3.3: Captura de Google Maps donde se aprecia el trayecto de los peatones.

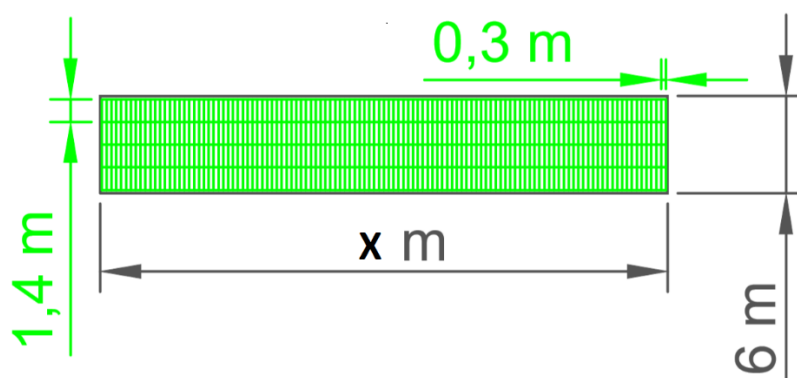


Figura 3.4: Área maximizada con los módulos superpuestos.

Adicionalmente, el área o zona observada en la figura 3.2 puede ser amplificada tomando en cuenta que los transeúntes que circulan por esta área también transitan por el paso desnivel que conecta con el terminal terrestre que se encuentra anexo a este paso como se contempla en la figura 3.3, con la finalidad de maximizar la cantidad de módulos que pueden ser instalados para obtener una mayor captación de la energía de estas personas que caminan todo este trayecto. Los módulos representados de color verde como se aprecia en la figura 3.4 poseen unas dimensiones de 1.4 metros de ancho y una longitud de 0.3 metros [19], estos módulos que pueden ser instalados a lo largo del trayecto descrito en la figura 3.3 y representados en la figura 3.4 su cantidad numérica puede ser calculada dividiendo la variable “ x ” (que representa el largo del trayecto) para el tamaño perteneciente a un módulo que previamente se menciona es de 0.3 metros.

3.2 Modelamiento del módulo recolector de energía.

En el capítulo dos, se ha indicado que el material piezoeléctrico transforma la energía mecánica de su deformación en energía eléctrica, siguiendo un conjunto de ecuaciones que describen su comportamiento. Cabe destacar que el material piezoeléctrico que se utiliza para sistemas de recolección de energía trabaja a frecuencias de resonancia debido a que en esa zona se puede tener un alto factor de calidad o selectividad “ Q ”. Por lo tanto, este sistema masa, resorte y amortiguador será un oscilador armónico, donde el movimiento describirá oscilaciones sinusoidales. Por lo tanto, las variables que intervienen en el movimiento como se aprecia en la figura 2.6 serán:

$$y(t) = y_p \sin(\omega t) \quad (3.1)$$

$$a(t) = \ddot{y}(t) = -\omega^2 y_p \sin(\omega t) = a_p \sin(\omega t) \quad (3.2)$$

$$z(t) = z_p \sin(\omega t + \varphi) \quad (3.3)$$

Donde y_p indica la amplitud del movimiento del marco de referencia, z_p la amplitud del movimiento relativo de la masa con respecto a la referencia. Además, ω se define como la velocidad angular de la frecuencia a la que está

oscilando el sistema y φ es el desfase que posee el movimiento del marco de referencia con respecto a la masa.

Las ecuaciones 2.1 y 2.2 que describen el fenómeno piezoeléctrico de manera global detallan la deformación del material en los ejes 3, 2 y 1 según la figura 2.2, además los momentos de torsión alrededor de dichos ejes. No obstante, se simplificará estas ecuaciones debido a la disposición de unos electrodos que poseerá este material como se observa en la figura 3.5, además la deformación del material será en un solo eje de acción, se puede usar las ecuaciones que describen el comportamiento piezoeléctrico únicamente en los ejes en los que están actuando estas variables. Por lo tanto, las ecuaciones que describen el comportamiento piezoeléctrico se resumirían en:

$$\begin{cases} S_1 = s_{11}^E T_1 + d^{31} E_3 \\ D_3 = d^{31} T_1 + \epsilon_{33}^T E_3 \end{cases} \quad (3.4)$$

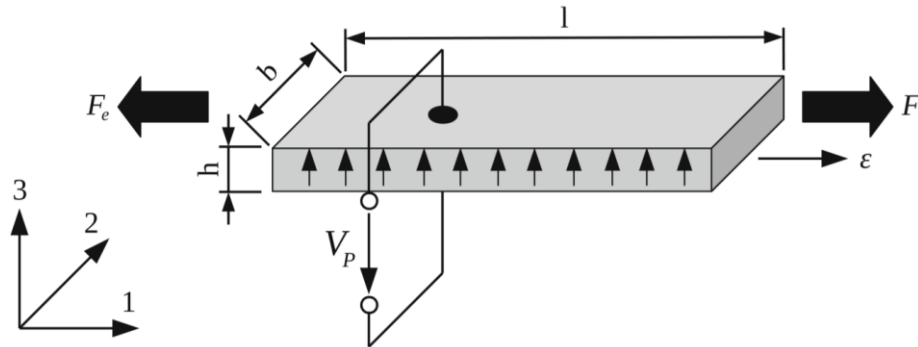


Figura 3.5: Material piezoeléctrico que se utilizará en el módulo recolector.

De la figura 3.5 se puede establecer las siguientes ecuaciones:

$$E = -\frac{V_p}{h} \quad q = Dbl \quad T = \frac{F}{bh} \quad S = \frac{\epsilon}{l} \quad I = \frac{\partial q}{\partial t} \quad (3.5)$$

Con estas expresiones se puede combinar con las ecuaciones 3.4, resultando en:

$$\begin{cases} F = k_p \varepsilon + n V_p \\ I = n \dot{\varepsilon} - C_p V_p \end{cases} \quad (3.6)$$

Donde:

$$k_p = \frac{bh}{l s_{11}^E} \quad C_p = \left(\varepsilon_{33}^T - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E} \right) \quad n = \frac{d_{31} b}{s_{11}^E} \quad (3.7)$$

Son constantes que representan las características del material piezoeléctrico, k_p representa la rigidez del material piezoeléctrico, C_p la capacitancia piezoeléctrica de salida y n el acoplamiento electromecánico del material. En el capítulo 2 se estableció el modelo mecánico equivalente del material piezoeléctrico donde posee dos variaciones en el eje z donde la masa m ejerce presión y la deformación ε a la que está sometido, además este material dispone de unas dimensiones de $l = 40 \text{ mm}$, $b = 6 \text{ mm}$ y $h = 0.2 \text{ mm}$, entonces debido a las dimensiones del material y a su rigidez las variaciones de z con respecto a la deformación ε son muy próximas se puede reemplazar la variante ε por z . También se puede reemplazar la fuerza F por la fuerza restauradora F_e , con estas dos consideraciones las ecuaciones 3.7 cambian a:

$$\begin{cases} F_e = k_p z + n V_p \\ I = n \dot{z} - C_p V_p \end{cases} \quad (3.8)$$

Por último, la fuerza restauradora que se encuentra descrita en la ecuación 2.4 del capítulo 2 es reemplazada por la fuerza de amortiguación F_e expuesta en la ecuación 3.8 consiguiendo:

$$ma = m\ddot{z} + d \dot{z} + kz + n V_p \quad (3.9)$$

Donde $k = k_s + k_p$ que denota la rigidez del material piezoeléctrico sumado la rigidez mecánica del sistema en consecuencia k es la rigidez del módulo recolector de energía. Juntado con la segunda ecuación en 3.8 con la ecuación en 3.9 se consigue:

$$\begin{cases} ma = m\ddot{z} + d \dot{z} + kz + n V_p \\ I = n \dot{z} - C_p V_p \end{cases} \quad (3.10)$$

Llegados a este punto las ecuaciones descritas en 3.10 posee como variable de entrada m la masa de la persona y como variables de salida V_p el voltaje en los electrodos del material y la corriente I que circula a través de estos electrodos, destacando que el desarrollo algebraico para llegar a las ecuaciones 3.10 se encuentran en la sección de anexos A.2.

3.3 Simulación del sistema energy harvesting.

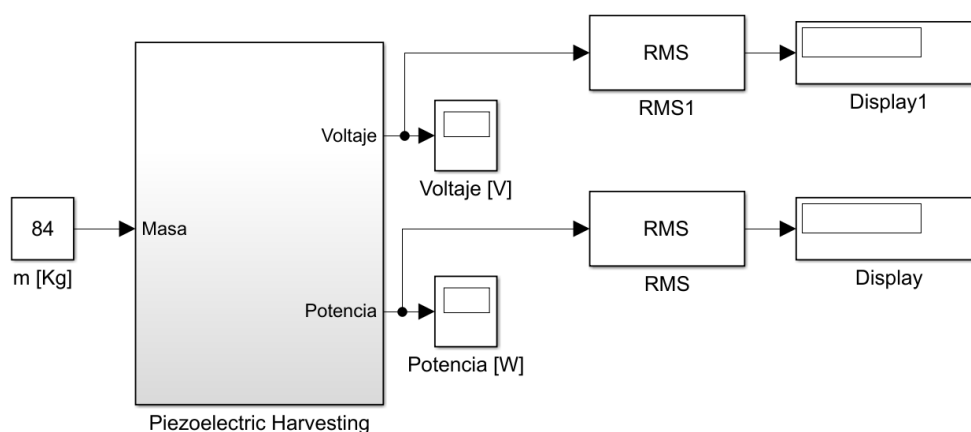


Figura 3.6: Sistema energy harvesting utilizando material piezoeléctrico.

La simulación del material piezoeléctrico se realizó en el software de Matlab-Simulink mediante la programación gráfica, la figura 3.6 muestra el módulo recolector de energía utilizando material piezoeléctrico. Se puede observar que la entrada es la masa de las personas y las salidas son la señal de potencia y voltaje, además se establece que el tiempo en el que dura la simulación será de 0.5 segundos tiempo en el que una persona se demora en dar una pisada. Dentro del bloque de piezoelectric harvesting se observa un conjunto de subsistemas los cuales conforman el modelo del módulo recolector de energía, se dará una descripción de cada uno de los bloques que conforman este subsistema. El subsistema de excitación mecánica genera el movimiento del marco de referencia y el movimiento relativo de la masa de la persona con respecto al margen de referencia. En el bloque de pérdidas se representan todas las disminuciones de energía causadas por la viscosidad del aire, fricción, entre otras. El factor de acoplamiento electromecánico n encargado de transformar la energía mecánica en eléctrica (o viceversa depende si el material trabaja en modo directo o inverso)

es calculado mediante los parámetros S_{11} , b y d_{31} . La capacitancia piezoeléctrica de salida es evaluada con los parámetros de S_{11} , E_{33} , d_{31} , b , l y n . Un subsistema que representa la rigidez con la cual responde el módulo recolector, todos estos bloques anteriormente mencionados son tratados de manera matemática usando el modelo descrito en las ecuaciones (3.10) y de esta forma las únicas interrogantes son la masa y la señal de voltaje y corriente por ende realizando una manipulación algebraica se puede obtener una entrada de masa y una salida de voltaje con su respectiva señal de potencia. Adicionalmente, la descripción de estos bloques, los parámetros E_{33} , d_{31} , S_{11} , l , h , y b son proporcionados en pruebas realizadas en laboratorio que usan módulos recolectores de energía mediante material piezoeléctrico. Finalmente, la masa la cual deformará el material piezoeléctrico se tomará datos pertenecientes a las estadísticas del INEC, la cual clasifica el peso de una persona promedio por edades.

3.4 Simulación del sistema FIFO del flujo de las personas.

El sistema FIFO se ha elegido para simular el paso de las personas por una determinada área ya que representa de forma fiable el comportamiento real de este flujo, debido al comportamiento discreto que siguen los datos. La primera persona en entrar debe ser la primera en salir del sistema, lo cual sucederá en la simulación donde se trata de estimar que este flujo sigue un orden establecido en la vida real, es una aproximación apropiada ya que un grupo de transeúntes se trasladan por un camino de manera uniforme del punto A hacia el punto B, pero a pesar de todo existen variaciones mínimas que pueden ser consideradas pequeñas perturbaciones de energía no aprovechada. El sistema FIFO será simulado mediante Matlab separando a las potencias obtenidas en dos grupos, los que ingresan al terminal Río Daule y los que salen de esta terminal, por lo que para cada una de estas se generan una cantidad considerable iteraciones representados por la variable "numpa".

Esta variable "numpa" es crucial para la simulación porque expresa la cantidad de veces que una persona podría caminar por el área en una hora tomando en consideración que una persona camina a razón de 0.5 segundos por pisada y la

distancia que recorre en esos 0.5 segundos es de 33 cm o de 0.33 metros. Previamente se mencionó la dimensión de los módulos y la manera en cómo se puede calcular el número total de módulos, si a la variable “x” observada en la figura 3.4 se asigna un valor de 100 metros se puede dividir para el tamaño correspondiente a un módulo 0.3 metros, lo que resulta en un valor de 333.33 concluyendo en 333 módulos, pero para el ingreso de las personas se estima un flujo organizado por parte de los transeúntes ocupando solo dos columnas apreciadas en la figura 3.4 del mismo modo para el retorno de los transeúntes les corresponden 2 columnas, por lo tanto el número total de módulos alcanza la cifra de 1332 módulos a aprovechar en el área destinada para la recolección de energía.

Otro de los factores a considerar en la simulación del flujo de personas es la velocidad con que cada elemento en este caso los transeúntes entran en el sistema FIFO, es decir cuánto se demora en ingresar un nuevo elemento al sistema; para esto se obtuvo de los datos la cantidad de transeúntes que pasan en el transcurso de 10 minutos y llevados a una cantidad de tiempo por minuto por manejo de unidades, pero se debe tener presente una circunstancia crucial que se estimó previamente y es el tiempo que se demora un peatón en pisar un módulo recolector, por ende la velocidad máxima que un transeúnte se demora un transeúnte en incorporarse al sistema FIFO es de 120 personas por minuto”.

Por cada iteración se produce una cantidad de potencia provista por el grupo de módulos existentes en el área de recolección, esta potencia al tener un tiempo de duración y realizando una gráfica de potencia en función del tiempo el área bajo la curva representa la energía obtenida durante el tiempo de la simulación. Para la obtención del área bajo esta curva se puede usar una función de Matlab llamada “trapz” la cual utiliza el método de los trapecios para aproximar dicha área, pero si se toma en cuenta lo antes dicho se puede multiplicar la potencia por medio segundo lo cual da una pequeña área la cual al sumarse con las demás es decir las otras 7199 da como resultado la energía total donde los 7200 datos obtenidos de la simulación corresponden al tiempo en el que una persona se demora en pisar que es 0.5 segundos para el tiempo total de la simulación que es una hora o 3600 segundos.

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

4.1 Resultados del Sistema que modela el material.

Los resultados pertenecientes a la simulación del módulo recolector de energía que utiliza material piezoeléctrico se muestra en la tabla 4.1, según esta tabla existen tres tipos de personas que son parte de las estimaciones para el sistema FIFO un niño/a que va con edades aproximadas desde los 12 años hasta los 15, un joven el cual va de edades desde 16 hasta los 22 años y una persona adulta desde los 23 años hasta los 60 años, se seleccionaron estas edades porque a partir de aquí es donde las personas se comienzan a movilizar en transporte público.

Edades [años]	Masa de las personas [Kg]	Potencia [mW]
12-15	38.25	0.4041
16-22	53.35	0.9223
23-60	80	2.0690

Tabla 4.1: Peso promedio de los tres tipos de personas.

Para obtener esos valores de potencia se procedió con la simulación del módulo recolector utilizando material piezoeléctrico en Matlab-Simulink.

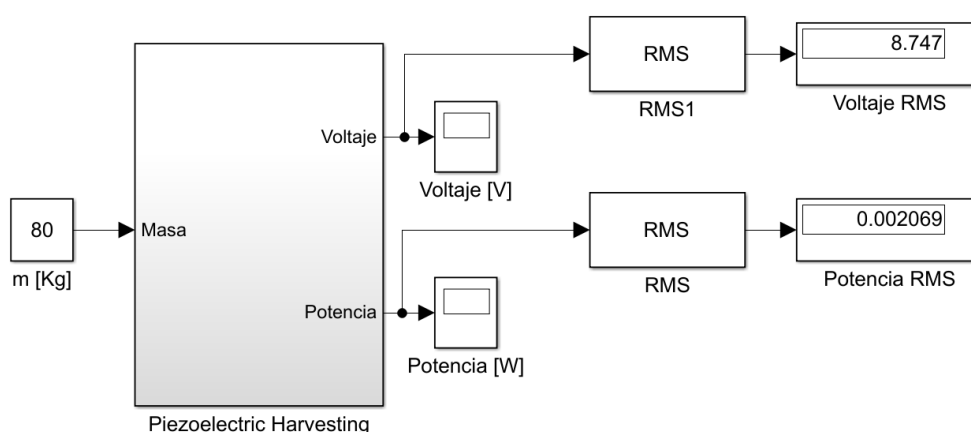


Figura 4.1: Resultados de la simulación de un módulo.

Se obtienen los valores RMS del módulo recolector ante los distintos tipos de masa m que se tiene establecido en la tabla 4.1 y también llenando de datos la misma.

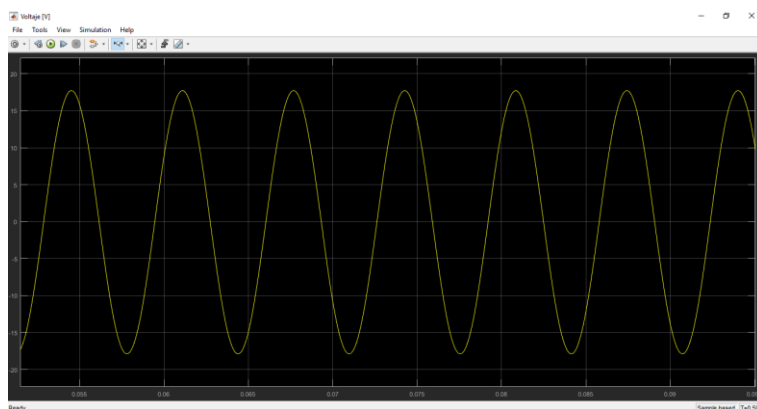


Figura 4.2: Respuesta de voltaje para una masa de [80 kg].

También se aprecia la señal de voltaje la cual posee características de ser una señal alterna, por ende las estimaciones iniciales de cómo se comportaría el módulo recolector son comprobadas por los resultados de la simulación, de igual modo estos módulos de manera mecánica al actuar como un oscilador armónico y dado que las características eléctricas de un material piezoeléctrico depende de su comportamiento mecánico sigue este comportamiento oscilatorio verificando que nuestras condiciones de modelamiento fueron acertadas.

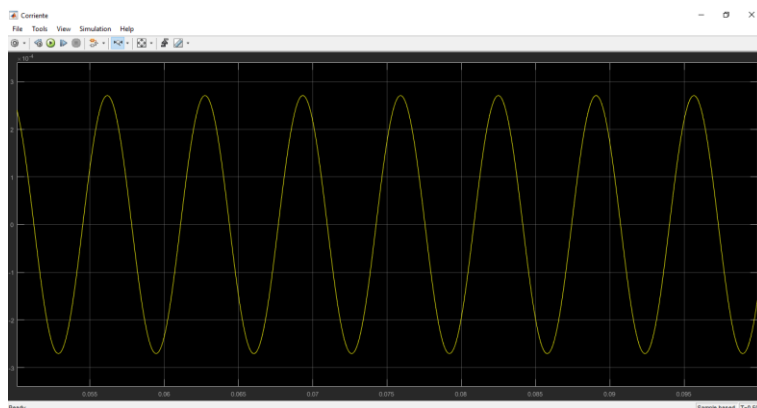


Figura 4.3: Respuesta de corriente para una masa de [80 kg].

Observamos la señal de corriente que sigue de igual forma el comportamiento que el voltaje, pero posee un desfase con respecto al voltaje y esto se debe a

como se especificó en el capítulo 2 el circuito equivalente de un material piezoeléctrico no es netamente resistivo posee parte resistiva, inductiva y capacitiva.

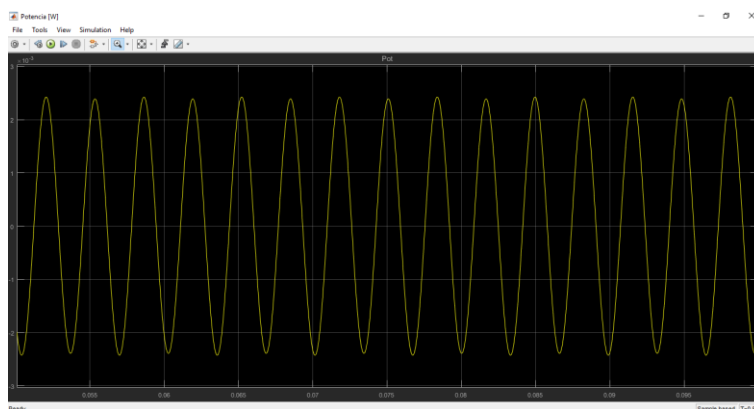


Figura 4.4: Respuesta de potencia con una masa de [80 kg].

Debido al desfase que existe en la respuesta de voltaje con respecto a la de la corriente, la respuesta de potencia presenta más oscilaciones en proporción a las examinadas en las de corriente y voltaje.

4.2 Resultados del Sistema FIFO.

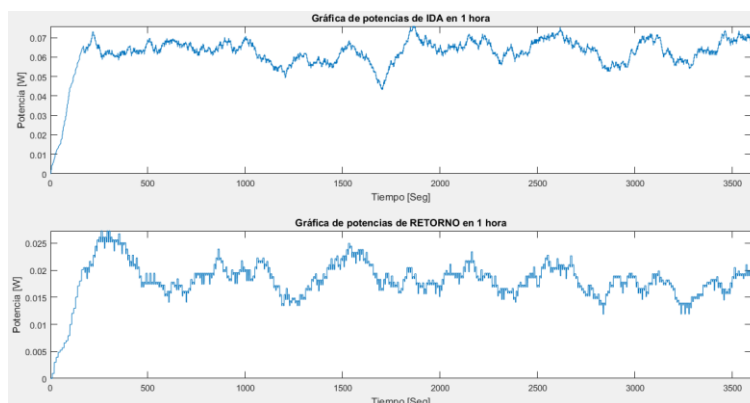


Figura 4.5: Graficas resultantes de la potencia versus tiempo obtenida por los recolectores piezoeléctricos.

Las gráficas mostradas en la figura 4.1 corresponde a la potencia recolectada por los módulos en un intervalo de una hora (3600 segundos), donde el área bajo la curva es la energía que se puede recolectar cuyo valor fue de aproximadamente 288.96 vatios considerando las pérdidas del convertidor tipo boost y el inverter

los cuales intervienen en el proceso de tratamiento de la energía captada para que sea apto para su posterior consumo. Debido a que la salida del inverter estará conectada a la red su señal de salida será de 120 voltios a una frecuencia de 60 hertz, cabe destacar que las pérdidas de todo este sistema descrito son de aproximadamente del 5 % por cada convertidor según lo descrito en el capítulo 2. Las tarifas que actualmente rigen en el Ecuador muestran que la metrovía se encuentra en la categoría de asistencia social, por lo cual demuestra que la fundación metrovía goza de ciertos privilegios al costear sus gastos en electricidad. Sin embargo, en otros países la energía que se produce por centrales ajenas a la hidroeléctrica posee mayores costos de los que rigen actualmente en comparación a Ecuador existiendo un concepto de no desperdiciar energía en estos países, de esta forma se fomenta el uso de nuevas alternativas para generar energía.

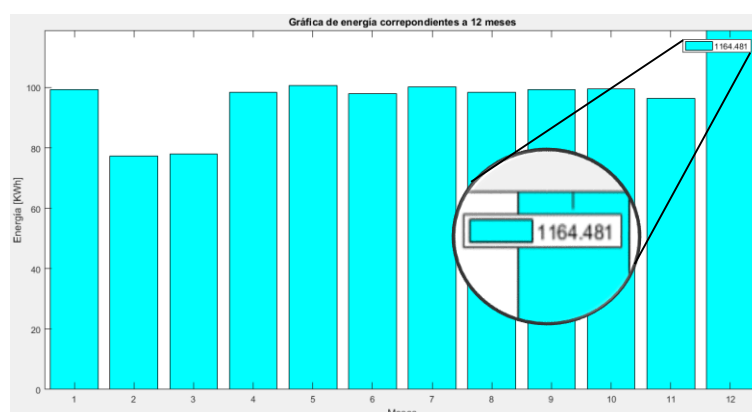


Figura 4.6: Gráfica resultante de energía versus tiempo obtenida por los recolectores piezoeléctricos en un año.

En figura 4.6 se puede apreciar la gráfica de potencia con relación al transcurso de 12 meses, en esta gráfica podemos notar que la potencia para los meses correspondientes a febrero y marzo se obtuvo un pequeño desnivel con respecto a la media obtenida en los otros meses, esto se debe a que en estos meses los estudiantes que cursan hasta el bachillerato en la región costa entran en un periodo vacacional. Continuando con el análisis del gráfico para el mes de diciembre notamos un incremento que corresponde al aumento de movilización por parte de la población, debido a las fiestas de navidad y fin de año, como

resultado este mes es el más provechoso para el sistema recolector de energía ya que conviene que la población se movilice por esta área. Finalmente, en el recuadro se observa que la energía total generada en un año corresponde a 1.1 megavatio-hora aproximadamente.

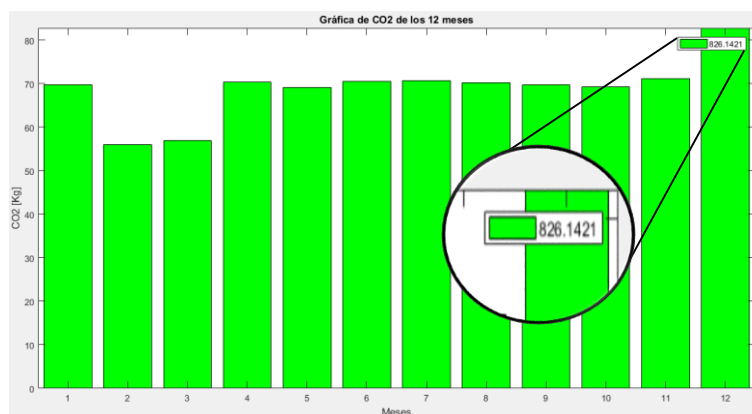


Figura 4.7: Grafica resultante de CO₂ no emitido al ambiente en un año.

La figura 4.7 indica la cantidad de CO₂ que el sistema energy harvesting podría no emitir al ambiente, su comportamiento con respecto a la gráfica de energía en función del tiempo es similar en forma pero no en unidades ya que existe una relación de la cantidad de kilogramos de CO₂ que se produce por cada kilo vatio generado al ser un sistema que produce contaminantes en menor cantidad que una hidroeléctrica, este factor posee un valor de 0.72 kilogramos de CO₂ por cada kilo vatio generado, cifra otorgada por el estudio de Factor de Emisión de CO₂ del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador realizado por el Ministerio del Ambiente.

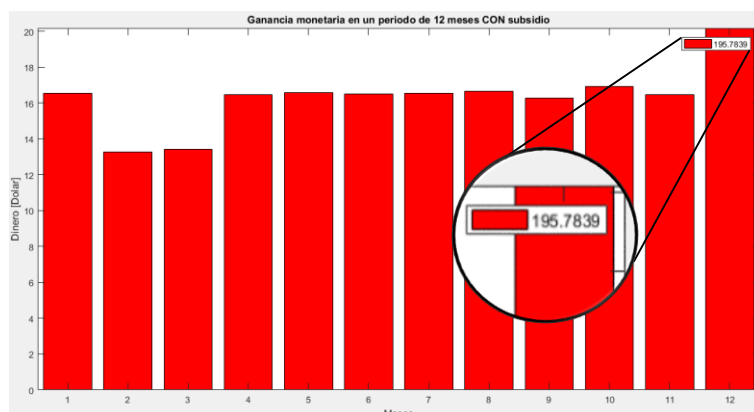


Figura 4.8: Gráfica resultante de ganancia considerando el subsidio a la energía eléctrica.

Tanto la energía producida como el evitar emisiones de CO₂ generan remuneraciones económicas, donde el costo del kilo vatio hora es de 9 centavos con subsidio y la tonelada de CO₂ posee un costo de 11 dólares en el mercado actual.

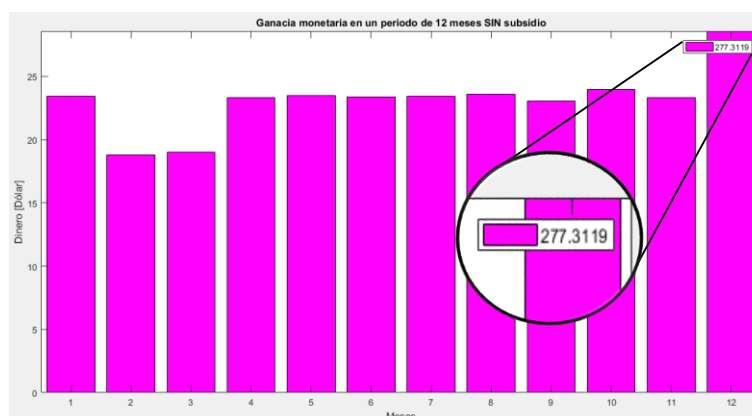


Figura 4.9: Gráfica resultante de ganancia sin considerar el subsidio a la energía eléctrica.

Finalmente, el interés por parte de las empresas privadas en el Ecuador de no existir un subsidio en la energía eléctrica y estar en una situación que requiera invertir en nuevas alternativas para la obtención de energía, puede llegar a costar el kilo vatio hora sin subsidio 16 centavos y el costo de la tonelada de CO₂ se mantiene en 11 dólares.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las respuestas de potencias obtenidas en la simulación del módulo recolector utilizando material piezoeléctrico parecen muy limitadas a cada masa que lo excita, sin embargo estas potencias varían para los distintos valores de masa a la cual sometemos al sistema existiendo una relación directa entre la masa que efectúa la deformación y la energía obtenida de la misma, se destaca el hecho de que las cifras que proporcionan el valor del peso promedio de la población según las edades datan del 2007 y que actualmente según algunos estudios el porcentaje de sobrepeso en la población se incrementó en estos últimos años, por lo tanto se utiliza unos porcentajes en relación a los datos que se tiene para elevar un poco más este peso promedio de la población y por ende en la muestras que interviene en la simulación del sistema recolector de energía. Dado que no se implementó una estructura recolectora ni tampoco se tuvo disponible de uno de estos módulos recolectores debido al factor tiempo y costos se estima que en la simulación desarrollada cada módulo posee una sola placa de material piezoeléctrico, sin embargo no se descarta la posibilidad de que existan configuraciones en serie o en paralelo de un conjunto de placas por cada módulo recolector lo que da lugar a obtener respuestas de potencia más altas y por ende mayor energía por cada pisada.

En contraste a los resultados de potencia que se obtuvo en la simulación varían dependiendo del tipo de material que se utilice, en sistemas recolectores se experimentan distintos tipos de transductores los cuales poseen algunas ventajas con respecto a otros sistemas, en sistemas tipo energy harvesting el material piezoeléctrico que utilizan provienen de compuestos sintéticos, por ende se sintetizaron distintos tipos de este material los cuales tienen como objetivo ser mejores que sus predecesores y también que su fabricación pueda ser estandarizada para volverse comercial, logrando de esta manera mejores resultados de potencia. Los datos de materiales que se han seleccionado pertenecen al año 2011, pero se considera en la actualidad existen más materiales con mejores respuestas de potencia a la excitación de las mismas masas que se han usado en esta simulación.

Analizando los datos recolectados se estableció un orden o patrón de manera que se logre una estimación para desarrollar la simulación del flujo de personas utilizando la metodología FIFO, al ser datos de tipo discreto se clasifico a las personas que intervienen en el FIFO como un conjunto de personas distinguidas por sus pesos promedios y edades. Además de ser divididas en tres grupos los cuales abarcan el conjunto de personas que en su momento fueron muestra, esto se realiza debido a que al captar los datos del flujo de personas no se disponen de los recursos para realizar mediciones de peso pertenecientes a cada persona que camino en el momento exacto de la toma de datos. Por lo tanto se enfocó en la contabilización y medición del tiempo en los que se realizó la muestra, en consecuencia los resultados de las gráficas obtenidas por el FIFO dependen de la aglomeración de las masas y el área que estas abarcan, como se observó los transeúntes en una proporción del 97% poseen una trayectoria fija que va desde el terminal norte de la metrovía hasta el terminal terrestre, observando en la simulación la variable “x” que representa el trayecto de los peatones su valor máximo es de 100 metros y abarca desde la salida del terminal de la metrovía hasta la totalidad de la distancia del paso desnivel, debido al flujo de personas más allá del paso desnivel se torna caótico y complejo de estimar para el FIFO.

La energía generada en el terminal de la metrovía en los lapsos de tiempo establecidos para cada simulación son el resultado de datos menos dispersos obtenidos en el área establecida en la simulación, sin embargo de tener este mismo sistema en un lugar donde abarque los factores mencionados previamente para obtener mejores resultados los cuales son mayor peso en los transeúntes, mayor flujo de personas y mayor área donde pueden ser instalados estos módulos recolectores se obtendrá una mayor captación de energía como un lugar a modo de recomendación está el terminal terrestre de Guayaquil que incluso un posee más usuarios que la terminal de la metrovía. Pese a todo lo anterior dicho el estudio se establece en el terminal de la metrovía precisamente debido a la poca dispersión que presentan los datos en esta área, por lo cual si se desea realizar una simulación en el terminal de la metrovía se requieren más recursos para la captación de datos y un mejor sistema que modele este flujo que no sigue un patrón fijo y es mucho más caótico que el desarrollado en la simulación destinada para la metrovía.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] International Energy Agency, (2017, octubre). Statistics [online]. Disponible en: <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/>.
- [2] U.S Energy Information Administration, (2018, enero). EIA projects world energy consumption will increase 56% by 2040 [online]. Disponible en: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=12251>.
- [3] Agencia de Regulación y Control de Electricidad, (2018, enero). Resumen Operativo del Sistema Nacional Interconectado [online]. Disponible en: <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/resumen-operativo-sni>.
- [4] Banco Mundial, (2018, enero). Emisiones de metano [online]. Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.METH.KT.CE?locations=EC&view=chart>.
- [5] Ministerio del Ambiente, (2018, enero). Factor de Emisión de CO₂ del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador [online]. Disponible en: <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/03/Factor-de-emisión-2013-PUBLICADO.pdf>.
- [6] Agencia de Regulación y Control de Electricidad, (2018, enero). PLIEGO TARIFARIO PARA LAS EMPRESAS ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN [online]. Disponible en: <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/01/2018-01-11-Pliego-y-Cargos-Tarifarios-del-SPEE-20182.pdf>.
- [7] Banco Central del Ecuador, (2018, enero). Barril Petróleo [online]. Disponible en: https://contenido.bce.fin.ec/resumen_ticker.php?ticker_value=petroleo.
- [8] Mainstream Renewable Power Chile, (2018, enero). Qué es ERNC [online]. Disponible en: <http://mainstreamrp.cl/tecnologia/que-es-ernc/>.
- [9] Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos - Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, (2018, enero). Estudio y gestión de la demanda eléctrica [online]. Disponible en: <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp->

content/uploads/downloads/2015/12/Vol2-Estudio-y-gestión-de-la-demanda-eléctrica.pdf.

[10] Sitio web oficial de los premios Nobel, (2017, noviembre). Pierre Curie – Biographical [online]. Disponible en: https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1903/pierre-curie-bio.html.

[11] National Geographic, (2017, noviembre). Resumen Operativo del Sistema Nacional Interconectado [online]. Disponible en: <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/resumen-operativo-sni>.

[12] LG CNS, (2017, noviembre). The Future of Eco-Friendly Energy with Piezoelectric Energy Harvesting [online]. Disponible en: <http://www.lgcnsblog.com/features/the-future-of-eco-friendly-energy-with-piezoelectric-energy-harvesting/#sthash.9Lt6ED6o.dpbs>.

[13] María José González Río, Metodología de la investigación social: Técnicas de recolección de datos. Alicante: Aguaclara, 1997.

[14] Mikel Mauleon Torres, Sistemas de Almacenaje y Picking. Madrid: Díaz de Santos, 2003.

[15] *An American National Standard IEEE Standard on Piezoelectricity*, ANSI/IEEE Std 176-1987, Approved March 12, 1987.

[16] Michael J. Grimble, *Advances in Industrial Control*, Glasgow: Springer, 2006.

[17] Miguel Ángel Pérez García, *Instrumentación Electrónica*, Madrid: Ediciones Paraninfo, 2014.

[18] Alper Ertuk and Daniel J. Inman, *Piezoelectric Energy Harvesting first edition*, West Sussex Country: WILEY A John Wiley and Sons, 2011.

[18] Hehn Thorsten and Manoli Yiannos, *CMOS Circuits for Piezoelectric Energy Harvesters Efficient Power Extraction, Interface Modeling and Loss Analysis*, New York-London: Springer.

[19] Alper Ertuk and Daniel J. Inman, *Piezoelectric Energy Harvesting first edition*, West Sussex Country: WILEY A John Wiley and Sons, 2011.

- [20] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, (2018, enero). Revista de Estadística y Metodologías [online]. Disponible en: http://www.ecuadorencifras.gob.ec//documentos/web-inec/Bibliotecas/Revista_Estadistica/Revista_de_Estadistica_y_Metodologias-Tomo-I.pdf.
- [21] Organización Mundial de la Salud, (2018, enero). Obesidad y sobrepeso [online]. Disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs311/es/>.
- [22] Muhammad H. Rashid, Electrónica de Potencia, ed.2. Fort Wayne: Prentice Hall Hispanoamérica, 1993.
- [23] Sistema europeo de negociación de CO₂, (2018, febrero). Precios CO₂ [online]. Disponible en: <https://www.sendeco2.com/es/precios-co2>.
- [24] Real Academia Española, (2018, febrero). Diccionario de la lengua española (DLE): paso [online]. Disponible en: <http://dle.rae.es/?id=S4wajTd>.
- [25] Fundación Municipal Transporte Masivo Urbano de Guayaquil, (2018, febrero). Art. 7 de la Ley Orgánica de Transparencia y Acceso a la Información Pública – LOTAIP d) Los servicios que ofrece y las formas de acceder a ellos, horarios de atención y demás indicaciones necesarias, para que la ciudadanía pueda ejercer sus derechos y cumplir sus obligaciones [online]. Disponible en: http://www.metrovia-gye.com.ec/PDF/leytransparencia/D/2018/01_ENE/d_Servicio_Brindado_ene2018.pdf.

ANEXOS

A.1 Desarrollo de ecuaciones matriciales:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & s_{15} & s_{16} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & s_{25} & s_{26} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34} & s_{35} & s_{36} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} & s_{45} & s_{46} \\ s_{51} & s_{52} & s_{53} & s_{54} & s_{55} & s_{56} \\ s_{61} & s_{62} & s_{63} & s_{64} & s_{65} & s_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ d_{16} & d_{26} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{11}^\sigma & e_{12}^\sigma & e_{13}^\sigma \\ e_{21}^\sigma & e_{22}^\sigma & e_{23}^\sigma \\ e_{31}^\sigma & e_{32}^\sigma & e_{33}^\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Las deformaciones cortantes S_4, S_5, S_6 se pueden encontrar también como:

$$\begin{aligned} S_4 &= \gamma_{23} \\ S_5 &= \gamma_{31} \\ S_6 &= \gamma_{12} \end{aligned}$$

Haciendo referencia a que esos son los ejes a través de los cuales se ejerce la deformación que como resultado es cortante. De la misma forma los esfuerzos cortantes se pueden expresar como:

$$\begin{aligned} \tau_{23} &= \sigma_4 \\ \tau_{31} &= \sigma_5 \\ \tau_{12} &= \sigma_6 \end{aligned}$$

Asumiendo que el dispositivo es polarizado a lo largo del eje 3, y viendo que el material piezoeléctrico como un material isotrópico transversalmente, lo cual es cierto para las cerámicas piezoeléctricas, muchos de los parámetros en las matrices anteriores serán cero, o pueden ser expresados en términos de otros parámetros.

En particular los componentes de la matriz de constantes de elasticidad.

$$\begin{aligned}
s_{11} &= s_{22} \\
s_{13} &= s_{31} = s_{23} = s_{32} \\
s_{12} &= s_{21} \\
s_{44} &= s_{55} \\
s_{66} &= 2(s_{11} - s_{12})
\end{aligned}$$

Los esfuerzos cortantes.

$$\begin{aligned}
d_{31} &= d_{32} \\
d_{15} &= d_{24}
\end{aligned}$$

Los coeficientes dieléctricos.

$$e_{11}^{\sigma} = e_{22}^{\sigma} = e_{33}^{\sigma}$$

Dando como resultado:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(s_{11} - s_{12}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{11}^{\sigma} & 0 & 0 \\ 0 & e_{11}^{\sigma} & 0 \\ 0 & 0 & e_{33}^{\sigma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

A.2 Ecuaciones para el modelamiento del módulo recolector:

Sumatoria de fuerzas que intervienen en el módulo recolector:

$$ma = m\ddot{z} + d\dot{z} + k_s z + F_e \quad (a)$$

Ecuaciones que describen el comportamiento del material piezoeléctrico modo 31:

$$\begin{cases} S_1 = s_{11}^E \cdot T_1 + d_{31} \cdot E_3 \\ D_3 = d_{31} \cdot T_1 + \varepsilon_{33}^T \cdot E_3 \end{cases} \quad (b)$$

Ecuaciones que intervienen en el material piezoeléctrico del módulo recolector que se encuentra deformado por una masa m:

$$E = -\frac{V_p}{h} \quad q = Dbl \quad T = \frac{F}{bh} \quad S = \frac{\varepsilon}{l} \quad I = \frac{\partial q}{\partial t} \quad (c)$$

Reemplazando las ecuaciones descritas en c para el conjunto de ecuaciones planteadas en b:

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon}{l} &= S_{11}^E \frac{F}{bh} + d_{31} \left(-\frac{V_p}{h} \right) \\ \frac{q}{bl} &= d_{31} \frac{F}{bh} + \varepsilon_{33}^T \left(-\frac{V_p}{h} \right) \end{aligned} \quad (d)$$

Despejando F:

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon}{l} + d_{31} \frac{V_p}{h} &= S_{11}^E \frac{F}{bh} \\ \varepsilon \frac{b \cdot h}{l \cdot S_{11}^E} + V_p \frac{d_{31} \cdot b}{S_{11}^E} &= F \\ F &= \varepsilon \cdot k_p + V_p \cdot n \end{aligned} \quad (e)$$

Despejando q:

$$\begin{aligned} \frac{q}{bl} &= d_{31} \frac{F}{bh} + \varepsilon_{33}^T \left(-\frac{V_p}{h} \right) \\ q &= d_{31} \frac{l}{h} F - \varepsilon_{33}^T \frac{bl}{h} V_p \\ q &= d_{31} \frac{l}{h} (\varepsilon \cdot k_p + V_p \cdot n) - \varepsilon_{33}^T \frac{bl}{h} V_p \\ q &= d_{31} \frac{l}{h} \varepsilon k_p + \left(nd_{31} \frac{l}{h} - \varepsilon_{33}^T \frac{bl}{h} \right) V_p \\ q &= d_{31} \frac{l}{h} \varepsilon \frac{b \cdot h}{l \cdot S_{11}^E} + \left(\frac{d_{31} \cdot b}{S_{11}^E} d_{31} \frac{l}{h} - \varepsilon_{33}^T \frac{bl}{h} \right) V_p \\ q &= \frac{bd_{31}}{S_{11}^E} \varepsilon - \left[\left(\frac{d_{31}}{S_{11}^E} d_{31} - \varepsilon_{33}^T \right) \frac{bl}{h} \right] V_p \\ q &= n\varepsilon - C_p V_p \end{aligned}$$

Derivando q con respecto al tiempo:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = n\dot{\varepsilon} - C_p \dot{V}_p$$

$$I = n\dot{\varepsilon} - C_p V_p \quad (f)$$

Combinando e y f:

$$\begin{cases} F = \varepsilon \cdot k_p + V_p \cdot n \\ I = n \dot{\varepsilon} - C_p \dot{V}_p \end{cases} \quad (g)$$

Reemplazando F_e en la ecuación g en vez de F y ε por la variable z en la ecuación g y reemplazando en la ecuación a:

$$ma = m\ddot{z} + d\dot{z} + k_s z + F_e$$

$$ma = m\ddot{z} + d\dot{z} + k_s z + k_p z + V_p n$$

$$ma = m\ddot{z} + d\dot{z} + kz + V_p n \quad (h)$$

Combinando h con la segunda ecuación de g

$$\begin{cases} ma = m\ddot{z} + d\dot{z} + kz + V_p n \\ I = n\dot{\varepsilon} - C_p \dot{V}_p \end{cases}$$